

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ РОСАТОМ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
Объединенный институт высоких температур РАН
Научный совет РАН по физике плазмы
Научный совет РАН по комплексной проблеме
«Физика низкотемпературной плазмы»

Государственный научный центр РФ ТРИНИТИ
Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН
Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

**LI МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗВЕНИГОРОДСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И
УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ
ISPAF-2024**

18 – 22 марта 2024 г.

г. Звенигород

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Финансовая поддержка:

Государственная корпорация РОСАТОМ
Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН
Проектный центр ИТЭР ГК РОСАТОМ

Москва, 2024

УДК 533.9
PACS 52.20-52.75
ББК 22.333
М43

**LI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и
управляемому термоядерному синтезу
18 – 22 марта 2024 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов.
М.: АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2024 г. – 316 с.**

В сборник включены тезисы докладов по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, представленные на LI Международную Звенигородскую конференцию по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу учеными из институтов Министерства науки и высшего образования РФ, Российской академии наук, предприятий российской государственной корпорации РОСАТОМ, Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», университетов и высших учебных заведений России, стран СНГ, научных центров других стран.

Составители:

В.А. Иванов, И.А. Гришина, М.Л. Нагаева, Д.Г. Васильков, С.А. Двинин,
Ю.А. Лебедев, Г.А. Вергунова, А.И. Мещеряков

Макет – И.А. Гришина, М.Л. Нагаева, С.Н. Сатунин

ISBN 978-5-6042115-1-9

© АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН»
© Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
© Авторы, 2024

**STATE CORPORATION ROSATOM
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences
Scientific Council on Plasma Physics, Russian Academy of Sciences
Scientific Council on the Complex Problem “Physics of Low Temperature Plasma”,
Russian Academy of Sciences

Science and Technology Center PLASMAIOFAN
State Research Center of Russian Federation TRINITI
National Research Nuclear University MEPhI
Lomonosov Moscow State University

**LI International Zvenigorod Conference
on Plasma Physics and Controlled Fusion
ICPAF-2024**

March 18-22, 2024

Zvenigorod

BOOK OF ABSTRACTS

Financial Support

State Corporation ROSATOM
Science and Technology Center PLASMAIOFAN
Project Center ITER of the State Corporation ROSATOM

Moscow, 2024

PACS 52.20–52.75

**LI International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion.
March 18–22, 2024, Zvenigorod. Book of Abstracts
Moscow: Science and Technology Center PLASMAIOFAN, 2024–pp. 316**

This book includes the abstracts on plasma physics and controlled fusion presented at the **LI International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion** in 2024 (**ICPAF-2024**) by scientists from the institutes of Russian Academy of Sciences and Ministry of Science and Higher Education of Russia, from organizations of the Russian State Corporation ROSATOM, from the National Research Center “Kurchatov Institute”, from the leading universities of higher education system of Russia, as well as from scientific centers and laboratories of the Commonwealth of Independent States (CIS), and from other countries.

Compiled by:

V.A. Ivanov, I.A. Grishina, M.L. Nagaeva, D.G. Vasilkov, S.A. Dvinin,
Yu.A. Lebedev, G.A. Vergunova, A.I. Meshcheryakov

Layout by:

I.A. Grishina, M.L. Nagaeva, S.N. Satunin

© Science and Technology Center PLASMAIOFAN

© Prokhorov General Physics Institute, RAS

© Authors, 2024

ISBN 978-5-6042115-1-9

Программный комитет

| | |
|-------------------|--|
| Ильгисонис В.И. | член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, Госкорпорация «Росатом», председатель |
| Багрянский П.А. | доктор физико-математических наук, Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН |
| Борзосеков В.Д. | кандидат физико-математических наук, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН |
| Бурдаков А.В. | доктор физико-математических наук, Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН |
| Васильев М.М. | доктор физико-математических наук, Объединенный институт высоких температур РАН |
| Василяк Л.М. | доктор физико-математических наук, Объединенный институт высоких температур РАН |
| Вергунова Г.А. | кандидат физико-математических наук, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН |
| Гаспарян Ю.М. | кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» |
| Гарнов С.В. | член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН |
| Готт Ю.В. | доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» |
| Гусаков Е.З. | доктор физико-математических наук, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН |
| Гуськов С.Ю. | доктор физико-математических наук, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН |
| Двинин С.А. | доктор физико-математических наук, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова |
| Денисов Г.Г. | академик РАН, доктор физико-математических наук, Институт прикладной физики РАН |
| Иванов В.А. | кандидат физико-математических наук, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН |
| Красильников А.В. | доктор физико-математических наук, частное учреждение «Проектный центр ИТЭР» |
| Кузнецов А.П. | доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» |
| Лебедев Ю.А. | доктор физико-математических наук, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН |
| Мещеряков А.И. | кандидат физико-математических наук, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН |
| Мирнов С.В. | доктор физико-математических наук, Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» |
| Пастухов В.П. | доктор физико-математических наук, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» |
| Петров О.Ф. | академик РАН, доктор физико-математических наук, Объединенный институт высоких температур РАН |
| Романников А.Н. | доктор физико-математических наук, акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» |
| Рыжков С.В. | доктор физико-математических наук, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет). |

Организационный комитет

| | |
|-----------------|--|
| Иванов В.А. | кандидат физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, сопредседатель |
| Андреанова М.С. | руководитель проектного офиса, Госкорпорация «Росатом», сопредседатель |
| Аникеев А.В. | кандидат физико-математических наук, руководитель проектного офиса, частное учреждение «Наука и инновации» |
| Васильков Д.Г. | кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН |
| Воронова Е.В. | научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН |
| Гришина И.А. | кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ученый секретарь |
| Калашников П.А. | советник проектного офиса координации и обеспечения деятельности научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом» |
| Камолова Т.И. | кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН |
| Куравлева Ю.С. | главный специалист проектного офиса координации и обеспечения деятельности научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом» |
| Нагаева М.Л. | кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, акционерное общество научно-технологический центр «ПЛАЗМАИОФАН» |
| Рубченков А.В. | советник проектного офиса координации и обеспечения деятельности научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом» |
| Рыжова С.А. | советник проектного офиса координации и обеспечения деятельности научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом» |
| Сатунин С.Н. | научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН |
| Соболев А.В. | начальник ФГБУ «Санаторно-курортный комплекс «Подмосковье» Министерства обороны Российской Федерации |
| Сорокин А.В. | советник проектного офиса координации и обеспечения деятельности научно-технологического развития Госкорпорации «Росатом» |
| Сухотерин А.Ф. | начальник филиала «Санаторий Звенигородский» ФГБУ «Санаторно-курортный комплекс «Подмосковье»» Министерства обороны Российской Федерации |
| Шевченко А.А. | ведущий инженер, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» |

СОДЕРЖАНИЕ
сборника тезисов докладов LI Международной Звенигородской конференции
по физике плазмы и УТС

| Разделы, авторы и названия докладов | Страницы |
|---|--------------|
| ОБЗОРНЫЕ ДОКЛАДЫ | 37-52 |
| Лебедев С.В. (<i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия</i>) КОНФЕРЕНЦИЯ FES-2023: ИНЖЕНЕРНЫЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ УТС | 37 |
| Пастухов В.П., Смирнов Д.В., Чудин Н.В. (<i>НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия</i>) ЭФФЕКТИВНАЯ МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИНАМИКИ И РЕЗУЛЬТИРУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ПЛАЗМЕ ОСНОВНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА | 38 |
| Багрянский П.А. (<i>ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия</i>) СТАТУС РАБОТ ПО РАЗВИТИЮ ПРОЕКТА ГДМЛ | 39 |
| <u>Асташинский В.М.</u> , Пенязьков О.Г. (<i>Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь</i>) КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ | 40 |
| Булычев Н.А. (<i>МАИ (НИУ), г. Москва, Россия</i>) ПОЛУЧЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕННЫХ РАЗРЯДАХ В ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАЗВУКА | 41 |
| Коваль Н.Н. (<i>ИСЭ СО РАН, г. Томск, Россия</i>) ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ | 42 |
| Сорокина Е.А. (<i>НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия</i>) РАВНОВЕСИЕ ПЛАЗМЫ В ОСЕНЕССИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМАХ | 43 |
| <u>Скалыга В.А.</u> , Глявин М.Ю., Господчиков Е.Д., Изотов И.В., Шалашов А.Г. (<i>ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия</i>) ДВУХЧАСТОТНЫЙ ЭЦР НАГРЕВ В КОМПАКТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ – ЗАДАЧИ И ПРЕИМУЩЕСТВА | 44 |
| Скворцова Н.Н. (<i>ИОФ РАН, г. Москва, Россия</i>) МИКРОДИСПЕРСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЯХ В ПРОЦЕССАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ МИКРОВОЛНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ МОЩНОГО ГИРОТРОНА В СМЕСИ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ЦИТОТОКСИЧНОСТЬ | 45 |
| <u>Химченко Л.Н.</u> , Красильников А.В. (<i>ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия</i>) ИТЭР. ВРЕМЯ ПЕРЕМЕН | 46 |

- ¹Курские Г.С., ¹Сахаров Н.В., ¹Минаев В.Б., ¹Гусев В.К., ¹Петров Ю.В., 47
²Багрянский П.А., ¹Балаченков И.М., ¹Бахарев Н.Н., ¹Варфоломеев В.И.,
¹Воронин А.В., ¹Горяинов В.А., ⁴Жилин Е.Г., ¹Жильцов Н.С., ²Иваненко С.В.,
¹Ильясова М.В., ³Кавин А.А., ¹Киселев Е.О., ¹Крикунов С.В., ¹Мельник А.Д.,
³Минеев А.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Мухин Е.Е., ¹Новохацкий А.Н.,
¹Патров М.И., ⁵Петров А.В., ⁵Пономаренко А.М., ¹Скрекель О.М.,
⁶Соловей В.А., ¹Солоха В.В., ²Соломахин А.Л., ¹Тельнова А.Ю.,
¹Ткаченко Е.Е., ¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю., ¹Тюхменева Е.А.,
¹Филиппов С.В., ¹Хилькевич Е.М., ¹Хромов Н.А., ¹Чернышев Ф.В.,
¹Шевелев А.Е., ²Шиховцев И.В., ¹Шулятьев К.Д., ¹Щеголев П.Б.,
^{1,5}Яшин А.Ю. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия;
²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ³АО «НИИЭФА им.
Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия; ⁴ООО Иоффе Фьюжн
Технолоджи, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁵СПбПУ, г. Санкт-Петербург,
Россия; ⁶ПИЯФ им. Б.П. Константинова, НИЦ «Курчатовский институт»,
г. Санкт-Петербург, Россия)
- ТЕРМОИЗОЛЯЦИЯ ПЛАЗМЫ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-
М2 ПРИ НАГРЕВЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫМИ АТОМНЫМИ ПУЧКАМИ
- Гусаков Е.З., Попов А.Ю. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург,
Россия) 48
- АНОМАЛЬНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЧ ВОЛН ПРИ
ЭЛЕКТРОННОМ ЦИКЛОТРОННОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ
- ¹Анашкин И.О., ¹Андреев В.Ф., ¹Асадулин Г.М., ¹Ахметов Э.Р., ¹Балашов А.Ю., 49
^{1,2}Бегишев Р.А., ¹Белов А.М., ¹Бельбас И.С., ⁴Бондарчук Э.Н.,
¹Борщеговский А.А., ¹Горбунов А.В., ¹Горшков А.В., ¹Грашин С.А.,
¹Громова А.В., ¹Диас Михайлова Д.Е., ¹Дрёмин М.М., ^{1,3}Дрозд А.С.,
¹Дубиницкий А.Ф., ¹Земцов И.В., ¹Ильин И.С., ¹Карпов А.В., ¹Качкин А.Г.,
^{1,3}Кирнева Н.А., ¹Кислов Д.А., ¹Кочин В.А., ¹Крупин В.А., ¹Кузнецова Л.К.,
¹Левин И.В., ^{1,6}Лисовой П.Д., ¹Лутченко А.В., ¹Машункин М.В., ⁴Минеев А.Б.,
¹Модяев А.Л., ¹Мустафин Н.А., ¹Мялтон Т.Б., ¹Немец А.Р., ¹Николаев А.В.,
¹Новиков В.Н., ¹Ноткин Г.Е., ¹Нурғалиев М.Р., ¹Образцов И.С., ^{1,3}Панфилов Д.С.,
¹Пименов И.С., ¹Рой И.Н., ⁵Романников А.Н., ¹Рыжак Д.В., ^{1,6}Саврухин П.В.,
¹Сарычев Д.В., ¹Сергеев Д.С., ¹Смирнов В.В., ¹Соловьёв Н.А., ¹Степин А.В.,
¹Сушков А.В., ^{1,7}Сычуг Д.Ю., ¹Тарасян К.Н., ^{1,6}Тепикин В.И.,
¹Толпегина Ю.И., ¹Хайрутдинов Э.Н., ¹Хвостенко А.П., ¹Хвостенко П.П.,
¹Чудеснов А.И., ¹Шелухин Д.А., ¹Шестаков Е.А. и коллектив установки Т-15МД
(¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ),
г. Долгопрудный, Россия; ³НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; ⁴АО «НИИЭФА им.
Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия; ⁵АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
г. Москва, Россия; ⁶НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия; ⁷МГУ им. М.В. Ломоносова,
г. Москва, Россия)
- РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА Т-15МД
- Запретилина Е.Р., Медников А.А., Родин И.Ю. (АО «НИИЭФА им.
Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия) 50
- ВТСП В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
УСТАНОВОК УТС (ПРОЕКТЫ SPARC, TRT, ST-NTS И ДР.)
- Бельков С.А., Гаранин С.Г., Деркач В.Н., Шагалкин Ю.В. (РФЯЦ-ВНИИЭФ,
г. Саров, Россия) 51
- МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС
МЕГАДЖОУЛЬНОЙ УСТАНОВКИ. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ
- Красильников А. В. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва,
Россия) 52
- О ВОЗМОЖНОМ ЭФФЕКТИВНОМ ПУТИ К СОЗДАНИЮ
ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В РОССИИ

| ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ» | 55-136 |
|--|---------------|
| ^{1,2} Аммосов Я.М., ¹ Вадимов Н.А., ^{1,2} Виницкий Е.А., ¹ Драбинский М.А., ¹ Елисеев Л.Г., ^{1,2} Крохалев О.Д., ^{1,2,3} Мельников А.В., ^{1,2} Саранча Г.А., ^{1,4} Харчев Н.К., ^{1,5} Шелегеда И.А. (¹ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ² МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³ НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; ⁴ ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ⁵ МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия) | 55 |
| МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ ОБЛАСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД | |
| ¹ Андрианова Р.Р., ¹ Хайрутдинов Э.Н., ^{1,2} Докука В.Н., ^{1,2} Хайрутдинов Р.Р., ² Скопинцев Д.А. (¹ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ² АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия) | 56 |
| РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА В ТОКАМАКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ | |
| ¹ Ануфриев Е.А., ¹ Тимохин В.М., ² Толпегина Ю.И., ¹ Сергеев В.Ю., ² Горбунов А.В. (¹ СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ² НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) | 57 |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЕВОЙ СТРУИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ ТОКАМАКА «ГЛОБУС-М2» | |
| ¹ Асадулин Г.М., ^{1,2} Кирнева Н.А., ¹ Бельбас И.С., ¹ Горшков А.В., ^{1,2} Панфилов Д.С., ¹ Крылов С.В., ¹ Немец А.Р., ¹ Сергеев Д.С., ¹ Соловьев Н.А. (¹ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ² НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) | 58 |
| РЕГИСТРАЦИЯ ВНУТРЕННЕГО ТРАНСПОРТНОГО БАРЬЕРА С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-10 | |
| ¹ Балаченков И.М., ¹ Бахарев Н.Н., ¹ Гусев В.К., ¹ Жильцов Н.С., ¹ Курский Г.С., ¹ Киселев Е.О., ¹ Минаев В.Б., ¹ Мирошников И.В., ¹ Петров Ю.В., ² Пономаренко А.М., ¹ Сахаров Н.В., ¹ Тельнова А.Ю., ¹ Щеголев П.Б., ^{1,2} Яшин А.Ю. (¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; ² СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия) | 59 |
| ВЛИЯНИЕ ТОРОИДАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА ТОРОИДАЛЬНЫЕ АЛЬФВЕНОВСКИЕ МОДЫ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 | |
| Белокуров А.А., Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Жубр Н.А., Корнев В.А., Лебедев С.В., Разуменко Д.В., Смирнов А.И., Тукачинский А.С., Шергин Д.А., Шувалова Л.К. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия) | 60 |
| ПРИМЕНЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭВОЛЮЦИИ РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М | |
| Бочарова Е.В., Баркалов К.Е., Ерёмин В.А., Никулин В.А. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) | 61 |
| ВЫБОР СХЕМЫ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНИКА НЕЙТРАЛЬНОГО ПУЧКА ДЛЯ ИНЖЕКТОРОВ ТОКАМАКА Т-15МД | |
| Борщеговский А.А. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) | 62 |
| ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС И ЕГО ОСОБЕННОСТИ НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК Т-15МД (К ЭКСПЕРИМЕНТАМ ПО ПРЕДЫОНИЗАЦИИ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЭЦР) | |
| Будаев В.П. (¹ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ² НИУ «МЭИ», г. Долгопрудный, Россия) | 63 |
| СКЕЙЛИНГ ПОДОБИЯ ТОКАМАКОВ КАДОМЦЕВА ДЛЯ ГИБРИДНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА | |

- Черноштанов И.С. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 64
 ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛАЗМЫ В ДЛИННОЙ
 ДИАМАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ
- ^{1,2}Чукашев Н.В., ^{1,3}Пустовитов В.Д. (¹НИЦ «Курчатовский институт»,
 г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³НИЯУ МИФИ,
 г. Москва, Россия) 65
 АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНКРЕМЕНТА
 НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ
 ТОКАМАКА
- ¹Чувакин П.А., ¹Господчиков Е.Д., ^{2,3}Соломахин А.Л., ¹Шалашов А.Г.
 (¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия; ²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск,
 Россия) 66
 ПОЛНОВОЛНОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО
 ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ В
 УСТАНОВКЕ ГДМЛ
- Андреев В.Ф., Асеев А.С., Данилов А.В., Днестровский Ю.Н., Лысенко С.Е.,
 Рыжак Д.В. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 67
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ И КОНВЕКЦИИ В ПЛАЗМЕ Т-10 ПРИ
 ЦЕНТРАЛЬНОМ ЭЦР НАГРЕВЕ ПОСЛЕ ЛИТИЕЗАЦИИ КАМЕРЫ
- ¹Дейчули П.П., ¹Бруль А.В., ¹Вахрушев Р.В., ¹Дейчули Н.П., ^{1,2}Орешонок В.В.,
¹Ращенко В.В., ^{1,2}Сорокин А.В., ^{1,2}Ступишин Н.В. (¹ИЯФ СО РАН,
 г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия) 68
 ВЛИЯНИЕ ВСТРЕЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ
 И ОПТИМАЛЬНЫЙ ТОК ИОННОГО ПУЧКА МОЩНОГО АТОМАРНОГО
 ИНЖЕКТОРА
- Длугач Е.Д. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 69
 РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ
 СИСТЕМ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ
 (VTR CODE)
- ¹Днестровский Ю.Н., ¹Мельников А.В., ¹Андреев В.Ф., ¹Лысенко С.Е.,
¹Нургалиев М.Р., ²Шалашов А.Г. (¹НИЦ «Курчатовский институт»,
 г. Москва, Россия; ²ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия) 70
 АНАЛИЗ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЧ ВОЛН В ТОКАМАКАХ И СТЕЛЛАТОРАХ
 ПО ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ КАНОНИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ
- ¹Ермаков Н.В., ¹Жильцов Н.С., ¹Курские Г.С., ¹Мухин Е.Е., ¹Толстяков С.Ю.,
¹Ткаченко Е.Е., ¹Соловей В.А., ²Долгова К.В., ³Кавин А.А., ¹Коваль А.Н.,
¹Николаенко К.О., ¹Новохацкий А.Н., ¹Петров Ю.В., ²Рожанский В.А.,
¹Сахаров Н.В., ²Сениченков И.Ю. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-
 Петербург, Россия; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ³АО «НИИЭФА им.
 Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия) 71
 ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ В ДИВЕРТОРНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА
 ГЛОБУС - М2 МЕТОДОМ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ (СТАТУС РАБОТ)
- ¹Гамов В.В., ¹Ступишин Н.В., ^{1,2}Колесниченко К.С., ¹Воскобойников Р.В.,
¹Зубарев П.В., ¹Моисеев Д.В., ¹Хильченко А.Д., ¹Вахрушев Р.В., ^{1,3}Кравец Е.А.,
¹Мурахтин С.В. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск,
 Россия; ³НГТУ, г. Новосибирск, Россия) 72
 СИСТЕМА МОЩНОЙ АТОМАРНОЙ ИНЖЕКЦИИ НА УСТАНОВКЕ КОТ
- ^{1,2}Горяинов В.Ю., ¹Воронин А.В. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-
 Петербург, Россия; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 73
 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУИ ГАЗА, СОЗДАВАЕМОЙ
 УСКОРИТЕЛЕМ ПЛАЗМЫ

- Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г. (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия) 74
ПЛАЗМА ЭЦР РАЗРЯДА В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ КАК ЦИКЛОТРОННЫЙ МАЗЕР: ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ И ВЛИЯНИЕ НА УДЕРЖАНИЕ
- Господчиков Е.Д., Изотов И.В., Шалашов А.Г. (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия) 75
ОБРАТНОЕ ВЛИЯНИЕ ВЫСЫПАНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ДИНАМИКУ КИНЕТИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ
- ^{1,2}Губанова А.И., ¹Борщеговский А.А., ¹Пименов И.С., ¹Рой И.Н. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия) 76
ВЛИЯНИЕ РАССЕЯННЫХ ПОЛЕЙ ТОКАМАКА И СОСЕДНИХ СОЛЕНОИДОВ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ Т-15МД НА ВЫХОД ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА КОЛЛЕКТОРЕ ГИРОТРОНА
- Инжеваткина А.А., Судников А.В., Толкачев М.С., Устюжанин В.О. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 77
СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В МНОГОПРОБОЧНОМ И ВИНТОВОМ МАГНИТНОМ ПОЛЯХ В ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА
- ^{1,2}Изарова А.Д., ¹Балашов А.Ю., ^{1,3}Белов А.М., ¹Елисеев Л.Г., ^{1,4}Саранча Г.А. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; ³АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия; ⁴МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия) 78
МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МГД-ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД
- ^{1,2}Касьянова Н.В., ¹Днестровский Ю.Н., ^{1,2,3}Мельников А.В. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 79
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-15МД В РАЗРЯДАХ С УМЕНЬШЕННЫМ ОБЪЕМОМ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА НА ОСНОВЕ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ КАНОНИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ
- Соколов М.М., Игонькина Г.Б., Качкин А.Г., Хайрутдинов Э.Н. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 80
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ И СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА Т-15МД
- ¹Ханаева Р.А., ²Михайлов М.И. (¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 81
КВАЗИ-ИЗОДИНАМИЧЕСКИЕ СТЕЛЛАТОРЫ СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ ПЕРИОДА И УМЕНЬШЕННЫМ АСПЕКТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ
- ¹Хусаинов Т.А., ¹Балакин А.А., ¹Господчиков Е.Д., ^{1,2}Соломахин А.Л., ¹Шалашов А.Г. (¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия; ²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 82
КВАЗИОПТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ЭЦР-НАГРЕВУ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ НА ЧАСТОТЕ 54.5 ГГц
- ^{1,2}Киселев Е.О., ¹Бахарев Н.Н., ¹Варфоломеев В.И., ¹Гусев В.К., ¹Курские Г.С., ¹Минаев В.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Патров М. И., ¹Петров Ю.В., ²Пономаренко А.М., ¹Сахаров Н.В., ¹Солоха В.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Теплова Н.В., ¹Токарев В.А., ¹Тюхменева Е.А., ¹Хромов Н.А., ¹Щеголев П.Б., ^{1,2}Яшин А.Ю. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия) 83
НЕЛИНЕЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОТИРИНГОВОЙ МОДЫ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М

- ¹Бахарев Н.Н., ²Бондарчук Э.Н., ⁴Бондарь А.В., ¹Варфоломеев В.И., 84
²Воронова А.А., ¹Гусев В.К., ¹Дьяченко В.В., ²Кавин А.А., ²Кедров И.В.,
²Конин А.Ю., ²Кудрявцева А.М., ¹Курские Г.С., ²Лабусов А.Н., ¹Минаев В.Б.,
²Минеев А.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Петров Ю.В., ²Родин И.Ю., ¹Сахаров Н.В.,
²Танчук В.Н., ²Трофимов В.А., ²Филатов О.Г., ¹Щёголев П.Б. (¹ФТИ им.
А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; ²АО НИИЭФА, г. Санкт-
Петербург, Россия)
СТАТУС КОНЦЕПЦИИ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА СЛЕДУЮЩЕГО
ПОКОЛЕНИЯ ГЛОБУС-3
- Багрянский П.А., Колесников Е.Ю. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 85
ИНЖЕКЦИЯ ВОДОРОДА ИЗ КОАКСИАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО
УСКОРИТЕЛЯ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКУЮ ЛОВУШКУ
- ¹Коньков А.А., ¹Чан К.В., ^{1,5}Кавыршин Д.И., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Федорович С.Д., 86
^{1,2}Карпов А.В., ¹Лукашевский М.В., ^{1,2}Рогозин К.А. (¹НИУ «МЭИ», г. Москва,
Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ³ОИВТ РАН,
г. Москва, Россия)
ИСПЫТАНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛИТИЕВОЙ КАПИЛЛЯРНО-
ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ
В УСТАНОВКЕ ПЛМ
- Кожурин А.А., Хайрутдинов Р.Р., Лукаш В.Э. (НИЦ «Курчатовский 87
институт», г. Москва, Россия)
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА НЕЙТРАЛОВ ВОЛЬФРАМА В
ЛИМИТЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА
- ¹Кривошеев А.Н., ¹Сергеев В.Ю., ²Скоков В.Г., ¹Лашкина Ю.С. (СПбПУ, 88
г. Санкт-Петербург, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва,
Россия)
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ НЕЛОКАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ПРИ
ИНЖЕКЦИИ ПОЛИСТИРОЛОВЫХ МАКРОЧАСТИЦ В ПЛАЗМУ
ГЕЛИОТРОНА LHD
- ^{1,2,3}Кукушкин А.Б., ¹Сдвиженский П.А. (¹НИЦ «Курчатовский институт», 89
г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; ³МФТИ (НИУ),
г. Долгопрудный, Россия)
УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ НОРМИРОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И
ПЛОТНОСТИ В ТОКАМАКАХ: ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТОВ И
ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
- ^{1,2,3}Кукушкин А.Б., ¹Куличенко А.А. (¹НИЦ «Курчатовский институт», 90
г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; ³МФТИ (НИУ),
г. Долгопрудный, Россия)
СПЕКТР КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ
ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ
- ¹Кукушкин К.А., ^{1,2}Яшин А.Ю., ¹Рожанский В.А., ¹Кавеева Е.Г., ²Хромов Н.А., 91
²Киселев Е.О., ¹Долгова К.В., ¹Пономаренко А.М. (¹СПбПУ, г. Санкт-
Петербург, Россия; ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия)
РАДИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2:
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ
- ¹Курские Г.С., ¹Мирошников И.В., ¹Сахаров Н.В., ¹Гусев В.К., ¹Минаев В.Б., 92
¹Петров Ю.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Бахарев Н.Н., ¹Киселев Е.О., ¹Жильцов Н.С.,
¹Щёголев П.Б., ¹Балаченков И.М., ¹Варфоломеев В.И., ¹Воронин А.В.,
¹Горяинов В.Ю., ²Кавин А.А., ¹Крикунов С.В., ¹Мельник А.Д., ²Минеев А.Б.,
¹Новохацкий А.Н., ¹Патров М.И., ³Петров А.В., ³Пономаренко А.М., ¹Скрекель
О.М., ⁴Соловей В.А., ¹Солоха В.В., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Токарев В.А.,
¹Толстяков С.Ю., ¹Тюхменева Е.А., ¹Хромов Н.А., ¹Чернышев Ф.В.,

- ¹Шулятьев К.Д., ^{1,5}Яшин А.Ю. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; ²АО "НИИЭФА им. Д.В. Ефремова", г. Санкт-Петербург, Россия; ³СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁴ПИЯФ им. Б.П. Константинова, НИЦ «Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург, Россия)
- ИЗОТОПНЫЙ ЭФФЕКТ В РЕЖИМЕ С ГОРЯЧИМИ ИОНАМИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2
- ^{1,2}Лисовой П.Д., ^{1,2}Саврухин П.В., ¹Шестаков Е.А., ^{1,2}Тебекин В.И., ¹Храменков А.В. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия) 93
- ДИАГНОСТИКА НАДТЕПЛООВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД
- ^{1,2}Логинов А.А., ¹Шелухин Д.А., ¹Вершков В.А., ^{1,2}Владимиров И.А. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия) 94
- ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ КОРРЕЛЯЦИОННОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА НА ТОКАМАКЕ Т-15МД
- Мещеряков А.И., Гришина И.А. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 95
- РОЛЬ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ В ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССАХ В САМООРГАНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ В ТОРОИДАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ
- ¹Мещеряков А.И., ¹Гришина И.А., ²Касьянова Н.В. (¹ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 96
- 2D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ЦЕНТР ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М В РЕЖИМЕ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА. ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА ASTRA
- ¹Минашин П.В., ^{1,2}Филипенко Д.Р., ^{1,2}Кукушкин А.Б. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 97
- СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МНОГОПРОХОДНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ИНЖЕКТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПЛАЗМОЙ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА В ТОКАМАКАХ
- Мирнов С.В. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, Россия) 98
- СТ (СФЕРИЧЕСКИЕ ТОКАМАКИ), КАК ГЕНЕТИЧЕСКИЙ СБОЙ В СЕМЕЙСТВЕ ТОКАМАКОВ И СТЕЛЛАРАТОРОВ
- Наговицын А.А., Гусаков Е.З., Попов А.Ю. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия) 99
- НИЗКОПороГОВЫЙ ДВУХПЛАЗМОННЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РАСПАД НЕОБЫКНОВЕННОЙ ВОЛНЫ ПРИ МОНОТОННОМ ПРОФИЛЕ ПЛОТНОСТИ
- Неудачин С.В., Борщеговский А.А., Земцов И.А., Немец А.Р., Пименов И.С. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 100
- АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С НАПУСКОМ НЕОНА ПРИ ЭЦРН В ТОКАМАКЕ Т-10 С ВОЛЬФРАМОВЫМ И УГЛЕРОДНЫМ ЛИМИТЕРОМ
- Никишин А.В., Баткин В.И., Иванов И.А., Куклин К.Н., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Сидоров Е.Н. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 101
- ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЛИНЕЙНОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-НВ ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ПУЧКА БЫСТРЫХ АТОМОВ
- 102

- Пименов И.С., Борщеговский А.А., Ахмедов Э.Р., Неудачин С.В., Новиков В.Н., Павлов В.Н., Рой И.Н., Севастьянов С.А., Шапотковский Н.В.
(НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия)
ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ГИРОТРОНА И ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД ПРИ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА
- ^{1,2}Рогозин К.А., ^{1,2}Квасков В.С., ¹Сушков А.В. (¹НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия) 103
МНОГОКАНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ Т-15МД
- ^{1,2}Саранча Г.А., ^{1,3}Дрозд А.С., ^{1,3}Кудашев М.С., ¹Сергеев Д.С. (¹НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 104
КОНЦЕПЦИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТОКА ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД
- ^{1,2}Саврухин П.В., ¹Шестаков Е.А., ^{1,2}Тепикин В.И., ^{1,2}Лисовой П.Д., ¹Храменков А.В., ¹Рой И.Н., ¹Пименов И.С. (¹НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия) 105
АНАЛИЗ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ГИРОТРОНА ТОКАМАКА Т-15МД
- ¹Бондарчук Э.Н., ²Варфоломеев В.И., ¹Кавин А.А., ¹Кудрявцева А.М., ¹Лабусов А.Н., ²Минаев В. Б., ²Петров Ю.В., ¹Родин И.Ю., ²Сахаров Н.В., ¹Филатов О.Г. (¹АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия; ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия;) 106
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ ГЛОБУС-3
- ¹Скопинцев Д.А., ^{1,2}Докука В.Н., ^{1,2}Хайрутдинов Р.Р., ²Андрианова Р.Р., ²Хайрутдинов Э.Н. (¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия; ²НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 107
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ
- ¹Шалашов А.Г., ¹Господчиков Е.Д., ¹Лубяко Л.В., ¹Хусаинов Т.А., ²Солдаткина Е.И., ²Соломахин А.Л. (¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия; ²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 108
ДИАГНОСТИКА БЫСТРЫХ ИОНОВ И ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИМИ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ МЕТОДОМ КОЛЛЕКТИВНОГО ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ ГДЛ
- Щербак А.Н., Мирнов С.В., Лазарев В.Б., Васина Я.А., Лешов Н.В., Антонов П.А., Зорин А.В., Агеев А.В., Джигайло Н.Т., Джурик А.С., Отрощенко В.Г., Петрова Н.П., Пришвицын А.С., Петров Ю.В., Морозов В.А. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия) 109
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЛИТИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-11М ПУТЕМ ПОДАЧИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭМИТТЕР И КОЛЛЕКТОР
- ^{1,2}Шелегеда И.А., ^{1,3}Аммосов Я.М., ^{1,3}Вадимов Н.А., ^{1,4}Виницкий Е.А., ¹Драбинский М.А., ¹Елисеев Л.Г., ^{1,3}Крохалев О.Д., ^{1,3,4}Мельников А.В., ^{1,3}Саранча Г.А., ^{1,3}Харчев Н.К. (¹НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ), г. Москва, Россия; ³МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ⁴НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; ⁵ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 110

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНЫХ
КОРПУСКУЛЯРНЫХ ДИАГНОСТИК ПЛАЗМЫ С УЧЁТОМ
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ПУЧКА ИОНОВ

- ¹Шелухин Д.А., ¹Вершков В.А., ¹Молчанов Д.С., ¹Лукьянов В.В.,
^{1,2}Владимиров И.А., ^{1,2}Логинов А.А. (¹НИИЦ «Курчатовский институт»,
г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия) 111
ОПЕРАЦИОННЫЕ ПРЕДЕЛЫ И СООТНОШЕНИЕ СИГНАЛ-ШУМ
РЕФЛЕКТОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ
ПЛОТНОСТИ СО СТОРОНЫ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ
УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД
- Шестаков Е.А., Саврухин П.В., Лисовой П.Д., Тепикин В.И., Храменков А.В. 112
(НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия)
АНАЛИЗ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА
НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА ТОКАМАКОВ Т-10 И Т-15МД
- ^{1,2}Шмигельский Е.А., ^{1,2}Лизунов А.А., ^{1,2}Солдаткина Е.И., ^{1,2}Приходько В.В.,
^{1,2,3}Соломахин А.Л., ¹Пиңженин Е.И., ¹Мейстер А.К. (¹ИЯФ СО РАН,
г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия; ³ИПФ РАН,
г. Нижний Новгород, Россия) 113
ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ ИОНОВ В
КОНФИГУРАЦИЯХ СО СБЛИЖЕННЫМИ ТОЧКАМИ ОСТАНОВКИ НА
УСТАНОВКЕ ГДЛ
- ^{1,2}Шмигельский Е.А., ^{1,2}Лизунов А.А., ^{1,2}Солдаткина Е.И., ^{1,2}Приходько В.В.,
^{1,2}Котельников И.А. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ,
г. Новосибирск, Россия) 114
ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА В ПЛАЗМЕ УСТАНОВКИ
ГДЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНЫХ ДИАГНОСТИК
- Сидоров Е.Н., Баткин В.И., Иванов И.А., Куклин К.И., Мельников Н.А.,
Никишин А.В., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф.,
Сковородин Д.И. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 115
ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-NV
- ¹Скуратов Е.Н., ¹Полосаткин С.В., ²Мухин Е.Е., ²Толстяков С.Ю.,
²Курский Г.С., ²Соловей В.А., ²Александров С.Е., ²Коваль А.Н.
(¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,
г. Санкт-Петербург, Россия) 116
РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ ДЛЯ
УСТАНОВКИ ГОЛ-NV
- ¹Багрянский П.А., ¹Мейстер А.К., ^{1,2}Солдаткина Е.И. (¹ИЯФ СО РАН,
г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия) 117
ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГОБАЛАНСА В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ
- Смоляков А.И. (Университет Саскачевана, г. Саскатун, Канада) 118
ТЕЧЕНИЯ И УСКОРЕНИЕ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ СОПЛЕ И
ЗЕРКАЛЕ
- ¹Соломахин А.Л., ²Господчиков Е.Д., ¹Лизунов А.А., ²Лубяко Л.В.,
¹Пиңженин Е.И., ²Смолякова О.Б., ²Шалашов А.Г. (¹ИЯФ СО РАН,
г. Новосибирск, Россия; ²ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия) 119
ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НОВОМУ МЕТОДУ ЭЦР
НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА ГДЛ

- ^{1,2}Ступишин Н.В., ¹Абдрашитов А.Г., ¹Ращенко В.В., ¹Белавский А.В., 120
¹Дейчули П.П., ¹Давыденко В.И., ¹Драничников А.Н., ¹Зубарев П.В.,
¹Вахрушев Р.В., ¹Бруль А.В. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
²НГУ, г. Новосибирск, Россия)
 ЗАПУСК ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА ДИНА-КИ60 НА
 ТОКАМАКЕ Т-15МД
- ¹Судников А.В., ¹Инжеваткина А.А., ²Кожевников А.В., ¹Толкачёв М.С., 121
¹Устюжанин В.О., ¹Черноштанов И.С. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск,
 Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия)
 УДЕРЖАНИЕ ПЛАЗМЫ В МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ С
 ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ И ВИНТОВЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
- ^{1,2}Тепикин В.И., ¹Шестаков Е.А., ^{1,2}Саврухин П.В., ^{1,2}Лисовой П.Д., 122
¹Храменков А.В. (¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия;
²НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия)
 СИСТЕМА КОЛЛИМАЦИИ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
 НА ТОКАМАКЕ Т-15МД
- ^{1,2}Тепикин В.И., ^{1,2}Саврухин П.В., ¹Шестаков Е.А., ^{1,2}Лисовой П.Д. (¹НИЦ 123
 "Курчатовский институт", г. Москва, Россия; ²НИУ «МЭИ», г. Москва,
 Россия)
 ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПОДВИЖНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЗОНДЫ НА
 ТОКАМАКЕ Т-15МД
- Теплова Н.В., Трошин Г.А., Гусаков Е.З., Ирзак М.А., Крыжановский А.К., 124
 Новиков Д.С. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия)
 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ В
 ТОКАМАКЕ С ПОМОЩЬЮ ВОЛН ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЧАСТОТНОГО
 ДИАПАЗОНА
- Тимченко Н.Н. (НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия) 125
 АНАЛИЗ УЛУЧШЕНИЯ УДЕРЖАНИЯ ЭНЕРГИИ В ОМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ
 Т-10 ПРИ СНИЖЕНИИ НАПУСКА ГАЗА
- ¹Токарев А.Ю., ^{1,2}Яшин А.Ю., ^{1,2}Жильцов Н.С., ¹Кукушкин К.А., ²Курские Г.С., 126
²Минаев В.Б., ¹Петров А.В., ²Петров Ю.В., ¹Пономаренко А.М., ²Сахаров Н.В.
 (¹СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-
 Петербург, Россия)
 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСИНХРОНИЗОВАННЫХ ПЕРИФЕРИЙНЫХ
 ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОД С ПОМОЩЬЮ МНОГОЧАСТОТНОГО
 ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-
 М2
- ¹Толкачев М.С., ¹Инжеваткина А.А., ¹Судников А.В., ²Устюжанин В.О., 127
¹Черноштанов И.С. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ,
 г. Новосибирск, Россия)
 АНОМАЛЬНОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
 КОЛЕБАНИЯХ В ВИНТОВОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА
- Трошин Г.А., Теплова Н.В., Гусаков Е.З., Крыжановский А.К., 128
 Коновалов А.Н., Дьяченко В.В., Новиков Д., команда ФТ-2, команда Глобус-М2
 (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия)
 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ГЕНЕРАЦИИ
 ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НИЖНЕГИБРИДНЫХ ВОЛН НА
 ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М2 И ФТ-2
- ^{1,2}Устюжанин В.О., ¹Иванов И.А., ¹Инжеваткина А.А., ¹Судников А.В., 129
¹Толкачев М.С. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск,
 Россия)
 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ
 МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ С ГЕЛИКОИДАЛЬНЫМ ПОЛЕМ СМОЛА

- ^{1,2}Вадимов Н.А., ^{1,2}Виницкий Е.А., ¹Елисеев Л.Г., ^{1,3}Харчев Н.К., 130
^{1,2}Мельников А.В., ^{1,4}Саранча Г.А., ¹Драбинский М.А.
 (¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; ³ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ⁴МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия)
 ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЛИННОФОКУСНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ НА МАКЕТЕ ИНЖЕКТОРА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ТОКАМАКА Т-15МД
- ^{1,2}Васильков Д.Г., ¹Борзосекоев В.Д., ¹Скворцова Н.Н., ^{1,3}Харчев Н.К. 131
 (¹ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ²МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия; ³НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия)
 СТРУКТУРА ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ СПОНТАННЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М
- ¹Вершков В.А., ¹Сарычев Д.В., ¹Шелухин Д.А., ¹Немец А.Р., ²Мирнов С.В., 132
³Люблинский И.Е., ³Вертков А.В., ³Жарков М.Ю. (¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия; ²АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", г. Москва, округ Троицк, Россия; ³АО "НИКИЭТ", г. Москва, Россия)
 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИТИЕВЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР В ОМИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ ТОКАМАКА Т-10
- ^{1,2}Зенкова О.А., ^{1,2}Киселев Е.О., ¹Балаченков И.М., ¹Бахарев Н.Н., 133
¹Варфоломеев В.И., ¹Гусев В.К., ¹Жильцов Н.С., ¹Курские Г.С., ¹Минаев В.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Патров М.И., ¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В., ¹Скрекель О.М., ¹Солоха В.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю., ¹Тюхменева Е.А., ¹Хромов Н.А., ¹Щеголев П.Б. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия)
 ИНТЕГРАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МОМЕНТА ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2
- Жильцов Н.С., Курские Г.С., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Киселёв Е.О., 134
 Минаев В.Б., Мирошников И.В., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Солоха В.В., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Щёголев П.Б. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия)
 СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОБАЛАНСА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 В РЕЖИМАХ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА И НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ
- ^{1,2}Зотов И.В., ¹Андреев В.Ф., ¹Балашов А.Ю., ²Дементьев Н.С., ¹Квасков В.С., 135
¹Игонькина Г.Б., ¹Рогозин К.А., ¹Рыжаков Д.В., ¹Соколов М.М., ¹Степин А.В., ¹Сушков А.В., ¹Хайрутдинов Э.Н. (¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия; ²МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия)
 ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ПЛАЗМЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ТОКАМАКА Т-15МД
- ¹Ананьев С.С., ²Савельев Т.А. (¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия; ²МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия) 136
 ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ТОКАМАКА – СИСТЕМ ОТКАЧКИ, ИНЖЕКЦИИ И ОБРАБОТКИ ГАЗА (ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ) НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ

| ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ» | | 139-164 |
|---|--|----------------|
| ¹ Фролов А.Ю., ⁴ Вихрев В.В., ¹ Чирков А.Ю. (¹ МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия; ² НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) | ОБРАЗОВАНИЕ НАДТЕПЛООВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В ПИНЧЕВОМ РАЗРЯДЕ | 139 |
| ¹ Баронова Е.О., ² Ломов А.А. (¹ НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ² ФТИ им. К.А. Валиева РАН, г. Москва, Россия) | ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ВОГНУТОГО МОНОХРОМАТОРА ИЗ СЛЮДЫ, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ | 140 |
| ^{1,2} Бугусов Е.В., ³ Гуськов С.Ю., ^{4,5} Кучугов П.А., ⁵ Яхин Р.А. (¹ НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия; ² ИПМ РАН, г. Москва, Россия; ³ ФИАН, г. Москва, Россия) | ПЕРЕДАЧА ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СЛОИСТУЮ МИШЕНЬ | 141 |
| ¹ Болховитинов Е.А., ¹ Кологривов А.А., ¹ Рупасов А.А., ¹ Пикюз С.А., ¹ Тиликин И.Н., ¹ Шелковенко Т.А., ² Иванов О.П., ² Потапов В.Н. (¹ ФИАН, г. Москва, Россия; ² НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) | ПРИМЕНЕНИЕ КОДИРУЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ВЗРЫВАЮЩИХСЯ ПРОВОЛОЧЕК | 142 |
| Дембовский Д.В., Лыков В.А., Соколов Л.В., Химич Д.В., Шушлебин А.Н. (РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия) | МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЯХ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПО КОМПЛЕКСАМ ТИГР-3Т И ОМЕГА-3Т | 143 |
| ^{1,2} Куриленков Ю.К., ¹ Огинов А.В., ¹ Гуськов С.Ю., ² Самойлов И.С., ¹ Родионов А.А., ¹ Болотов Я.К. (¹ ФИАН, г. Москва, Россия; ² ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) | АНЕЙТРОННЫЙ СИНТЕЗ ПРОТОН - БОР В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЕ ВАКУУМНОГО РАЗРЯДА | 144 |
| Алиев Ю.М., Фролов А.А. (ФИАН, г. Москва, Россия) | ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ МОД ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДВУХЧАСТОТНОГО Р-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ | 145 |
| ¹ Бай А.А., ¹ Гасилов В.А., ⁴ Гуськов С.Ю., ² Яхин Р. А. (¹ ИПМ РАН, г. Москва, Россия; ² ФИАН, г. Москва, Россия) | МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ МИШЕНЕЙ С МАЛОПЛОТНЫМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ ПРИ ДВУХПУЧКОВОМ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ | 146 |
| ¹ Гожев Д.А., ^{1,2} Бочкарев С.Г., ^{1,2} Лобок М.Г., ^{1,2} Брантов А.В., ^{1,2} Быченков В.Ю. (¹ ФИАН, г. Москва, Россия; ² ВНИИА им.Н. Л. Духова, г. Москва, Россия) | ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ИОНОВ ИЗ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ СТРУКТУРИРОВАННОЙ СРЕДЫ | 147 |
| ¹ Грицук А.Н., ¹ Александров В.В., ¹ Браницкий А.В., ¹ Грабовский Е.В., ¹ Митрофанов К.Н., ¹ Олейник Г.М., ¹ Фролов И.Н., ² Баско М.М., ¹ Рыжаков В.В. (¹ АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия; ² ИПМ РАН, г. Москва, Россия) | ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ, СОЗДАННОЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧА | 148 |

- Громов А.И., Акунец А.А., Борисенко Н.Г., Кувшинов И.Р., Пастухов А.В., 149
Перваков К.С. (*ФИАН, г. Москва, Россия*)
АНАЛИЗ ВОПРОСОВ, СВЯЗАННЫХ С МАЛОПЛОТНЫМИ СЛОЯМИ ИЗ
НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛА, В ТОМ ЧИСЛЕ С ХИТОЗАНОМ, ДЛЯ
МИШЕНЕЙ ИТС
- Лебо И.Г., Федянин А.О. (*РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия*) 150
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО СЖАТИЯ СФЕРИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧЕК В ПРОБЛЕМЕ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА
- ¹Вергунова Г.А., ¹Гуськов С.Ю., ¹Кологривов А.А., ¹Пузырёв В.Н., ¹Саакян А.Т., 151
¹Стародуб А.Н., ¹Безверхняя Д.М., ²Вичев И.Ю., ²Грушин А.С., ²Ким Д.А.,
²Соломянная А.Д. (¹*ФИАН, г. Москва, Россия*; ²*ИПМ РАН, г. Москва, Россия*)
ИССЛЕДОВАНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И ЭКСТРЕМАЛЬНОГО
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ СПЛОШНЫХ
МИШЕНЕЙ ИЗ МЕДИ НА УСТАНОВКЕ «КАНАЛ-2»
- Корешева Е.Р., Александрова И.В., Агапов М.Н., Акунец А.А. (*ФИАН,* 152
г. Москва, Россия)
ОБ УСКОРЕНИИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО НОСИТЕЛЯ КРИОГЕННОЙ
ТОПЛИВНОЙ МИШЕНИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ СОЛЕНОИДОВ С
ТОКОМ
- ¹Гуськов С.Ю., ¹Демченко Н.Н., ^{1,2}Кучугов П.А. (¹*ФИАН, г. Москва, Россия*; 153
²*ИПМ РАН, г. Москва, Россия*)
РЕФРАКЦИОННОЕ КАНАЛИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ИОНИЗАЦИИ,
ОБРАЗОВАННОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА С
ПЛАЗМОЙ ДОКРИТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ
- Митрофанов К.Н., Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., 154
Грицук А.Н., Олейник Г.М., Рыжаков В.В. (*АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,*
г. Москва, округ Троицк, Россия)
ИМПЛОЗИЯ ВЛОЖЕННЫХ СБОРОК СМЕШАННОГО СОСТАВА НА
УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1
- Мозговой А., Болотов Я., Ерискин А., Никулин В., Огинов А., Шпаков К., 155
Тиликин И., Родионов А. (*ФИАН, г. Москва, Россия*)
БУДУЩИЙ УСПЕХ В УТС - ЗА КОЛЛАЙДЕРАМИ КОМПАКТНЫХ ТОРОВ
(FRC) (ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПАНИЙ)
- Пикуз С.А., Савинов С.Ю., Тиликин И.Н., Шелковенко Т.А. (*ФИАН, г. Москва,* 156
Россия)
Х-ПИНЧ КАК ИСТОЧНИК ПРОСТРАНСТВЕННО-КОГЕРЕНТНОГО
МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
- Лебо И.Г., Пономарев И.В. (*РТУ МИРЭА, г. Москва, Россия*) 157
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В
ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ
- Романова В.М. (*ФИАН, г. Москва, Россия*) 158
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ ТОНКИХ ПРОВОДНИКОВ (СМЕНА
ПАРАДИГМЫ)
- Шелковенко Т.А., Тиликин И.Н., Мингалеев А.Р., Романова В.М., Пикуз С.А. 159
(*ФИАН, г. Москва, Россия*)
ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ Х-ПИНЧЕЙ НА МАЛОГАБАРИТНЫХ
КОНДЕНСАТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

- ¹Сивко А.И., ^{1,2}Иванов К.А., ²Кологривов А.А., ^{1,3}Цымбалов И.Н.,
²Болховитинов Е.А., ²Рупасов А.А., ¹Волков Р.В., ^{1,2}Савельев-Трофимов А.Б.
(¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия);
²ФИАН, г. Москва, Россия; ³ИЯИ РАН, г. Москва, Россия)
**ШИРОКОДИАПАЗОННАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ**
- Скобляков А.В., Колесников Д.С., Канцырев А.В., Голубев А.А. 161
(НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия)
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ СПЕКТРОГРАФОВ ДЛЯ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ
ПЛАЗМЫ**
- ¹Фролов А.Ю., ²Вихрев В.В., ¹Чирков А.Ю. (¹МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 162
ОБРАЗОВАНИЕ НАДТЕПЛООВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В Z-ПИНЧАХ
- Гуськов С.Ю., Яхин Р.А. (ФИАН, г. Москва, Россия) 163
**УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЧАСТИЧНО-ГОМОГЕНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ
МАЛОПЛОТНОГО ПОРИСТОГО ВЕЩЕСТВА**
- Зворыкин В.Д., Велиев П.В., Козин И.А., Паркевич Е.В., Смазнова Х.Т.,
Устиновский Н.Н., Шутов А.В. (ФИАН, г. Москва, Россия) 164
**УДАРНАЯ ТРУБА С KRF ЛАЗЕРНЫМ ДРАЙВЕРОМ:
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**
- ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ» 167-204**
- Абрамов И.С., Голубев С.В., Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г. (ИПФ РАН,
г. Нижний Новгород, Россия) 167
**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ГАЗА ЗА СЧЕТ
ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ**
- Апфельбаум Е.М. (ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 168
**РАСЧЁТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПЛАЗМЫ ИНДИЯ**
- ¹Батукаев Т.С., ¹Билера И.В., ^{1,2}Крашевская Г.В., ¹Лебедев Ю.А. (¹ИНХС РАН,
г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 169
**ВЛИЯНИЕ БАРБОТАЖА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОМ УГЛЕВОДОРОДЕ**
- Богданов С.А., Вихарев А.Л., Горбачёв А.М., Радищев Д.Б., Лобаев М.А. 170
(ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия)
**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРАКЦИИ СВЧ РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО В
ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ В ВОДОРОД-МЕТАНОВОЙ ГАЗОВОЙ
СМЕСИ**
- ¹Дудник Ю.Д., ¹Кузнецов В.Е., ¹Сафронов А.А., ¹Ширяев В.Н., ¹Васильева О.Б.,
^{1,2}Субботин Д.И., ^{1,2}Гаврилова Д.А., ^{1,2}Гаврилова М.А. (¹ИЭЭ РАН, г. Санкт-
Петербург, Россия; ²СПбГТУ, г. Санкт-Петербург, Россия) 171
**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ МЕТАНА В
ЭЛЕКТРОДУГОВОМ ПЛАЗМОТРОНЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**
- Билера И.В., Лебедев Ю.А., Титов А.Ю., Эпштейн И.Л. (ИНХС РАН, г. Москва,
Россия) 172
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ АЦЕТИЛЕНА И ВОДОРОДА ПРИ
ПЛАЗМОСТРУЙНОМ ПИРОЛИЗЕ МЕТАНА**

- Файрушин И.И., Мокшин А.В. (*КФУ, г. Казань, Россия*) 173
КОЛЛЕКТИВНАЯ ДИНАМИКА ИОНОВ СИЛЬНО НЕИДЕАЛЬНОЙ
ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ. САМОСОГЛАСОВАННАЯ
РЕЛАКСАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ
- ^{1,2}Глинский В.В., ^{1,2}Тимофеев И.В. (¹*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия;* ²*НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 174
1D ГИРОКИНЕТИЧЕСКИЙ КОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ
ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА В ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ
- Господчиков Е.Д., Абрамов И.С., Голубев С.В., Шалашов А.Г. (*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*) 175
О СТРУКТУРЕ ФРОНТА РАЗРЯДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ,
РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ЗА СЧЕТ ФОТОИОНИЗАЦИИ СОБСТВЕННЫМ
ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ
- Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Новиков Л.А., Яницын Д.В., Гасилов М.А.,
Голубев М.С., Павлов С.И. (*СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 176
ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В
СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ В РАЗЛИЧНЫХ ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ
- ^{1,3,5}Казаков Е.Д., ¹Орлов М.Ю., ²Садовничий Д.Н., ^{1,5}Смирнова А.Р.,
¹Стрижаков М.Г., ^{1,4}Сунчугашев К.А., ²Шереметьев К.Ю. (¹*НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия;* ²*ФЦДТ «Союз», г. Дзержинский, Московская область, Россия;* ³*НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия;* ⁴*РУДН, г. Москва, Россия;* ⁵*МФТИ, г. Долгопрудный, Московская область, Россия*) 177
ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО НА
ОСОБЕННОСТИ АБЛЯЦИИ СИНТАКТНЫХ ПЕН ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ПОТОКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С НАНОСЕКУНДНЫМ
ФРОНТОМ ИМПУЛЬСА
- ^{1,2}Маслаков И.Д., ¹Кузьмин Е.И., ¹Чесноков А.В., ^{1,2}Шиховцев И.В. (¹*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия;* ²*НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 178
ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЫ ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА В
КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ
- ^{1,2}Лосева Т.В., ^{1,2}Урвачев Е.М., ^{1,2}Гончаров Е.С., ^{1,2}Ляхов А.Н., ¹Зецер Ю.И. (¹*ИДГ РАН, г. Москва, Россия;* ²*ЦФПИ ВНИИА им. Н. Л. Духова, г. Москва, Россия*) 179
ДИНАМИКА ИСКУССТВЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В
ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ
- Мартынова И.А., Иосилевский И.Л. (*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*) 180
ДАВЛЕНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЫ В
ПРИБЛИЖЕНИИ СРЕДНЕЙ ЯЧЕЙКИ ВИГНЕРА-ЗЕЙТЦА С УЧЕТОМ
ЭФФЕКТА НЕЛИНЕЙНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ
- Нагель Н.Н., Лисица В.С., Шуровский Д.О., Брагин Е.Ю. (*НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия*) 181
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЛИНИЙ
ГЕЛИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕЛИКОННОЙ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ
- Новиков Л.А., Дзлиева Е.С., Голубев М.С., Морозова М.Б., Павлов С.И.,
Карасев В.Ю. (*СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 182
ОТБОР ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ВЧИ-РАЗРЯДЕ
- Паркевич Е.В., Хирьянова А.И. (*ФИАН, г. Москва, Россия*) 183
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
БЫСТРОЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩИХ ПЛАЗМЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР

- Павлов С.И., Дзлиева Е.С., Голубев М.С., Морозова М.Б., Новиков Л.А., Гасилов М.А., Карасев В.Ю. (СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия) 184
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В РАЗЛИЧНЫХ ФАЗАХ СТОЯЧИХ СТРАТ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ
- Шемахин А.Ю. (КФУ, г. Казань, Россия) 185
СКВОЗНАЯ МОДЕЛЬ СТРУЙНОГО ВЧИ-РАЗРЯДА Пониженного ДАВЛЕНИЯ
- Шпатаковская Г.В. (ИПМ РАН, г. Москва, Россия) 186
ЗАВИСИМОСТЬ ОТ АТОМНОГО НОМЕРА Z УСЛОВИЙ ПРИМЕНИМОСТИ КВАЗИКЛАССИЧЕСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ И ИОНОВ
- Шуровский Д.О., Кутузов Д.С., Нагель Н.Н., Москаленко И.В. (НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 187
ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕЛИКОННОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДАМИ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
- Смирнова К.В., Батукаев Т.С., Лебедев Ю.А. (ИНХС РАН, г. Москва, Россия) 188
СИНТЕЗ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕДИ И ЦИНКА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ
- ^{1,2,3}Смирнова А.Р., ³Бойков Д.С., ^{1,2}Казаков Е.Д., ³Ольховская О.Г., ^{1,2,3}Ткаченко С.И. (¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ²НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ³ИПМ РАН, г. Москва, Россия) 189
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ПОЛИМЕРНЫХ МИШЕНЯХ, С УЧЁТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАТОДНОЙ И АНОДНОЙ ПЛАЗМ В ДИОДНОМ ЗАЗОРЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ «КАЛЬМАР»
- Степанов Н.О., Черкез Д.И., Спицын А.В. (НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 190
УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
- Бунин Е.А., Ишков Т.А., Казеев М.Н., Камин Д.В., Козлов В.Ф., Сухов А.Е. (НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 191
ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ НАГРЕВ АРГОН-ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА СТЕНДЕ ПН-3
- Бунин Е.А., Ишков Т.А., Камин Д.В., Сухов А.Е., Жильцов В.А., Коробцев С.В. (НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 192
РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕЛИКОННОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ И СИСТЕМЫ НАГРЕВА ИОНОВ В СОСТАВЕ МАКЕТА МОЩНОГО БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА СТЕНДЕ Е-1
- Тарасенко В.Ф., Виноградов Н.П., Бакшт Е.Х., Панченко А.Н. (ИСЭ СО РАН, г. Томск, Россия) 193
СТОЛКНОВЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ДИФФУЗНЫХ СТРУЙ И СТРИМЕРОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ И АЗОТЕ
- Лебедев Ю.А., Татаринцев А.В., Эпштейн И.Л., Титов А.Ю. (ИНХС РАН, г. Москва, Россия) 194
КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДЕ МЕТАНА В ВОДЕ С УЧЕТОМ РОСТА ПЛАЗМЕННОГО ПУЗЫРЯ

- ¹Усачёнок М.С., ¹Симончик Л.В., ²Богачев Н.Н., ²Андреев С.Е. (¹ИФ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь; ²ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 195
 ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРЯДОВ ПОНИЖЕННОГО И АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ТЕЛА ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННЫ
- Логвиненко В.П., Вафин И.Ю., Воронова Е.В., Нугаев И.Р., Борзосексов В.Д., Соколов А.С., Летунов А.А., Князев А.В., Степахин В.Д. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 196
 ГАЗОКИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПЛАЗМЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА В ПОРОШКАХ СМЕСИ TiO₂ + Cu
- Волков Л.С., Фирсов А.А. (ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 197
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СМЕШЕНИЯ ПОТОКА ВОЗДУХА С ДОЗВУКОВОЙ И СВЕРХЗВУКОВОЙ ВТОРИЧНОЙ СТРУЕЙ
- Воробьёв М.С., Коваль Н.Н., Шин В.И., Москвин П.В., Девятков В.Н., Мокеев М.А. (ИСЭ СО РАН, г. Томск, Россия) 198
 СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОКА ПУЧКА В ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ И УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ НА ОСНОВЕ ДУГИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ
- Есиналин А.А., Желтухин В.С., Лучкин А.Г., Савин А.Ю. (К(П)ФУ, г. Казань, Россия) 199
 РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В РАЗРЯДЕ МАГНЕТРОННОГО ТИПА
- Желтухин В.С., Каюмов Р.Р., Гашигуллин К.А., Гайсин А.Ф. (КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия) 200
 ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЧ РАЗРЯДА С ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ
- Жуков В.И., Карфидов Д.М., Богданкевич И.Л., Андреев С.Е. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 201
 ПРОЦЕСС ИОНИЗАЦИИ В СВЧ-РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ПОДДЕРЖИВАЕМОМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ
- Кирий Н.П., Харлачев Д.Е. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 202
 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИОНОВ АРГОНА И КРИПТОНА ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ТОКОВОГО СЛОЯ
- ¹Франк А.Г., ²Савинов С.А. (¹ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ²ФИАН, г. Москва, Россия) 203
 ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СИММЕТРИИ ТОКОВЫХ СЛОЁВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ В НИХ ТОКОВ ХОЛЛА И ТОКОВ ОБРАТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ
- Федорова И.А., Юров В.Ю., Большаков А.П., Пивоваров П.А., Мартьянов А.К., Федотов П.В., Ральченко В.Г. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 204
 ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СВЧ ПЛАЗМЫ В СМЕСЯХ H₂-CH₄-GEN₄ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ АЛМАЗА ГЕРМАНИЕМ

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ»** **207-248**

- ^{1,2}Абрамов И.А., ³Господчиков Е.Д. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 207
ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЦР-НАГРЕВА В БЕЗЭЛЕКТРОДНОМ ПЛАЗМЕННОМ РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ
- ^{1,2}Рогозин К. А., ^{1,2}Анисимов Д.А., ¹Чан К.В., ^{1,2}Чилин М.С., ¹Коньков А.А., ^{1,2}Губанова А.И., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Федорович С.Д., ^{1,3}Кавыршин Д.И. (НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ³ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 208
ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ЗОНДОВЫМ МЕТОДОМ В УСЛОВИЯХ ВЧ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ГЕЛИКОНОВОЙ АНТЕННОЙ НА УСТАНОВКЕ ПЛМ-М
- ^{1,2}Аржанников А.В., ^{1,2}Синицкий С.Л., ¹Самцов Д.А., ^{1,2}Калинин П.В., ^{1,2}Попов С.С., ¹Атлуханов М.Г., ^{1,2}Сандалов Е.С., ^{1,2}Степанов В.Д., ¹Куклин К.Н., ¹Макаров М.А. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия) 209
ДИНАМИКА ПОТОКА ТГЦ ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРРЕЛЯЦИИ С ЭВОЛЮЦИЕЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ РЭП С ПЛАЗМОЙ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-ПЭТ
- ¹Степанов И.Г., ¹Бычков В.Л., ²Сороковых Д.Е., ²Бычков Д.В. (ФИЦ ХФ РАН, г. Москва, Россия; ²МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия) 210
СОЗДАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В КАПИЛЛЯРНОМ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ 211
- ¹Степанов И.Г., ¹Бычков В.Л., ²Андреев Г.И., ²Нечаев К.А., ²Кралькина Е.А. (ФИЦ ХФ РАН, г. Москва, Россия; ²МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия) 212
МОДЕЛЬ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В АЦЕТИЛЕНЕ
- Дмитриев Е.О., Бухарский Н.Д., Корнеев Ф.А. (ФИАН, г. Москва, Россия) 213
О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ МОЩНЫХ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ЗАМКНУТОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ВОЗБУЖДЕНИЯ С ИХ ПОМОЩЬЮ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
- Емелев И.С. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 214
СТАТУС РАБОТ ПО ПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНИ ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПУЧКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ
- ¹Федорович С.Д., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Дедов А.В., ¹Кавыршин Д.И., ^{1,2}Карпов А.В., ¹Чан К.В., ¹Лукашевский М.В., ¹Губкин М.К., ^{1,2}Рогозин К.А. (НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 215
ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ПЛМ-М ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ГИБРИДНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА
- Дудин В.С., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Задириев И.И., Никонов А.М., Швыдкий Г.В. (МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия) 216
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ, РАБОТАЮЩЕГО НА ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

- Филимонова Е.А., Добровольская А.С., Битюрин В.А., Бочаров А.Н. (*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*) 217
ОПТИМАЛЬНЫЙ СПОСОБ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ НАНОСЕКУНДНЫМ РАЗРЯДОМ НА ЭНЕРГОЕМКИЕ ПРОЦЕССЫ
- Глинов А.П., Головин А.П. (*НИИ механики МГУ, г. Москва, Россия*) 218
ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЁННЫХ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ
- Иванов И.Е., Диас Михайлова Д.Е., Стрелков П.С., Стрелков В.В. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 219
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ СПЕКТРОВ ТЯЖЁЛЫХ МОЛЕКУЛ ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С СВЧ ПОЛЕМ НА ЧАСТОТАХ 2 - 4 ГГц
- ¹Корнев К.Н., ^{1,2}Двинин С.А., ¹Логунов А.А., ¹Сурконт О.С., ¹Абушаев Т.Р., ¹Вольнец А.Л. (¹МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия, ²РУДН, г. Москва, Россия) 220
ИНИЦИИРУЕМЫЙ ПОЛУВОЛНОВОЙ АНТЕННОЙ СВЧ-РАЗРЯД В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ
- ¹Коробко Д.Д., ¹Черноизюмская Т.В., ¹Сергеев В.Ю., ¹Шаров И.А., ¹Капралов В.Г., ¹Карасев П.А., ²Буторин П.С., ²Калмыков С.Г., ²Сасин М.Э. (¹СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия) 221
ГЕНЕРАТОР МИШЕНЕЙ ИЗ ТВЕРДОГО КСЕНОНА ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА EUV ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАНОЛИТОГРАФИИ
- Летунов А.А., Логвиненко В.П., Князев А.В., Воронова Е.В., Борзосекон В.Д. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 222
САМООБРАЩЕННЫЕ ЛИНИИ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ АТОМОВ В РАЗРЯДАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ ИМПУЛЬСАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО ГИРОТРОНА
- Мисников В.Е., Обрезков О.И., Шутьев О.Л. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 223
ОСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ И ШТАМПОВУЮ ОСНАСТКУ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАШИН, НА УСТАНОВКЕ "КРЕМЕНЬ-2"
- Мурсенкова И.В., Сазонов А.С. (*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия*) 224
ТОКОВЫЕ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОСЕКУНДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ВОЗДУХА В КАНАЛЕ
- Обрезков О.И., Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю., Шутьев О.Л., Шевчук С.Л., Мисников В.Е., Рукина Ю.И., Кочетов С.Н. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 225
ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНОК, ОСАЖДАЕМЫХ ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ
- Паркевич Е.В., Хирьянова А.И., Хирьянов Т.Ф., Байдин И.С., Шпаков К.В., Родионов А.А., Болотов Я.К., Рябов В.А., Огинов А.В. (*ФИАН, г. Москва, Россия*) 226
ИСТОЧНИКИ И МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДЛИННОМ ВЫСОКОВОЛЬТНОМ РАЗРЯДЕ

- ¹Пискарев И.М., ²Аристова Н.А., ³Иванова И.П. (¹НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына, МГУ, г. Москва, Россия; ²УрФУ, Нижнетагильский технологический институт, г. Нижний Тагил, Россия; ³ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия) 227
СРАВНЕНИЕ СТЕПЕНИ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ БЕЛКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ СО СПОРИЦИДНЫМ И ФУНГИЦИДНЫМ ЭФФЕКТОМ
- Попов Н.А. (НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына, МГУ, г. Москва, Россия) 228
КОНТРАКЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ РАЗРЯДОВ В АЗОТЕ И ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ
- Обрезков О.И., Ручкина Ю.И., Шевчук С.Л., Мартыненко Ю.В., Мисников В.Е., Шутьев О.Л., Ильинский Д.И. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 229
УСТАНОВКА "МИКРОМЕД" ОСАЖДЕНИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ БИОСОВМЕСТИМЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЭНДОКАРДИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ
- 230
- ¹Аржанников А.В., ¹Самцов Д.А., ¹Синицкий С.Л., ¹Старостенко Д.А., ²Григорьев А.Н., ²Воробьев С.О., ²Протас Р.В., ²Мастюк Д.А. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия) 231
ПРОТЯЖЕННЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ШНУР В УСТАНОВКЕ ЛИУ-ПЭТ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НАПРАВЛЕННОГО ПОТОКА ТГЦ ИЗЛУЧЕНИЯ
- Савельев А.Б., Горлова Д.А., Иванов К.А., Цымбалов И.Н. (МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия) 232
КОМПАКТНЫЙ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЗАДАЧ ЯДЕРНОЙ ФОТОНИКИ
- ^{1,2}Савватимский А.И., ²Онуфриев С.В. (¹ФИАН, г. Москва, Россия; ²ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 233
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ "ВЗРЫВНОЙ" МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ 2000 – 10000 К
- ^{1,2}Савватимский А.И., ²Онуфриев С.В. (¹ФИАН, г. Москва, Россия; ²ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 234
ЖИДКИЙ УГЛЕРОД ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ
- ¹Степанов И.Г., ¹Бычков В.Л., ¹Голубков Г.В., ²Бычков Д.В., ¹Голубков М.Г., ²Ваулин Д.Н. (¹ФИЦ ХФ РАН, г. Москва, Россия; ²МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия) 235
ФОРМИРОВАНИЕ ИОНОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ
- Карташева А.А., Гүторов К.М., Подковыров В.Л., Муравьева Е.А., Лукьянов К.С., Климов Н.С. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия) 236
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ

- ¹Чан К.В., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Федорович С.Д., ^{1,2}Карпов А.В., ^{1,3}Кавыршин Д.И., 237
¹Лукашевский М.В., ¹Губкин М.К., ¹Перегудов Д.В., ¹Рогозин К.А.,
¹Коньков А.А., ¹Анисимов Д.А., ¹Чилин М.С. (¹НИУ «МЭИ», г. Москва,
Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ³ОИВТ РАН,
г. Москва, Россия)
НАГРЕВ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ГЕЛИКОНОВОЙ АНТЕННЫ В
УСТАНОВКЕ ПЛМ-М
- Варшавчик Л.А., Бочарников В.А., Старовойтов Е.А., Галицын Д.Д., 238
Никитенко С.А., Мухин Е.Е. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН РАН, г. Санкт-
Петербург, Россия)
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕМКОСТНОГО ВЧ-РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ
В СЛОЖНЫХ ГЕОМЕТРИЯХ: ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ
- Гребенщикова М.М., Желтухин В.С. (КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия) 239
НАНЕСЕНИЕ БАКТЕРИЦИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕДИЦИНСКИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ С ПОМОЩЬЮ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ
- Змиевская Г.И. (ИПМ РАН, г. Москва, Россия) 240
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ
НАНОПОРИСТОСТИ
- Иванов В.А., Кобышев М.Е., Камолова Т.И., Дорофеев А.А., Сатунин С.Н. 241
(ИОФ РАН, г. Москва, Россия)
ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ПЛЕНКЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА В ПЛАЗМЕ
- ¹Артемьев К.В., ^{1,2}Гудкова В.В., ¹Давыдов А.М. (¹ИОФ РАН, г. Москва,
Россия; ²РУДН, г. Москва, Россия) 242
ГЕНЕРАЦИЯ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КИСЛОРОДА И АЗОТА В
ЖИДКОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МИКРОВОЛНОВЫМ
ИМПУЛЬСНЫМ КАПИЛЛЯРНЫМ РАЗРЯДОМ
- ^{1,2}Гудкова В.В., ¹Бурмистров Д.Е., ¹Конькова А.С., ¹Полякова В.А., 243
^{1,2}Хатуева М.Д., ^{1,2}Зимица М.А., ¹Колик Л.В., ¹Гусейн-заде Н.Г.,
¹Кончечков Е.М. (¹ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ²РУДН, г. Москва, Россия)
МОДУЛЬНЫЙ МАСШТАБИРУЕМЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ
ДЕКОНТАМИНАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ
- ¹Моряков И.В., ^{1,2}Гудкова В.В., ^{1,2}Резаева А.Д., ¹Анпилов А.М., ¹Давыдов А.М., 244
¹Заклецкий З.А., ¹Тактакишвили И.М., ^{1,2}Борзосекоев В.Д., ¹Кончечков Е.М.,
¹Гусейн-заде Н.Г. (¹ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ²РУДН, г. Москва,
Россия)
ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ В
МНОГОИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ С ИНЖЕКЦИЕЙ ГАЗА В
МЕЖЭЛЕКТРОДНОЕ ПРОСТРАНСТВО
- Рогожин В.И., Донец А.Е., Бахтин В.П., Булейко А.Б., Быков А.Г., 245
Лоза О.Т., Раваев А.А. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк,
Россия)
ВЛИЯНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОДНОРОДНОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ
ПЛАЗМЫ НА СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО МАЗЕРА
- Донец А.Е., Рогожин В.И., Бахтин В.П., Булейко А.Б., Быков А.Г., Лоза О.Т., 246
Раваев А.А. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия)
ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ПЛАЗМЕННЫЙ МАЗЕР С
ДВОЙНЫМ КОАКСИАЛЬНЫМ ПЛАЗМЕННО-МЕТАЛЛИЧЕСКИМ
ВОЛНОВОДОМ

- ^{1,2}Зими́на М.А., ^{1,2}Гудкова В.В., ¹Артемьев К.В., ¹Давыдов А.М., 247
¹Полякова В.А., ¹Моряков И.В., ^{1,2}Борзосеков В.Д., ¹Анпилов А.М.,
¹Кончеков Е.М. (*¹ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ²РУДН, г. Москва, Россия*)
 ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И
 АЗОТА В ЖИДКОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МНОГОИСКРОВЫМ
 РАЗРЯДОМ С ИНЖЕКЦИЕЙ ГАЗА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАТЕРИАЛА
 ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ
- Брагин Е.Ю., Бобырь Н.П., Гусев С.С., Егорова Е.Н., Жильцов В.А., 248
 Камин Д.В., Леженникова Д.А., Коробцев С.В., Костриченко И.А.,
 Спицын А.В. (*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*)
 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЗДАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА
 ГЕЛИКОНЫМ ИСТОЧНИКОМ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО
 ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ
- ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ**
«ПРОЕКТ ИТЭР: ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО» 251-286
- ¹Алексеев Д.И., ¹Манзук М.В., ¹Латманизова Ю.Н., ²Микляев С.М., 251
¹Семенов А.И., Солёный А.А., ¹Рошаль А.Г. (*¹АО «НИИЭФА им.
 Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия; ²ЧУ ГК Росатом
 «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*)
 ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ, РАЗРАБОТАННЫХ В РАМКАХ
 ПРОЕКТА ИТЭР, ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСТАНОВКИ ТРТ НА ПРИМЕРЕ
 СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЭМС
- Бочарников В.А., Варшавчик Л.А., Старовойтов Е.А., Галицын Д.Д., 252
 Никитенко С.А., Мухин Е.Е. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург,
 Россия*)
 СРАВНИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ПРИМЕСНЫХ
 ЧАСТИЦ БЕРИЛЛИЯ И БОРА В ДИАГНОСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ДТР
- ^{1,2,3}Черепанов Д.Е., ^{1,4}Бурдаков А.В., ¹Вячеславов Л.Н., ¹Кандауров И.В., 253
^{1,2}Касатов А.А., ^{1,2}Попов В.А., ¹Рыжков Г.А., ^{1,2,4}Шошин А.А. (*¹ИЯФ СО РАН,
 г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия; ³ИХТТМ СО РАН,
 г. Новосибирск, Россия; ⁴НГТУ, г. Новосибирск, Россия*)
 ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИК ИМПУЛЬСНОЙ
 ТЕПЛОЙ НАГРУЗКОЙ, ВОЗМОЖНОЙ В ДИВЕРТОРНОЙ ЗОНЕ
 ТОКАМАКА ИТЭР
- ¹Фридрихсен Д.С., ¹Кормилицын Т.М., ¹Панкратенко А.В., 254
¹Обудовский С.Ю., ¹Кашук Ю.А. (*¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»,
 г. Москва, Россия*)
 ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА
 D-D ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ *IN-SITU* КАЛИБРОВКИ НЕЙТРОННОЙ
 ДИАГНОСТИКИ ИТЭР
- Гаврисенко Д.Ю., Шиховцев И.В., Бельченко Ю.И., Горбовский А.И., Кондаков 255
 А.А., Сотников О.З., Воинцев В.А., Финашин Р.А., Санин А.Л. (*ИЯФ СО РАН,
 г. Новосибирск, Россия*)
 РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДРАЙВЕРА ДЛЯ
 НАГРЕВНЫХ АТОМАРНЫХ ИНЖЕКТОРОВ С МНОГОСЕКУНДНОЙ
 ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ РАБОТЫ

- ¹Иванцовский М.В., ^{1,2}Бурдаков А.В., ¹Гавриленко Д.Е., ^{1,3}Грищенко А.М., 256
¹Константинов В.М., ²Кравцов Д.Э., ⁵Лобачев А.М., ⁵Логинов И.Н.,
⁵Модестов В.С., ¹Рыжанков И.С., ¹Селезнев П.А., ¹Серемин В.В.,
^{1,4}Соломатин Б.Н., ²Сорокина Н.В., ^{1,4}Суляев Ю.С., ¹Таскаев А.С.,
¹Шабунин Е.В., ¹Шарафеева С.Р., ¹Шиянков С.В., ^{1,3,4}Шошин А.А.
(¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ³НГТУ, г. Новосибирск, Россия; ⁴НГУ, г. Новосибирск, Россия; ⁵СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия)
ПОДГОТОВКА К ПРОИЗВОДСТВУ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР В ИЯФ СО РАН
- Кичик М.Г., Длугач Е.Д. (НИИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия) 257
ВЕРИФИКАЦИЯ КОДА ВТН ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
СИСТЕМ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ
- Коновалов Г.М. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 258
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К РАМІ-АНАЛИЗУ ДЛЯ ДИАГНОСТИК
ИТЭР
- ¹Козерук А.А., ^{1,2}Кормилицын Т.М., ²Обудовский С.Ю., 259
^{1,2}Кащук Ю.А., ²Воробьев В.А. (¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия;
²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ИКД ДМНП ИТЭР
- ¹Козлов С.А., ¹Вербицкая К.С., ¹Паршутин Е.В., ¹Толкачев Д.В., 260
¹Поддубный И.И., ¹Свириденко М.Н., ²Путрик А.Б. (¹АО «НИКИЭТ», г. Москва, Россия; ²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
ОБОСНОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
СОЕДИНИТЕЛЯ БЛАНКЕТА ИТЭР
- ¹Латманнизова Ю.Н., ¹Алексеев Д.И., ¹Манзук М.В., ²Микляев С.М., ¹Семенов А.И., 261
¹Соленый А.А., ¹Гороховский Д.В., ¹Карпишин М.В., ¹Танаев А.В.
(¹АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия;
²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
КОНЦЕПЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОММУТАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА
СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЭМС ТРТ
- Афанасьев В.П., Лобанова Л.Г., Будаев В.П., Семенов-Шефов М.А., Федорович С.Д. (НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия) 262
IN SITU ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ БОР
И ДРУГИЕ «ЛЕГКИЕ» ВКЛЮЧЕНИЯ, НА МИКРОННЫХ ГЛУБИНАХ НА
ОСНОВЕ «СПЕКТРОСКОПИИ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ»
- Афанасьев В.П., Лобанова Л.Г., Будаев В.П., Федорович С.Д., Семенов-Шефов М.А. (НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия) 263
ИЗМЕНЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В УГЛЕРОДЕ И
ВОЛЬФРАМЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ
ПОВЕРХНОСТИ
- ¹Афанасьев В.П., ¹Лобанова Л.Г., ¹Будаев В.П., ²Синельников Д.Н., 264
²Ефимов Н.Е. (¹НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия)
ОТРАЖЕНИЕ ЛЕГКИХ ИОНОВ ОТ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ, В ТОМ ЧИСЛЕ, БОР И УГЛЕРОД. ТЕОРИЯ И
ЭКСПЕРИМЕНТ
- Миронова Е.Ю., Портоне С.С., Нагорный Н.В., Миронов А.Ю., Семёнов И.Б., Семёнов О.И. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 265
ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТРТ

- Монтак Н.В., Васильев В.А., Киселев Д.А., Пискарев П.Ю., Колесник М.С. 266
(АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия)
РАЗБОРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР
- ^{1,2}Муравьева Е.А., ^{1,2} Кавыркин Д.И., ¹Будаев В.П., ¹Федорович С.Д., 267
^{1,2}Чиннов В.Ф., ¹Чан К.В., ¹Мязин А.С. (НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия;
²ОИВТ РАН, г. Москва, Россия;)
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ ЕЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРОТОТИПА ЭЛЕМЕНТА
ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА УСТАНОВКЕ
ПЛМ-М
- Нагорный Н.В., Портоне С.С., Миронов А.Ю., Миронова Е.Ю., Гужев Д.И., 268
Николаев А.И., Нестеренко В.М., Авдюшкин Д.А., Михалев И.М., Арбузова
Т.В., Семёнов О.И., Семёнов И.Б. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр
ИТЭР», г. Москва, Россия)
СТАТУС РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ
ДЛЯ ПРОЕКТА ИТЭР В 2023 ГОДУ
- ¹Афанасьев В.И., ¹Мельник А.Д., ¹Миронов М.И., ²Мокеев А.Н., 269
¹Наволоцкий А.С., ¹Несеневич В.Г., ¹Петров М.П., ¹Петров С.Я.,
¹Чернышев Ф.В., ¹Шмитов Р.Ю. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-
Петербург, Россия; ²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР»,
г. Москва, Россия)
СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОБДИРОЧНЫХ
МИШЕНЕЙ ДЛЯ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ИТЭР: РАЗРАБОТКА
И ИСПЫТАНИЯ
- ¹Никулин Б.И., ¹Поддубный И.И., ¹Свириденко М.Н., ²Путрик А.Б. 270
(АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия;
²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СБОРКИ
 ГИБКОЙ ОПОРЫ БЛАНКЕТА ИТЭР В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ
ЭКСПЛУАТАЦИИ
- Панкратьев П.А., Смирнова Е.П., Гук Е.Г., Раздобарин А.Г., Медведев О.С., 271
Елец Д.И., Букреев И.М., Толстяков С.Ю., Чернаков А.П., Климов В.Н.,
¹Чернаков П.В., ²Кириенко И.Д., ²Модестов В.С., Мухин Е.Е. (ФТИ им. А.Ф.
Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ¹ООО «Спектрал-Тех», г. Санкт-
Петербург, Россия; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия)
ПЬЕЗО - И БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ АКТУАТОРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В
ВАКУУМНОМ ОБЪЕМЕ ИТЭР
- Панкратенко А.В., Кормилицын Т.М., Ревякин П.А., Семенов Т.И., 272
Кашук Ю.А. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
ИЗМЕРЕНИЯ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ
СЦЕНАРИЕВ РАЗРЯДОВ ИТЭР ПРИ ПОМОЩИ КОЛЛИМИРОВАННОГО
НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА
- Павлова Г.С., Тугаринов С.Н., Шабашов А.Ю., Звонков А.В. (ЧУ ГК 273
Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
ВЛИЯНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА
ВОЗБУЖДЕНИЯ ОТ ЭНЕРГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ТОЧНОСТЬ
ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ИТЭР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

- ^{1,5}Петров В.Г., ²Лазарев В.Б., ²Агеев А.В., ²Мурачев М.М., ^{1,2}Джурик А.С., 274
²Лешов Н.В. (¹ЧУГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, Россия; ³УТС-центр, г. Москва, Россия)
ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ТОКАМАКЕ T-11M С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ РЕФРАКТОМЕТРИИ В ЛИТИЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ
- ^{1,2}Пушина А.В., ^{1,5}Бурмистров Д.А., ¹Гаврилов В.В., ^{1,2}Лиджигорьяев С.Д., 275
^{1,2}Позняк И.М., ^{1,2}Топорков Д.А. (¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия)
ЗАЩИТА ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ПОТОКА ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ НЕОНОВОЙ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ
- ¹Родионов Н.Б., ¹Артемьев К.К., ¹Красильников А.В., ¹Мещанинов С.А., 276
¹Родионова В.П., ¹Трапезников А.Г., ²Дравин В.А. (¹ЧУГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ²ФИАН, г. Москва, Россия)
ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ АТОМОВ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ
- ¹Саврухин П.В., ²Кузьмин Е.Г., ²Кедров И.В., ¹Брыксин Д.А., ¹Кирнев Г.С. 277
(¹ЧУГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ²АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия)
ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТАВКЕ ВЕРХНИХ ПАТРУБКОВ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА ИТЭР
- ^{1,2,4}Шошин А.А., ^{1,4}Бурдаков А.В., ¹Иванцовский М.В., ^{1,2,4}Полосаткин С.В., 278
^{1,2}Суляев Ю.С., ^{1,4}Семенов А.М., ¹Гавриленко Д.Е., ^{1,2}Таскаев С.Ю., ^{1,2}Касатов Д.А., ³Овсиенко А.И., ³Румянцев В.И., ⁵Кравцов Д.Э., ⁵Сорокина Н.В. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия; ³ООО Вириал, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁴НГТУ, г. Новосибирск, Россия; ⁵ЧУГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
СВОЙСТВА КЕРАМИКИ КАРБИДА БОРА, СЕРИЙНО ПОСТАВЛЯЕМОЙ В ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПОРТЫ ИТЭР ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ЗАЩИТЫ
- Смирнов П.В., Кадыргулов А.А., Каклюгина Н.А., Курганов В.Е., 279
Пташкина А.Н., Семенов Е.В., Сульдин В.А., Портоне С.С. (ЧУГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТРЕБОВАНИЙ К УПРАВЛЕНИЮ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ И ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК КЛАССА МЕГАСАЙЕНС
- ^{1,4}Соломатин Б.Н., ^{1,4}Бурдаков А.В., ⁵Буслаков И.В., ²Высоких Ю.Г., 280
¹Гавриленко Д.Е., ^{1,5}Грищенко А.М., ¹Иванцовский М.В., ²Кравцов Д.Э., ³Логинов И.Н., ³Модестов В.С., ²Портнов Д.В., ¹Селезнев П.А., ¹Серемин В.В., ²Сорокина Н.В., ¹Суляев Ю.С., ¹Шабунин Е.В., ³Шагниев О.Б., ¹Шиянков С.В., ^{1,4}Шошин А.А. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ЧУГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ³СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁴НГУ, г. Новосибирск, Россия; ⁵НГТУ, г. Новосибирск, Россия)
ФИНАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ОПОРНЫХ РАМ ВЕРХНИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПОРТОВ 02 И 08 УСТАНОВКИ ИТЭР

- Сотников О.З., Бельченко Ю.И., Гаврисенко Д.Ю., Горбовский А.И., Санин А.Л., Шиховцев И.В. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 281
ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОЩНОГО ИСТОЧНИКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В РЕЖИМЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ
- ¹Устинов А.Л., ²Денисов Г.Г., ⁴Еремеев А.Г., ¹Красильников А.В., ³Попов Л.Г., ³Тай Е.М., ²Фокин А.П. (¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ²ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия; ³НПП ГИКОМ, Нижний Новгород, Россия) 282
СТАТУС ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОЕКТА ИТЭР
- ¹Устинов А.Л., ²Бурсиков А.С., ³Вадатурский В.В., ⁴Медников А.А., ¹Красильников А.В., ²Родиң И.Ю. (¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ²АО "НИИЭФА им. Д.В. Ефремова", г. Санкт-Петербург, Россия; ³АО "СНСЗ", г. Санкт-Петербург, Россия) 283
ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ИСПЫТАНИЯ И ПОСТАВКА КАТУШКИ ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ ПФ1 ДЛЯ ПРОЕКТА ИТЭР
- ^{1,2,3}Владимиров И.А., ^{1,3}Шелухин Д.А., ⁴Демедецкая Я.А., ^{1,3}Вершков В.А. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³УТС-Центр, г. Москва, Россия; ⁴Союз Купера по развитию науки и искусства, г. Нью-Йорк, США) 284
ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СРЕДНЕХОРДОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В ДИАГНОСТИКЕ РЕФРАКТОМЕТРИЯ ИТЭР
- Змитренко Н.В. (*ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 285
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ ФАЗЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ
- ¹Кормилицын Т.М., ¹Обудовский С.Ю., ¹Кашук Ю.А., ¹Юхнов Н.М., ¹Воробьев В.А., ¹Джурик А.С., ¹Панкратенко А.В., ¹Фридрихсен Д.С., ¹Степанов С.Б., ¹Портнов Д.В., ²Гавриленко Д. Е., ²Иванцовский М.В., ²Бурдаков А.В., ³Мартазов Е.С., ³Парышкин Ю.А., ³Федоров В.А. (¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ³НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 286
FINAL DESIGN CHALLENGES OF THE ITER DIVERTOR NEUTRON FLUX MONITOR

ДОКЛАДЫ ПОСТДЕДЛАЙН 289-304

- ^{1,2}Сычугов Д.Ю., ¹Рыжаков Д.В., ¹Андреев В.Ф., ¹Балашов А.Ю., ¹Горбунов А.В., ^{1,3}Кирнева Н.А., ¹Кислов Д.А., ¹Ноткин Г.Е., ¹Сушков А.В., ¹Тарасян К.Н., ¹Шелухин Д.А., ¹Хайрутдинов Э.Н. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²МГУ им. М.В. Ломоносова Москва, Россия; ³НИЯУ МИФИ, Москва, Россия) 289
РАСЧЕТ УСТОЙЧИВЫХ РАВНОВЕСНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ И СЦЕНАРИЯ ДЛЯ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД С ПОМОЩЬЮ КОДА TOKSCEN
- ¹Рыжаков Д.В., ¹Шестаков Е.А., ^{1,2}Идеал Р. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия) 290
АНАЛИЗ СПЕКТРОВ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД НА СТАДИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУСКА
- ¹Асадулин Г.М., ¹Бельбас И.С., ¹Горшков А.В., ^{1,2}Панфилов Д.С., ¹Толпегина Ю.И. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия) 291
ПЕРВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

- ¹Сарычев Д.В., ¹Соловьев Н.А., ¹Диас-Михайлова Д.Е., ¹Плоскирев Е.Г., 292
²Орловский Д.А., ¹Сергеев Д.С. (¹НИЦ “Курчатовский институт”,
г. Москва, Россия; ²НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия)
ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ
НА ТОКАМАКЕ Т-15МД
- ¹Капралов В.Г., ²Дремин М.М., ²Крылов С.В., ¹Сергеев В.Ю., 293
²Трубников А.С. (¹СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия;
²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия)
СТРУКТУРА И ВОЗМОЖНОСТИ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА
- Немцев Г.Е., Ревякин П.А., Жаров А.С., Степанов С.Б., Голачев В.М., 294
Нагорный Н.В., Гужев Д.И., Юхнов Н.М. (ЧУ ГК Росатом «Проектный
центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ВНК ИТЭР
- Костриченко И.А., Брагин Е.Ю., Гусев С.С. (НИЦ «Курчатовский 295
институт», г. Москва, Россия)
КАЛОРИМЕТР-ЗОНД ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ИСТЕКАЮЩЕГО
ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В БЕЗЭЛЕКТРОДНОМ ПЛАЗМЕННОМ
РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ
- Портнов Д.В., Афанасенко Е.С., Высоких Ю.Г., Кашук Ю.А. 296
(ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
МОДЕЛЬ TRT 2023, ЯДЕРНО-РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.
(8Т, 5МА С ЗАЩИТОЙ ПОРТОВ)
- ^{1,2}Хатуева М.Д., ^{1,2}Гудкова В.В., ¹Кончечков Е.М. (¹ИОФ РАН, 297
г. Москва, Россия; ²РУДН, г. Москва, Россия)
ПЛАЗМЕННАЯ АКТИВАЦИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ПРИ
МИКРОКЛОНАЛЬНОМ РАЗМНОЖЕНИИ
- ¹Мухин Е.Е., ¹Толстяков С.Ю., ¹Баженов А.Н., ¹Бочаров И.В., ¹Букреев И.М., 298
¹Варшавчик Л.А., ¹Дохтаренко Д.В., ¹Дмитриев А.М., ^{1,2,3}Елец Д.И.,
¹Ермаков Н.В., ¹Жильцов Н.С., ¹Курские Г.С., ¹Коваль А.Н., ⁴Корнев А.Ф.,
⁴Макаров А.М., ⁵Богачев Д.Л., ¹Александров С.А., ¹Николаев А.В.,
¹Бочарников В.А., ¹Марчий Г.В., ¹Медведев О.С., ¹Николаенко К.О.,
¹Минбаев М., ¹Панкратьев П.А., ^{1,2}Раздобарин А.Г., ¹Смирнов Г.В.,
¹Самсонов Д.С., ¹Григорьева О.А., ¹Соловей В.А., ¹Снигирев Л.А.,
¹Старовойтов Е.А., ¹Терещенко И.Б., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Гук Е.Г.,
¹Климов В.Н., ¹Смирнова Е.П., ¹Сотников А.В., ⁵Чернаков П.В.,
¹Чернаков А.П., ⁶Мокеев А.Н., ⁷Модестов В.И., ⁷Кириенко И.Д.,
⁷Жадковский А.А.. (¹ФТИ им А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия;
²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ³НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия;
⁴ООО «Лазеры и оптические системы», г. Санкт-Петербург, Россия;
⁵ООО «Спектрал-Тех», г. Санкт-Петербург, Россия; ⁶ЧУ ГК Росатом
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ⁷СПбПУ, Физико-
механический институт, г. Санкт-Петербург, Россия)
ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДИВЕРТОРА
ТОКАМАКА ИТЭР (СТАТУС РАБОТ)
- ¹Чебурова А.В., ¹Козлов С.А., ¹Хомяков С.Э., ¹Поддубный И.И., 299
¹Свириденко М.Н., ²Беликов А.И., ²Колесник Л.Л., ³Шер Е.С.,
³Ульяницкий В.В., ⁴Путрик А.Б. (¹АО «НИКИЭТ», г. Москва, Россия;
²ООО «Электровакуумные технологии», г. Москва, Россия; ³ООО «СТЗП»,
г. Новосибирск, Россия; ⁴ЧУ ГК «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»,
г. Москва, Россия)
КВАЛИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНОГО
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ВНУТРИКАМЕРНЫЕ
КОМПОНЕНТЫ БЛАНКЕТА ИТЭР

- ¹Терещенко И.Б., ¹Самсонов Д.С., ¹Мухин Е.Е., ²Капустин Ю.В., ³Маринин Г.В., ³Герентьев Д.В., ⁴Пискарев Д.В., ⁴Маханьков Н.А., ⁵Патрикеев В.Е., ⁶Солк С.В., ⁷Худолей А.Л., ⁷Кумейша П.Н., ¹Марчий Г.В., ⁸Королева А.В., ¹Толстяков С.Ю., ¹Снигирев Л.А., ⁹Городецкий А.Е., ⁹Залавутдинов Р.Х., ⁹Маркин А.В., ⁹Буховец В.Л., ¹⁰Чернаков П.В., ¹¹Мокеев А.Н. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия; ³Русские Технологии, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁴АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия; ⁵АО ЛЗОС, г. Лыткарино, Россия; ⁶АО НИИ ОЭП, г. Сосновый Бор, Россия; ⁷ИТМО им. А.В. Лыкова, г. Минск, Беларусь; ⁸Институт химии СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁹ИФХЭ РАН, г. Москва, Россия; ¹⁰ООО «Спектрал-Тех», г. Санкт-Петербург, Россия; ¹¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 300
- СТАТУС РАЗРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СОБИРАЮЩИХ
ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В
ДИВЕРТОРЕ ИТЭР
- Минбаев М.Э., Самсонов Д.С., Смирнов Г.В., Резанов Д.А., Мухин Е.Е. 301
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия)
- РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА СОГЛАСОВАНИЯ ВЧ МОЩНОСТИ
ЧИСТЯЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ В ВАКУУМНОМ
ОБЪЕМЕ ИТЭР
- Сениченков В.А., Кудряшов П.С., Емельянов А.В, Андреев Е.А., Мухин Е.Е. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия) 302
- СТАТУС РАБОТ ПО ИНТЕГРАЦИИ НИЖНЕГО ПОРТА № 08, ВЕРХНИХ
ПОРТОВ №№04-06 ТОКАМАКА ИТЭР
- Шестаков Е.А., ²Алексеев А.Г., ²Вуколов Д.К., ²Горшков А.В., ¹Коновалов Г.М., ²Орловский И.И., ²Морозов А.А., ²Андреев Е.Н., ²Асадулин Г.М., ²Ахтырский С.В., ²Храменков А.В., ²Вуколов К.Ю., ²Карпушов И.Д., ²Качкин А.Г., ²Проценко Д.Е., ²Рогов А.В., ²Капустин Ю.В. (¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ²УТС-Центр, г. Москва, Россия) 303
- СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ ИТЭР: СТАТУС И ПЛАН
РАБОТ НА 2024 ГОД
- Афанасенко Е.С., Портнов Д.В., Высоких Ю.Г., Кащук Ю.А. 304
(ЧУ ГК «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
- ПРИМЕНЕНИЕ КОДА ОРЕНМС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА
НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОКАМАКЕ ТРТ
- СПИСОК АВТОРОВ** 305-316

ОБЗОРНЫЕ ДОКЛАДЫ

REVIEWS

КОНФЕРЕНЦИЯ FEC-2023: ИНЖЕНЕРНЫЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ВЫЗОВЫ УТС

Лебедев С.В.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Sergei.Lebedev@mail.ioffe.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.001

В октябре 2023 г. в Лондоне состоялась 29-я конференция МАГАТЭ FEC-2023. На конференции докладывались результаты исследований, полученные в течение последних двух лет по наиболее актуальным вопросам термоядерного синтеза.

Результаты DT кампании на крупнейшем действующем токамаке JET (EUROfusion) были представлены Др. К. Магги. В экспериментах получена рекордная термоядерная энергия – 59 МДж в течение 5 с в обогащенной тритием плазме (отношение n_T/n_D составило 85/15). В докладе обоснован выбор изотопного отношения для получения рекордных результатов.

На смену JET пришел токамак JT-60SA, построенный в рамках Европейско-Японского сотрудничества. Плюсы JT-60SA: размеры, большие чем у JET, сверхпроводящая магнитная система, допускающая длинные разряды. Минусы: $B_T = 2,25$ Тл почти вдвое ниже, чем у JET, невозможна работа с тритием, что сужает возможности экспериментов. При тестировании выявлены дефекты магнитной системы, устранение которых задержало запуск на 2,5 года.

Состояние работ по сооружению реактора ИТЭР было доложено его директором П. Барабаски. В настоящее время завершено 80% работ, необходимых для запуска установки. Запуск значительно задерживается в связи с эпидемией Covid-19, ошибками, допущенными при изготовлении вакуумной камеры, выявленной необходимостью испытаний сверхпроводниковых магнитных катушек. Представлены пути минимизации задержек.

Др. Дж. Федеричи представил анализ влияния увеличения магнитного поля на размеры реактора E-DEMO. Показано, что увеличение B_T не приводит к уменьшению размеров установки из-за увеличения размеров силовых конструкций. Обсуждены перспективы применения конфигураций с малым аспектным отношением. В связи с задержкой ИТЭРа возникли опасения, что предполагавшееся лицензирование материалов blankets реактора DEMO не будет проведено своевременно. EUROfusion считает необходимым сооружение объемного источника нейтронов (VNS) для проведения лицензирования.

Наиболее амбициозным проектом, представленным на конференции, явился проект токамака SPARC на основе высокотемпературного сверхпроводника с $B_T = 12,2$ Тл, в котором планируется достигнуть $Q > 1$. Частная компания CFS совместно с Массачусетским технологическим институтом намерены запустить токамак в 2025 г., а в 30-е годы построить коммерческий реактор ARC, производящий 400 МВт электрической мощности.

Следует отметить достижение квазистационарных разрядов с полным замещением тока в течение 1000 с и с 400-секундным H-режимом на китайском токамаке EAST, а также с 400-секундным разрядом с улучшенным удержанием на корейском токамаке KSTAR. Большой интерес аудитории вызвали результаты, полученные на сферических токамаках Глобус-М2 (Г.С. Курский, РФ) и ST40 (St. McNamara, UK), в которых была продемонстрирована возможность достижения субтермоядерных температур в компактных установках.

Др. А. Пак представил доклад о достижении “физического” зажигания на установке National Ignition Facility (Ливерморская национальная лаборатория.). В лучшем эксперименте была получена термоядерная энергия 3,88 МДж при вложенной энергии лазера 2,04 МДж.

На конференции четко обнаружилось две тенденции в прогрессе термоядерных исследований. Первая из них – «взрывное» увеличение числа частных компаний, предлагающих ускоренный путь к созданию маломощных энергетических реакторов или участвующих в решении отдельных технических вопросов УТС. Вторая тенденция – значительный рост качества новых экспериментальных результатов и объема термоядерных исследований в азиатских странах и, в первую очередь, в Китае, а также в Японии и Корее.

Участие автора в конференции FEC-2023 финансировалось из средств ФП №3 КП РТН.

ЭФФЕКТИВНАЯ МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИНАМИКИ И РЕЗУЛЬТИРУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ПЛАЗМЕ ОСНОВНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА

Пастухов В.П., Смирнов Д.В., Чудин Н.В.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: pastukhov_vp@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.002

Обсуждается относительно простая, но достаточно эффективная динамическая модель плазменной турбулентности и результирующих процессов переноса в плазме центральной области токамака. Модель основана на специальной системе нелинейных слабо диссипативных адиабатически редуцированных уравнений МГД-типа, которые самосогласованно описывают как турбулентные флуктуации плазмы, так и результирующий недиффузионный перенос тепловой энергии, тороидального момента и плотности плазмы. На основе этой модели было разработано семейство компьютерных кодов CONTRA [1, 2], которые позволяют самосогласованно моделировать довольно сложные сценарии эволюции плазмы с различными переходными режимами на достаточно длительных временах, сравнимых или превышающих энергетическое время удержания плазмы. Одной из наиболее важных особенностей модели, выявленной в ходе расчётов, является тенденция поддержания плазмы вблизи турбулентно-релаксированных состояний с профилями давления, близкими к “каноническим” профилям давления, наблюдаемым во многих экспериментах на токамаках [1, 3]. Кроме того, моделирование выявило решающее влияние области SOL на время удержания энергии плазмы в центральной области токамака. В предположении, что классическая продольная электронная теплопроводность является доминирующим механизмом потерь тепла из SOL, моделирование переходных режимов с различной мощностью ЭЦР-нагрева показало такую зависимость времени удержания энергии плазмы от вводимой мощности нагрева, которая хорошо согласуется как с экспериментами на T-10, так и со скейлингом стационарной H-моды в ITER [4]. На основе приведенных выше результатов было сделано концептуальное предложение по достижению стационарного пикирования тепловой энергии в разрядах с повышенным коэффициентом запаса устойчивости q_b на границе плазмы [5]. Также представлены результаты моделирования на макроскопических временах для ряда других сложных сценариев с быстрым включением и выключением ЭЦР-нагрева, а также сценариев с пилообразными колебаниями [1]. Полученные результаты демонстрируют быструю нелокальную реакцию результирующих транспортных процессов на быстрые изменения вводимой внешней мощности и находятся в разумном согласии с экспериментами на различных токамаках.

Литература

- [1]. Pastukhov V.P., Chudin N.V., Smirnov D.V. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2011. V. 53. P. 054015.
- [2]. Днестровский А.Ю., Пастухов В.П., Чудин Н.В. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 325.
- [3]. Пастухов В.П., Смирнов Д.В. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. С. 307.
- [4]. Пастухов В.П., Кирнева Н.А., Смирнов Д.В. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 1072.
- [5]. Пастухов В.П., Смирнов Д.В., Чудин Н.В. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 609.

СТАТУС РАБОТ ПО РАЗВИТИЮ ПРОЕКТА ГДМЛ

Багрянский П.А.

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: p.a.bagryansky@inp.nsb.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.003

В институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН) совместно с рядом отечественных организаций проводятся исследования, направленные на развитие технологий, необходимых для реализации приложений ядерного синтеза на основе магнитных ловушек открытого типа с линейной осесимметричной конфигурацией. В ближайшей перспективе в качестве таких приложений видятся мощные источники нейтронов DT-синтеза, а при успешном дальнейшем развитии и относительно компактные энергетические реакторы.

Обозначенные исследования сфокусированы на развитие проекта Газодинамической многопробочной ловушки (ГДМЛ) [1], которая должна стать демонстратором развиваемых технологий. В настоящее время завершены работы по созданию эскизного проекта ГДМЛ, одной из отличительных особенностей которого являются магнитные пробки на основе ВТСП второго поколения с индукцией до 20 Тл. Эскизный проект соответствующих пробочных узлов выполнен совместно с компанией СуперОкс [2]. Миссией ГДМЛ является экспериментальная демонстрация в стационарных условиях кардинального улучшения удержания плазмы по сравнению с классическим пробкотроном Будкера-Поста. Такого результата планируется достичь за счет использования торцевых многопробочных или винтовых секций, способных ограничить продольные потоки частиц и энергии плазмы, а также за счет перехода в режим диамагнитного удержания, когда относительное давление $\beta \rightarrow 1$.

Для поддержки проекта ГДМЛ в ИЯФ созданы и успешно работают четыре экспериментальные установки, где решаются ключевые проблемы проекта, связанные с продольным удержанием и удержанием с $\beta \rightarrow 1$.

В планируемом докладе будет дана информация об эскизном проекте ГДМЛ, а также представлен обзор состояния дел в поддерживающих исследованиях.

Литература

- [1]. Skovorodin D.I. et al. // Plasma Physics Reports, 2023, V. 49, P. 1039–1086.
- [2]. <https://www.superox.ru>.

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

Асташинский В.М., Пенязьков О.Г.

*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
e-mail: ast@hmti.ac.by*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.004

Представлены результаты проводимых в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси исследований квазистационарных газоразрядных и эрозионных плазмодинамических систем, перекрывающих широкий диапазон запасаемой в накопителях энергии (от 1 до 215 кДж), предназначенных для решения ряда научных и технологических задач, таких как заполнение плазмой магнитных ловушек различного типа, моделирование условий на первой стенке т/я реактора, создание плазменных двигателей космического назначения, а также для эффективной модификации поверхностных свойств материалов.

В Институте созданы работающие в режиме ионного токопереноса квазистационарные сильноточные плазменные ускорители, в которых реализуется ионно-дрейфовое ускорение замагниченной плазмы. Ускорители генерируют компрессионные плазменные потоки заданного состава, по совокупности параметров превосходящие все существующие плазмодинамические системы. Рассмотрены представления об определяющем влиянии ионно-обменных процессов в ускорительном канале с проницаемыми электродами на течение замагниченной плазмы и на характер распределения в нем разрядного тока, обеспечивающего получение компрессионного потока с управляемыми параметрами плазмы.

Новые возможности для получения плазменных образований с экстремально высоким энергосодержанием открывает плазмодинамическое взаимодействие встречно направленных токнесущих компрессионных плазменных потоков, когда за счет процессов вязкой диссипации (термализации) обеспечивается переход кинетической энергии сталкивающихся потоков во внутреннюю энергию формирующегося сферического плазменного образования, удерживаемого собственным магнитным полем без щелей и устойчиво существующим порядка 100 мкс.

Рассмотрены физические принципы создания не имеющего аналогов электроразрядного эрозионного тягового элемента с секционированным внешним электродом для плазменного микродвигателя космического назначения, позволяющего управлять пространственной ориентацией вектора тяги за счет установления заданной конфигурации электромагнитных полей, формируемых самосогласованным образом распределенными токами электроразрядной системы, и характеризующегося отсутствием подвижных механических узлов и внешних магнитных систем.

Представлен технологический подход к созданию элементов экранной противометеорной защиты повышенной стойкости, содержащих двухслойные композиционные покрытия, модифицированные в результате воздействия компрессионного плазменного потока. Для испытаний ударной стойкости таких элементов создана уникальная двухступенчатая баллистическая установка, первой ступенью которой является квазистационарный эрозионный плазменный ускоритель, а второй – легкогазовая секция. Метательная установка способна разгонять тела массой до 0,2 г до скоростей 3 – 5 км/с.

Рассмотрены физические принципы предложенного нового научного направления – поверхностной плазменной металлургии, в рамках которого разрабатываются методы эффективной структурно-фазовой модификации поверхностных свойств материалов при воздействии на них высокоэнергетическими компрессионными потоками, нагруженными специально вводимыми в плазму мелкодисперсными упрочняющими частицами, что приводит к плавлению поверхностного слоя материала, жидкофазному перемешиванию в расплавленном слое легирующих элементов с подложкой и одновременному синтезу новых упрочняющих соединений (интерметаллидов, нитридов, карбидов и их твердых растворов).

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛАЗМЕННЫХ РАЗРЯДАХ В ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИНТЕНСИВНОГО УЛЬТРАЗВУКА

Булычев Н.А.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия, e-mail: nbulychev@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.005

Работа направлена на исследование плазмохимических процессов, которые определяются сочетанием воздействия на жидкофазные среды термически неравновесной низкотемпературной плазмы и интенсивных ультразвуковых колебаний в режиме развитой кавитации. Разработанный метод реализации плазмохимических превращений представляет значительный интерес и преимущества для создания новых наноразмерных материалов с особыми свойствами, т.к. позволяет направленно варьировать электрофизические и акустические характеристики процесса при осуществлении плазмохимических реакций. Практическим следствием решения данной проблемы является создание метода направленного синтеза значимых веществ. Отличительным признаком и существенным преимуществом данного метода является то, что одновременное воздействие на зону реакции термически неравновесной плазмы и ультразвуковой кавитации приводит к созданию условий, недостижимых в других случаях, и обуславливает протекание реакций при высокой локальной концентрации энергии и активных частиц.

Было установлено, что в таком акустоплазменном разряде возможно синтезировать наночастицы металлов и их оксидов различного состава, в том числе наночастицы полиметаллических оксидов. При этом размер первичных наночастиц находился в интервале 2 – 50 нм в зависимости от материала. При интенсивном воздействии ультразвука удавалось получать узкие размерные фракции наночастиц. В ходе экспериментов была также обнаружена возможность синтезировать наноразмерные материалы типа «ядро-оболочка».

При исследовании оптических свойств синтезируемых наноматериалов было обнаружено, что наночастицы, синтезированные в плазменном разряде под действием ультразвуковой кавитации, обладают большей интенсивностью люминесценции по сравнению с частицами, синтезированными в разряде без кавитации. В водной суспензии наночастиц, синтезированных в акустоплазменном разряде, было зарегистрировано вынужденное низкочастотное комбинационное рассеяние света, возникающее в результате взаимодействия лазерных импульсов с акустическими колебаниями наночастиц. Полученные суспензии наночастиц металлов (в т.ч. благородных) и их оксидов были использованы как альтернативные оптические среды для обращения волнового фронта, работающие при уровнях лазерной накачки гораздо ниже порога вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна.

В работах по этому направлению показано, что синтезированные в таких условиях наночастицы различного состава обладают активированной поверхностью с большим количеством нескомпенсированных связей и дефектов в результате действия на них интенсивного ультразвука и тем самым способны к эффективному взаимодействию с органическими и неорганическими соединениями, матрицами и т.д., что дает возможность создавать на их основе новые гибридные органо-неорганические композиционные материалы.

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОННО-ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Коваль Н.Н.

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.006

Рассмотрены принципы работы и особенности конструкций нового электронно-ионно-плазменного оборудования, создаваемого на основе плазменных образований, генерируемых в больших вакуумных объёмах разрядами низкого давления [1].

Объёмная однородная плазма создаётся самостоятельными и несамостоятельными дуговыми и тлеющими разрядами при давлениях 0,01 – 1 Па с токами от единиц до сотен ампер, обеспечивая концентрацию $10^9 - 10^{11} \text{ см}^{-3}$ в объёмах до долей кубического метра. Помещённые в плазму материалы и изделий подвергаются бомбардировке ионами, извлечёнными из плазмы и ускоренными в пристеночном слое пространственного заряда, что приводит к модификации поверхности, улучшая её физико-химические и функциональные свойства [2].

Кроме того, рассмотрены электронно-пучковые энергокомплексы и установки, основанные на извлечении из объёмных плазменных образований и формировании электронных пучков большого ($1 - 1000 \text{ см}^2$) сечения.

В качестве примера приведено описание и основные характеристики комплексной электронно-ионно-плазменной установки “КОМПЛЕКС”, сочетающей в едином вакуумном цикле электродуговые устройства для очистки, активации поверхности материалов, плазменно-ассистированного напыления функционального слоя толщиной до нескольких микрометров с дальнейшим электронно-пучковым миксингом покрытия для получения высокоадгезионного упрочнённого слоя с улучшенными характеристиками. Реализованная технология позволяет в разы увеличить износостойкость поверхности материалов и изделий.

Приведены экспериментальные данные по исследованию модифицированных слоёв и покрытий на различных материалах инструментального и конструктивного назначения, демонстрирующие как изменение структурно-фазового состояния, так и улучшение эксплуатационных свойств материалов.

Другим примером разработанного и созданного электронно-пучкового оборудования является ускоритель электронов “ДУЭТ” на основе импульсно-периодического сеточного плазменного эмиттера с дуговым разрядом низкого давления. Созданный ускоритель обеспечивает выведенный в атмосферу электронный пучок сечением $15 \times 75 \text{ см}^2$ при энергии электронов до 200 кэВ и средней мощности несколько киловатт. Основной особенностью ускорителя является возможность независимой регулировки всех его основных параметров: тока, ускоряющего напряжения, длительности импульсов и частоты их следования в достаточно широком диапазоне, что делает его удобным для проведения экспериментов по радиационному воздействию на материалы и изделия, плазмохимии, а также поиску оптимальных режимов при разработке технологических процессов.

Разработанное и созданное оборудование, а также реализованные с его использованием процессы имеют хорошие перспективы внедрения на реальном производстве.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10015-П).

Литература

- [1]. Эмиссионная электроника / Коваль Н.Н., Окс Е.М., Протасов Ю.С., Семашко Н.Н. Под ред. Протасова Ю.С. – М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 596 с.
- [2]. Современные тенденции модифицирования структуры и свойств материалов / под общ. ред. Н.Н. Ковалья и В.Е. Громова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2015. – 380 с.

РАВНОВЕСИЕ ПЛАЗМЫ В ОСЕНЕСИММЕТРИЧНЫХ СИСТЕМАХ

Сорокина Е.А.

*Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, г. Москва,
Россия, e-mail: Sorokina_EA@nrcki.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.007

Обсуждается фундаментальная проблема равновесия плазмы в осенесимметричной магнитной конфигурации. В отличие от идеализированного случая осевой симметрии, описываемого каноническим уравнением Грэда-Шафранова, имеющего различные типы решений, в том числе аналитические и численные примеры равновесных систем с тороидально вложенными магнитными поверхностями, существование таких систем в отсутствие симметрии не только не является очевидным, но и подвергается постоянным сомнениям на протяжении уже более 60 лет развития теории равновесия плазмы.

В реальности симметричных магнитных систем нет. В токамаках неизбежна асимметрия из-за дискретности магнитных катушек, наличия нагревных и диагностических портов, внешних полей. Теория возмущений исходно симметричных конфигураций наталкивается на нарушение необходимого условия равновесия – постоянства приведённых длин силовых линий на рациональных магнитных поверхностях [1]. Формально это проявляется в появлении резонансных знаменателей в магнитном дифференциальном уравнении [2, 3], описывающем замыкание токов, что означает наличие на рациональных поверхностях сингулярных токов (см., например, [4]). Это интерпретируется как неизбежное нарушение вложенности магнитных поверхностей и образование островной структуры [1].

Не решает проблему и компьютерное моделирование. Современные 3D численные коды либо допускают наличие в области рациональных магнитных поверхностей сингулярных токовых слоёв, либо обходят в расчётах эту область, искусственно вводя «полочки» на профилях давления плазмы, вращательного преобразования или их комбинации. И хотя математического запрета на выполнение условия замыкания токов на рациональных магнитных поверхностях нет, но в рамках стандартных упрощённых моделей с геометрией плоского слоя или цилиндра решений построить не удаётся [5]. Отсутствие наглядных гладких решений, не обладающих пространственной симметрией, в течение многих лет служило аргументом в поддержку гипотезы Грэда о несуществовании невырожденных трёхмерных равновесий плазмы со вложенными магнитными поверхностями [6].

В настоящей работе предъявлен класс аналитических решений уравнений равновесия с истинными магнитными поверхностями, удовлетворяющими условию замыкания токов. Использована удобная система уравнений равновесия [7], обобщающая подход Грэда-Шафранова на случай осенесимметричных магнитных конфигураций. Выявлена и наглядно продемонстрирована неприменимость простой модели кругового цилиндра с отождествлёнными концами для предсказательных выводов о равновесии плазмы тороидальной топологии. Развитый формализм доказывает ошибочность гипотезы Грэда и открывает возможности для адекватного моделирования трёхмерных равновесных плазменных конфигураций.

Литература

- [1]. Л.С. Соловьёв, В.Д. Шафранов. В сб. Вопросы теории плазмы, вып. 5, 3–208, 1967.
- [2]. M.D. Kruskal, R.M. Kulsrud // Phys. Fluids. 1, 265, 1958.
- [3]. W. Newcomb // Phys. Fluids. 2, 362, 1959.
- [4]. Y.-M. Huang et al. // PPCF, 65, 034008, 2023.
- [5]. J. Loizu et al. // Phys. Plasmas. 22, 022501; 090704, 2015.
- [6]. H. Grad. // Int. J. Fus. En. 3, 33, 1985.
- [7]. Е.А. Сорокина, В.И. Ильгисонис // Физика плазмы. 45, 1065, 2019.

ДВУХЧАСТОТНЫЙ ЭЦР НАГРЕВ В КОМПАКТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ – ЗАДАЧИ И ПРЕИМУЩЕСТВА

Скалыга В.А., Глявин М.Ю., Господчиков Е.Д., Изотов И.В., Шалашов А.Г.

*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия,
e-mail:skalyga@ipfran.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.008

Нагрев высокотемпературной плазмы в лабораторных магнитных ловушках в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) в бихроматическом поле представляет значительный интерес как для фундаментальных исследований физики взаимодействия электромагнитных волн с плазмой, так и для практических приложений. Наличие двух пространственно разнесенных зон ЭЦР, отвечающих разным частотам, может быть использовано для управления профилем энерговклада и стабилизации плазмы в тороидальных системах. С другой стороны, перекрытие зон ЭЦР, наиболее естественно реализующееся в открытых магнитных ловушках, обеспечивает эффективную стохастизацию и уширение области циклотронного взаимодействия в фазовом пространстве. При этом, например, за счет перекрытия близких циклотронных гармоник появляется возможность подавить ограничение максимальной энергии ускоряемых электронов, связанное с уходом из резонанса за счет релятивистского увеличения массы. В данном докладе делается акцент на относительно новом эффекте, обнаруженном в экспериментах с двухчастотным нагревом в компактных технологических магнитных ловушках, используемых в качестве ЭЦР источников многозарядных ионов. Эффект проявляется в виде существенного увеличения эффективности работы такого источника в условиях подавления кинетических неустойчивостей, обусловленных мощным СВЧ нагревом плазмы.

Исследования поддержаны Российским научным фондом, проект № 19-79-30071.

МИКРОДИСПЕРСНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЯХ В ПРОЦЕССАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ МИКРОВОЛНОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ МОЩНОГО ГИРОТРОНА В СМЕСИ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ: СИНТЕЗ, СТРУКТУРА И ЦИТОТОКСИЧНОСТЬ

Скворцова Н.Н.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия;
tukudori@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.009

В ИОФ РАН разработана плазмохимическая установка на основе гиротронного комплекса МИГ-3 стелларатора Л-2М [1]. На этой установке было показано, что в определенных условиях в реакторе в смесях металлических и диэлектрических порошков мощными микроволновыми импульсами гиротрона могут быть инициированы цепные реакции синтеза микродисперсных материалов с контролируруемыми физическими и химическими свойствами [2]. Экспериментально осуществлен синтез материалов для формирования микро- и наноструктурных керамик. Полученные структуры обладают повторяемыми характеристиками, привлекательными для многочисленных применений: от создания новых типов гетерогенных катализаторов и люминесцентных материалов до биомедицинских материалов [3, 4].

В докладе представлена разработанная методика анализа получаемых мелкодисперсных материалов на цитотоксичность. Данная методика была впервые применена для исследования серии образцов частиц с развитой поверхностью, полученных в смесях порошков Ti/B, Ti/BN (cub/hex) [5]. Исследование полученных образцов на цитотоксичность в отношении клеток человека (линии НЕК293Т, МСF7, А549, VА13) показало токсические эффекты только при концентрациях в десятки мг/л и отсутствие обнаруживаемых токсических эффектов в бактериальной системе (*E. coli*). Полученная методика была применена для анализа микро- и наноматериалов, синтезированных в разных смесях порошков металлов и диэлектриков (Pt/Al₂O₃, Ag/Al₂O₃ и др.). Низкая токсичность на клеточном уровне указывает на потенциал безопасного использования предлагаемых микроструктур, но для возможного дальнейшего применения требует дальнейшего тестирования безопасности на уровне организма.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание ГЗ БВ10-2024) «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

Литература

- [1]. Batanov G.M., Borzosekov V.D., Golberg D. et al. // *J. Nanophoton.* 2016, V.10 (1), 012520.
- [2]. Skvortsova N.N., Shishilov O.N., Akhmadullina N.S. et al. // *Ceramics International.* 2021, V. 47 (3), p. 3978. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.262>.
- [3]. Батанов Г.М., Борзосексов В.Д., Кончечков Е.М., и др. // Патент РФ № 2523471. Способ получения нанодисперсионных порошков нитрида бора и диборида титана. Зарегистрирован в государственном реестре РФ 26 мая 2014 г.
- [4]. Гусейн-заде Н.Г., Скворцова Н.Н., Степахин В.Д., и др. // Патент РФ № 2772704. Способ нанесения наночастиц металлов на поверхность керамических носителей с использованием микроволнового разряда. Зарегистрирован в государственном реестре РФ 24 мая 2022 г.
- [5]. Skvortsova N.N., Obratsova E.A., Stepakhin V.D., et al. // *Fusion Science and Technology.* 2023. <https://doi.org/10.1080/15361055.2023.2255442>.

ИТЭР. ВРЕМЯ ПЕРЕМЕН

Химченко Л.Н., Красильников А.В.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: l.khimchenko@iterrf.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.010

Нет сомнения, что в условиях невыполнения заявленных целей т.н. «зелёной энергетики», проект ИТЭР является важным шагом на пути к термоядерной энергетике. К середине 2023 года было выполнено около 80% запланированных работ по сооружению инфраструктуры и изготовлению систем установки ИТЭР. Ранее началась сборка токамака в шахте – провели сборку двух секторов на стапелях сборки, а один установили в шахту, на рабочее место, с миллиметровой точностью.

Но, как иногда бывает с уникальными проектами, таких как ИТЭР, которые далеко оторвались по параметрам скейлингов от основных токамаков и когда в проект закладываются инновационные технические решения, трудности и неудачи являются неотъемлемой частью первых этапов сооружения установок. Иногда они запускают процесс пересмотра всего проекта.

Такой процесс начался с обнаружения серьёзных технических неисправностей в 2022 году после изготовления тепловой защиты и секторов вакуумной камеры. Так как ИТЭР во Франции проходит как ядерный объект, то у ядерного регулятора Франции также вызвали большие сомнения использование бериллия в качестве материала первой стенки. Одновременно руководство Международной Организации (МО) ИТЭР предложило другой путь к выходу на управляемую термоядерную реакцию, отойдя от утверждённого т.н. «четырёх стадийного подхода» - «4 Stage Approach». Предложение состояло в том, чтоб выйти к Первой плазме, проведя полную сборку и тестирование всех систем токамака. И сократить при этом время выхода к D–T реакции. Но, в таких условиях, Первая плазма отодвигалось на значительный срок. А отказ от бериллия, материала с низким Z, и его замена на вольфрам, создавал проблему переизлучения энергии из центральной области плазменного шнура. Что, например, изменяло структуру дополнительного нагрева плазмы.

Эти и другие проблемы привели к тому, что на последнем Совете ИТЭР № 32 был рассмотрен вопрос изменения т.н. «Базовой линии» (Baseline) - набора документов, определяющих принципы создания ИТЭР и функционирования МО ИТЭР. В которые входят: “Cost”, “Management”, “Schedule”, “Scope” и “Technical». При этом предварительное рассмотрение модифицированного проекта показало, что достигаются заявленные цели по получению термоядерного параметра $Q = 10$ и длительности разряда, достаточной для устойчивого горения термоядерной реакции и исследования нагрева плазмы альфа-частицами,

Одновременно, появляются национальные проекты термоядерных установок, которые будут использовать D-T реакцию. Это уже построенный JT60SA (ЕС-Япония), строящиеся SPARC (США), BEST (Китай). Участие России в проекте ИТЭР позволяет держать высокий технологический уровень при проектировании и создании термоядерных установок следующего поколения. В таких условиях Россия, кроме программы по созданию термоядерной энергетике, должна иметь свою ключевую установку, нацеленную на проверку технологий термоядерного реактора. И опираться на различные специализированные плазменные установки, для исследования актуальных проблем термоядерного синтеза.

Работа выполнена по государственному контракту с ГК «Росатом» от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014.

ТЕРМОИЗОЛЯЦИЯ ПЛАЗМЫ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 ПРИ НАГРЕВЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫМИ АТОМНЫМИ ПУЧКАМИ

¹Курские Г.С., ¹Сахаров Н.В., ¹Минаев В.Б., ¹Гусев В.К., ¹Петров Ю.В.,
²Багрянский П.А., ¹Балаченков И.М., ¹Бахарев Н.Н., ¹Варфоломеев В.И.,
¹Воронин А.В., ¹Горяинов В.А., ⁴Жилин Е.Г., ¹Жильцов Н.С., ²Иваненко С.В.,
¹Ильясова М.В., ³Кавин А.А., ¹Киселев Е.О., ¹Крикунов С.В., ¹Мельник А.Д.,
³Минеев А.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Мухин Е.Е., ¹Новохацкий А.Н., ¹Патров М.И.,
⁵Петров А.В., ⁵Пономаренко А.М., ¹Скрекель О.М., ⁶Соловей В.А., ¹Солоха В.В.,
²Соломахин А.Л., ¹Тельнова А.Ю., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю.,
¹Тюхменева Е.А., ¹Филиппов С.В., ¹Хилькевич Е.М., ¹Хромов Н.А., ¹Чернышев Ф.В.,
¹Шевелев А.Е., ²Шиховцев И.В., ¹Шулятьев К.Д., ¹Щеголев П.Б., ^{1,5}Яшин А.Ю.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
 e-mail: gleb.kurskiev@mail.ioffe.ru

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ООО Иоффе Фьюжн Текноложис, г. Санкт-Петербург, Россия

⁵Политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

⁶Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ
 «Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.011

Представлен обзор результатов по исследованию нагрева и термоизоляции плазмы в условиях нейтральной инжекции, полученных на сферическом токамаке Глобус-М2 [1] за период 2018 – 2023 г.г. Первые эксперименты проводились при значениях тока плазмы $I_p = 0,25 - 0,3$ МА и тороидального магнитного поля $B_T = 0,7 - 0,8$ Тл. При инжекции пучка дейтерия мощностью 0,8 МВт с энергией частиц 28 кэВ наблюдалось более чем двукратное увеличение полной запасенной энергии плазмы по сравнению с результатами, полученными на Глобусе-М при той же мощности нагрева. Эксперименты и проведенные расчеты показали, что скейлинги, полученные ранее на установках Глобус-М, MAST и NSTX и предполагающие сильную зависимость времени удержания энергии от магнитного поля и умеренную от тока плазмы ($\tau_E^{GLB} \sim I_p^{0,43} B_T^{1,19}$), выполняются для сферического токамака и в области более высоких значений магнитного поля B_T до 0,8 Тл. Ввод в эксплуатацию второго инжектора и нового комплекса диагностики томсоновского рассеяния лазерного излучения позволил существенно расширить область исследований по нагреву плазмы атомными пучками. В сферическом токамаке Глобус-М2 при тороидальном магнитном поле 0,8 – 0,9 Тл и токе плазмы 0,35 – 0,4 МА при инжекции нейтральных частиц с энергией до 45 кэВ при мощности пучка 0,75 МВт получен двукратный по сравнению с омическим режимом нагрев электронов плазмы. Дополнительное включение второго пучка с энергией частиц до 30 кэВ мощностью 0,5 МВт позволило получить режим с горячими ионами в диапазоне значений средней плотности плазмы $1,6 \div 10 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. По данным активной спектроскопии и корпускулярной диагностики температура ионов достигла величины 4 кэВ при плотности плазмы $8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в горячей зоне, превысив температуру электронов более чем в 2,5 раза [2, 3].

Работа выполнена на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях", в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе (темы 0034-2021-0001 и 0040-2019-0023).

Литература

- [1]. Minaev V.B. et al. // 2017 Nucl. Fusion 57 066047.
- [2]. Kurskiev G.S. et al. // 2022 Nucl. Fusion 62 104002.
- [3]. Курские Г.С. и др. // 2023, Физика плазмы, 49 (4), с 305-321.

АНОМАЛЬНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ СВЧ ВОЛН ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ЦИКЛОТРОННОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ

Гусаков Е.З., Попов А.Ю.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Evgeniy.Gusakov@mail.ioffe.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.012

Электронный циклотронный резонансный нагрев (ЭЦРН) плазмы широко используется в тороидальных установках с магнитным удержанием плазмы и рассматривается, как основной для применения в ИТЭР с целью нагрева плазмы и подавления неоклассической тиригмоды. В настоящий момент рассматривается возможность резкого увеличения мощности ЭЦРН в ИТЭР с 20 МВт до 60 МВт. Согласно предсказаниям теории, развитой в 80-е годы прошлого века, нелинейные эффекты и, прежде всего, параметрические распадные неустойчивости (ПРН) в условиях экспериментов по ЭЦРН должны быть стабилизированы за счёт сильного конвективного выноса энергии дочерних волн из области распада. Тем не менее, в течение последних 15 лет было получено много экспериментальных свидетельств возбуждения аномальных явлений в ходе ЭЦРН мегаваттного уровня мощности. Наиболее яркими и прозрачными из них являются наблюдения излучения плазмы на частотах, сдвинутых вниз от частоты греющего гиротрона, сделанные сначала на токамаке TEXTOR, а затем на ASDEX-UG и на стеллараторе W-7X. На токамаке ASDEX-UG недавно было обнаружено также и излучение плазмы на частоте равной половине частоты накачки. Убедительная демонстрация эффекта нагрева ионов при ЭЦРН была представлена на токамаке TCV и стеллараторе TJ-II в условиях крайне затруднённого обмена энергией электронов и ионов. Более того, существенное уширение области выделения мощности нагрева по сравнению с предсказаниями линейной теории было продемонстрировано в ЭЦРН экспериментах на стеллараторе L-2M и токамаке T-10.

В настоящем сообщении будет дан обзор экспериментальных наблюдений аномальных явлений при ЭЦРН и представлена теоретическая модель, принимающая во внимание, в отличие от стандартной теории, возможность локализации дочерних волн в случае немонотонного профиля плотности, имеющего место на оси разряда, в магнитном острове, в плазменном филаменте или за счёт эффекта “density pump out” и позволяющая объяснить низко-пороговое возбуждение ПРН. Аномальное излучение плазмы и нагрев ионов в этой модели объясняются, как результат вторичных нелинейных волновых процессов, сопровождающих первичную низко-пороговую ПРН, ведущую к возбуждению запертых в плазме волн. Первичная ПРН в этой модели насыщается как в результате каскада вторичных распадов, так и вследствие истощения волны накачки. При этом аномальное излучение плазмы генерируется при слиянии параметрически возбужденных плазменных волн и волны накачки. Этот механизм позволяет детально объяснить структуру спектра аномального излучения, которое может мешать работе микроволновых диагностик и его высокий уровень. В то же время он предсказывает аномальное поглощение накачки на уровне 10% - 70% полной мощности и объясняет передачу энергии ионной компоненте плазмы поглощением ионных мод, возбужденных в ходе насыщения неустойчивости. В докладе будут представлены результаты детального теоретического анализа аномального излучения наблюдавшегося в токамаке TEXTOR и на стеллараторе W-7X, а также будет предложена интерпретация эффекта аномального уширения профиля выделения мощности при ЭЦРН в стеллараторе L-2M и на токамаке T-10.

Аналитическое рассмотрение эффекта аномального излучения поддержано грантом РФФИ 22-12-00010; численное моделирование выполнено при поддержке ГЗ ФТИ 0040-2019-0023, а код, использованный при анализе насыщения ПРН, разработан в рамках ГЗ ФТИ 0034-2021-0003.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА Т-15МД

¹Анашкин И.О., ¹Андреев В.Ф., ¹Асадулин Г.М., ¹Ахметов Э.Р., ¹Балашов А.Ю.,
^{1,2}Бегишев Р.А., ¹Белов А.М., ¹Бельбас И.С., ⁴Бондарчук Э.Н., ¹Борщеговский А.А.,
¹Горбунов А.В., ¹Горшков А.В., ¹Грашин С.А., ¹Громова А.В., ¹Диас Михайлова Д.Е.,
¹Дрёмин М.М., ^{1,3}Дрозд А.С., ¹Дубиницкий А.Ф., ¹Земцов И.В., ¹Ильин И.С.,
¹Карпов А.В., ¹Качкин А.Г., ^{1,3}Кирнева Н.А., ¹Кислов Д.А., ¹Кочин В.А., ¹Крупин В.А.,
¹Кузнецова Л.К., ¹Левин И.В., ^{1,6}Лисовой П.Д., ¹Лутченко А.В., ¹Машункин М.В.,
⁴Минеев А.Б., ¹Модяев А.Л., ¹Мустафин Н.А., ¹Мялтон Т.Б., ¹Немец А.Р.,
¹Николаев А.В., ¹Новиков В.Н., ¹Ноткин Г.Е., ¹Нургалиев М.Р., ¹Образцов И.С.,
^{1,3}Панфилов Д.С., ¹Пименов И.С., ¹Рой И.Н., ⁵Романников А.Н., ¹Рыжаков Д.В.,
^{1,6}Саврухин П.В., ¹Сарычев Д.В., ¹Сергеев Д.С., ¹Смирнов В.В., ¹Соловьёв Н.А.,
¹Степин А.В., ¹Сушков А.В., ^{1,7}Сычугов Д.Ю., ¹Тарасян К.Н., ^{1,6}Тепикин В.И.,
¹Толпегина Ю.И., ¹Хайрутдинов Э.Н., ¹Хвостенко А.П., ¹Хвостенко П.П.,
¹Чудеснов А.И., ¹Шелухин Д.А., ¹Шестаков Е.А. и коллектив установки Т-15МД

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия,

⁴Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия

⁵Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, Россия,

⁶Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия,

⁷Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.013

Установка Т-15МД – токамак с низким аспектным отношением ($A = 2,2$, $R = 1,48$ м, $a = 0,67$ м), тороидальным магнитным полем до $B_t = 2,0$ Тл, D-образным сечением плазменного шнура с эллиптичностью до 1,8 и треугольностью до 0,4. На токамаке предусмотрены четыре системы дополнительного нагрева плазмы: гиротроны с частотой электронно-циклотронного резонанса, нейтральная инжекция, нагрев на частотах ионно-циклотронного и нижнего гибридного резонансов.

В 2023 году на Т-15МД проведены две экспериментальные кампании с лимитерной конфигурацией плазмы (графитовый лимитер, $a = 0,67$ м) и тороидальным магнитным полем $B_t = 1 - 1,2$ Тл. Для пробоя газа и оптимизации стадии подъема тока использовался гиротрон предыонизации с частотой излучения 82,6 ГГц и мощностью 1 МВт. В ходе экспериментов были получены плазменные разряды с током до 260 кА, температурой $T_e = 3 - 3,5$ кэВ и среднечордовой плотностью $n_e = 6 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$. При токе плазмы 190 кА достигнута рекордная для отечественных токамаков длительность импульса 2 с (рис. 1). В дальнейшем планируется ввод в работу систем дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока, дооснащение токамака диагностикой, установка дивертора и облицовка камеры графитом.

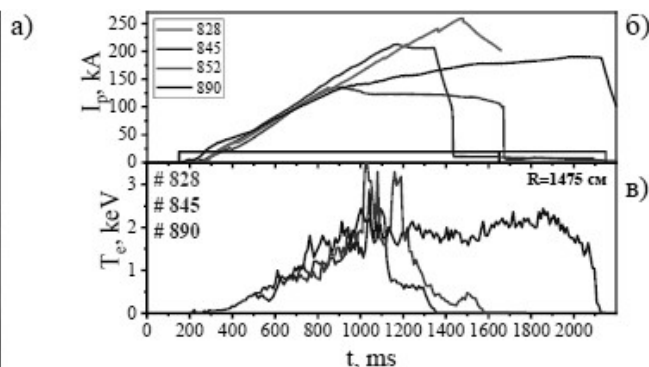
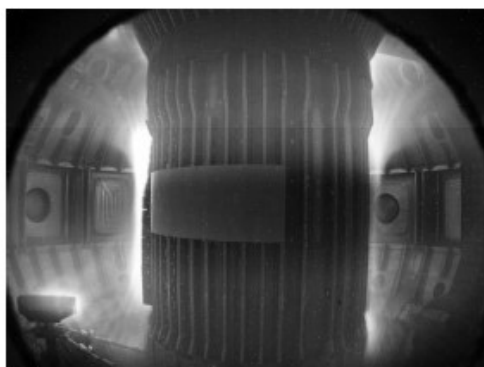


Рисунок 1. Плазменный разряд в Т-15МД: а) плазма в Т-15МД; б) осциллограммы токов плазмы в нескольких импульсах (номера указаны в поле рисунка); в) температура плазмы в центре вакуумной камеры, измеренная диагностикой томсоновского рассеяния

ВТСП В ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ УСТАНОВОК УТС (ПРОЕКТЫ SPARC, TPT, ST-HTS И ДР.)

Запретилина Е.Р., Медников А.А., Родин И.Ю.

*Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: rodin@sintez.niiefa.spb.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.014

Одновременно с продолжением реализации проекта ИТЭР, являющегося флагманом развития национальных и международных программ управляемого термоядерного синтеза (УТС), в базе которых лежат успехи промышленной стадии развития низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), в мире ясно прослеживается увеличение интереса к компактным установкам УТС со сверхпроводниковыми электромагнитными системами (ЭМС), работающими на более высоких уровнях магнитных полей. Эта тенденция сформирована, в основном, двумя факторами: во-первых, результатами технико-экономического анализа инвест-проектов, нацеленных на создание будущих промышленных объектов, таких как «электростанция», показывает необходимость сокращения финансовых затрат и сроков сооружения установок; во-вторых, прогресс в разработке высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2), подтвержденный изготовлением сверхпроводниковых магнитов с рабочими значениями индукции магнитного поля до 30 Тл, дает основание говорить о технической реализуемости амбициозных проектов и стартапов, целевыми параметрами которых являются: конструктивная плотность тока в сверхпроводниковых обмотках 70 – 100 А/мм²; индукция магнитного поля на обмотке 18 – 22 Тл; рабочая температура сверхпроводника 10 – 25 К.

Создание компактных и высокоэффективных ЭМС УТС на основе ВТСП-2 требует новых подходов к решению традиционных задач конструирования обмоток. Главное - обеспечить требуемые плотность тока и механическую прочность конструкции обмотки. Не менее важные задачи: разработка электрических контактных соединений и системы высоковольтной изоляции конструктивных элементов обмотки; выбор конструкции и рабочих характеристик обмоточных ВТСП-2 проводов (ток, индукция магнитного поля, температура и деформация), обеспечивающих требуемый запас в части работоспособности системы в целом; обоснование и выбор принципов диагностики и защиты сверхпроводниковых ЭМС с оценкой тепловыделений в ВТСП-2 проводе и разработкой требований к системе криогенного обеспечения.

Сравнивая технические решения, используемые при создании ряда современных установок, таких как SPARK, TPT, ST-HTS [1–3] и др.; результаты испытаний полномасштабных макетов обмоток и опытных образцов обмоточных проводников из ВТСП-2, изготовленных и испытанных в поддержку этих проектов; а также, анализируя последние результаты эскизного проекта нового отечественного токамака реакторных технологий (ТРТ), авторы статьи попытались выявить основные принципы и критерии проектирования современных компактных ЭМС с сильным магнитным полем, использующих преимущества ВТСП-2.

Литература

- [1]. Creely A.J. et al., Overview of the SPARC tokamak // J. Plasma Phys., v. 86, 2020.
- [2]. Бондарчук Э.Н. и др. Инженерно-технические аспекты электромагнитной системы установки TRT // Физика плазмы, 2021, т. 47, № 12.
- [3]. Tokamak Energy (available at: www.tokamakenergy.co.uk/).

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС МЕГАДЖОУЛЬНОЙ УСТАНОВКИ. РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Бельков С.А., Гаранин С.Г., Деркач В.Н., Шагалкин Ю.В.

*Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
г. Саров, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.015

Установки мегаджоульного класса позволяют получать уникальные экспериментальные данные по поведению вещества в экстремальных состояниях, проводить в лабораторных условиях уточнение и калибровку расчетных моделей, реализовывать программы работ по инерциальному термоядерному синтезу.

В конце прошлого года завершен первый этап создания российской установки этого класса. На сегодня завершен монтаж 32 каналов, создана инфраструктура, обеспечивающая работу установки в целом, и введен в эксплуатацию многоцелевой исследовательский комплекс МИК, на котором начаты эксперименты по физике высоких плотностей энергии. На настоящий момент на МИК проведено более ста экспериментов по нескольким экспериментальным программам.

В докладе будет представлен обзор работ по отработке энергетических характеристик лазерной системы, представлены основные результаты первых экспериментальных кампаний по облучению мишеней разного типа.

О ВОЗМОЖНОМ ЭФФЕКТИВНОМ ПУТИ К СОЗДАНИЮ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА В РОССИИ

Красильников А. В.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.016

В настоящий момент на пути к созданию термоядерного токамака - реактора остаются неразрешенными ряд фундаментальных проблем, прежде всего, таких как: экспериментальная демонстрация квазистационарного термоядерного горения; генерация неиндуктивного квазистационарного тока, разработка плазменных технологий и материалов первой стенки и дивертора. Для их решения создаётся Международный экспериментальный термоядерный реактор ITER, разрабатываются проекты демонстрационных реакторов DEMO, в России разрабатывается Токамак с Реакторными Технологиями TRT, а в Китае начато сооружение токамака BEST (Burning plasma Experimental Superconducting Tokamak). В докладе представлены основные компоненты технологических платформ ITER (сверхпроводящая электромагнитная система (ЭМС) из Nb₃Sn и NbTi, первая стенка из W с покрытием из материала с низким Z, системы дополнительного нагрева плазмы, экспериментальные модули бридерного blanketа, системы управления плазмой и др.), TRT (ЭМС из ВТСП сверхпроводников, опции первой стенки из W с покрытием из В₄C, из композита TiB₂-AlN и жидкометаллическая литиевая, системы дополнительного нагрева и генерации квазистационарного неиндуктивного тока, инновационный дивертор, экспериментальные модули бридерного и гибридного blanketа, реакторосовместимые диагностики и системы дистанционного управления плазмой и др.) и BEST (с генерируемой термоядерной мощностью 20 – 200 МВт, $Q = 1 - 5$, в стационарном управляемом разряде с доминирующим нагревом термоядерными альфа-частицами и технологиями воспроизводства трития в реальном времени) с комплексом термоядерных технологий CRAFT (Comprehensive Research Facility for Fusion Technology). Технологические платформы ITER, TRT и BEST вместе содержат полный, по современным представлениям, набор технологий и производств, требуемых для реализации будущего термоядерного реактора.

Создание и экспериментальная эксплуатация технологических платформ ITER, TRT и BEST, с учётом опыта реализации других крупных термоядерных экспериментов партнёров по ITER, позволит на следующем шаге успешно реализовать сооружение как чистого термоядерного, так и гибридного (синтез-деление) реактора в нашей стране.

Участие России в Проекте BEST позволит российским учёными и инженерам участвовать в экспериментальных исследованиях стационарной термоядерной плазмы с $Q = 5$ в 2028 – 2040 годах на крупнейшем и наиболее близком к реактору (до полноценного начала дейтерий-тритиевых экспериментов на ИТЭР) термоядерном комплексе BEST. В свою очередь, ряд технологий BEST/CRAFT (ВТСП и НТСП проводники, криогеника, системы питания, системы ИЦН, робототехника и др.) могут быть применены при изготовлении систем TRT с колоссальным экономическим эффектом. В дополнение к участию России в Проекте ITER, представляется крайне целесообразным совместное с КНР сооружение TRT и BEST.

**СЕКЦИЯ
«МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПЛАЗМЫ»**

**SECTION
«MAGNETIC CONFINEMENT OF HIGH - TEMPERATURE
PLASMAS»**

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ ОБЛАСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

^{1,2}Аммосов Я.М., ¹Вадимов Н.А., ^{1,3}Виницкий Е.А., ¹Драбинский М.А., ¹Елисеев Л.Г.,
^{1,2}Крохалев О.Д., ^{1,2,3}Мельников А.В., ^{1,2}Саранча Г.А., ^{1,4}Харчев Н.К.,
^{1,5}Шелегеда И.А.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

⁴Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, г. Москва, Россия

⁵Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (НИУ), г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.017

Диагностика зондирования пучком тяжелых ионов (ЗПТИ) позволяет проводить измерения электрического потенциала φ_{pl} , его флуктуаций $\tilde{\varphi}_{pl}$, флуктуаций электронной плотности \tilde{n}_e и полоидального магнитного поля \tilde{B}_p в горячей области плазмы [1]. В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» идёт разработка проекта двойного диагностического комплекса ЗПТИ для токамака Т-15МД.

Важной задачей является определение пространственного разрешения диагностики. Одним из шагов в этом направлении является разработка метода определения формы областей измерения. Для достижения этой цели был разработан программный код на языке программирования Python на основе кода NBP-SOLVER [2].

Трассировка зондирующего пучка конечного диаметра проводится с использованием оптимизированного положения ионопроводов [3]. Такой пучок представим в виде набора тонких пучков (рис. 1а). По совокупности точек ионизации, для траекторий, попавших в щели анализатора, строится выпуклая оболочка с использованием алгоритма Quickhull [4], определяющая форму области измерений (рис. 1б).

Данный метод позволяет визуализировать форму областей измерения ЗПТИ. При дальнейших расчетах с учетом фокусного расстояния и ослабления пучка метод позволит определить объем областей измерения и пространственное разрешение диагностики.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

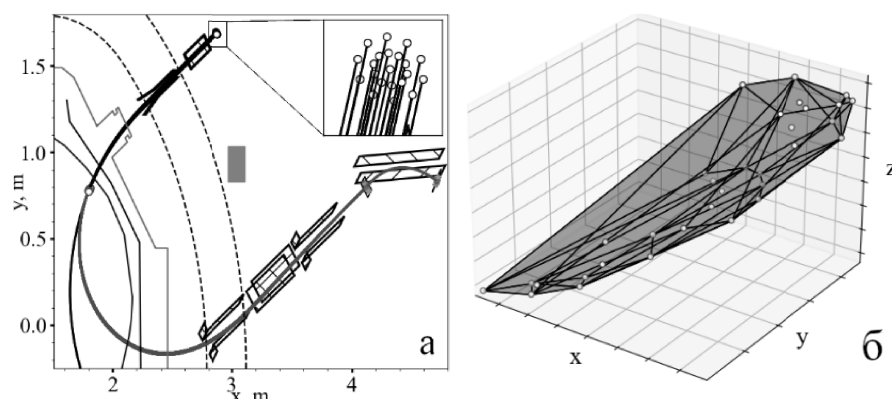


Рис. 1 а) Траектория толстого пучка зондирующих ионов; б) Форма области измерения, построенная на множестве точек ионизации.

Литература

- [1]. Melnikov A. // Symmetry (Basel). 2021. Vol. 13, № 8. DOI: 10.3390/sym13081367.
- [2]. Пин А.М., Khabanov P.O., Melnikov A. V. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. Vol. 1383, № 1. P. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/1383/1/012006.
- [3]. Крохалев О.Д. и др. // XX Всероссийская конференция Диагностика высокотемпературной плазмы, 18-22 сентября. Сочи, 2023. P. 252–254.
- [4]. Barber C.V., Dobkin D.P., Huhdanpaa H. // ACM Trans. Math. Softw. 1996. Vol. 22, № 4. P. 469–483. DOI: 10.1145/235815.235821.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА В ТОКАМАКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

¹Андреанова Р.Р., ¹Хайрутдинов Э.Н., ^{1,2}Докука В.Н., ^{1,2}Хайрутдинов Р.Р.,
²Скопинцев Д.А.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: khayrutdinov_rr@nrcki.ru

²Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, округ Троицк, Россия, e-mail: scopintsev.d.a@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.018

Управление плазмой в токамаке является одной из ключевых задач термоядерного синтеза в настоящее время. Применение нейронных сетей позволит разработать систему магнитного управления положением плазменного шнура в токамаке и осуществить само управление в режиме реального времени [1]. Положение и форма границы плазмы зависит от набора параметров, отвечающих за равновесие плазмы при заданных значениях токов в катушках полоидального поля, полного тока в плазме и профиля его плотности.

Нейронная сеть применена для стабилизации положения плазменного шнура круглого сечения по большому радиусу. В качестве примера рассмотрена установка токамак Т-15МД. При работе нейронной сети, рассчитанные параметры сравниваются с их программными значениями и формируются результирующие сигналы отклонений, которые, в свою очередь, используются для коррекции величин токов в катушках полоидальной системы. Для этого используется алгоритм глубокого детерминированного обучения с подкреплением, который определяет оптимальную методику решения задачи [2].

В данной задаче для детерминированного обучения с подкреплением используется линейная модель плазмы, полученная с использованием кода DINA [3]. При получении линейной модели плазмы используется равновесная конфигурация плазмы круглого сечения, которая реализуется во время инициализации плазмы при физическом пуске токамака.

Проведён сравнительный анализ управления положением плазменного шнура в токамаке с использованием нейронной сети и управления со стандартным PID-регулятором.

Преимущество применения нейронной сети в задачах магнитного управления появляется при управлении формой, током и положением шнура одновременно, когда регулятор управления становится матричным и для его разработки потребуются специальные знания и методы, а также будет необходима ручная корректировка матричного регулятора для каждой точки сценария токамака.

Нейронная же сеть позволит разработать матричное управление для всего сценария.

Литература

- [1]. Degrave J., Felici F., Buchli J. et al. Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning // Nature 602, 414–419, 2022.
- [2]. Лонца А., Алгоритмы обучения с подкреплением на Python, М.: ДМК Пресс, 2020. – 286 с.
- [3]. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. Studies of Plasma Equilibrium and Transport in a Tokamak Fusion Device with the Inverse-Variable Technique. // J. Comput. Physics, 109 (1993) 193–201.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЕВОЙ СТРУИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ ТОКАМАКА «ГЛОБУС-М2»

¹Ануфриев Е.А., ¹Тимохин В.М., ²Толпегина Ю.И., ¹Сергеев В.Ю., ²Горбунов А.В.

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: anufriev_ea@spbstu.ru

²Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва,
Россия, e-mail: tolpegina_yui@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.019

Спектроскопическая диагностика периферийной плазмы с инъекцией нейтрального гелия предоставляет данные о параметрах плазмы, усреднённых вдоль хорд наблюдения [1]. При этом размер светящейся области вдоль этих хорд определяется распределением нейтрального гелия, инжектируемого в плазму, свойствами оптической системы и параметрами плазмы в области излучения. Для правильной интерпретации результатов измерений диагностики необходим аккуратный учет и анализ вклада вышеперечисленных факторов, первые шаги к чему были сделаны в рамках построения модели излучения нейтрального гелия, описанной в данной работе.

С помощью столкновительно-излучательной модели проводится моделирование кадра, полученного спектроскопической диагностикой. Целью работы является улучшение интерпретации результатов измерений диагностики.

Интенсивность излучения линий гелия на матрице камеры определяется его излучательной способностью. Трёхмерное распределение интенсивности излучения для линий нейтрального гелия рассчитывается с помощью динамической столкновительно-излучательной модели наподобие [2], учитывающей процессы ионизации электронным ударом, (де)возбуждение электронным ударом, спонтанные переходы 19 низших состояний нейтрального гелия и параметры инжектируемой струи гелия (скорость и распределение концентрации). Распределение концентрации нейтрального гелия в инжектируемой струе рассчитывается с помощью закона подобия, приведенного в [3] на основе газодинамических расчетов. Распределения электронной концентрации и температуры в области свечения струи получены из моделирования разряда кодом SOLPS-ITER [4].

Излучение, падающее на пиксель матрицы, рассчитывается как интеграл излучательной способности вдоль оси конуса наблюдения для каждого из 260×260 пикселей матрицы камеры ФЛИП4.

Приводятся результаты анализа сравнения расчетных и измеренных изображений излучения гелиевого облака. Обсуждаются возможные источники расхождения и возможности их учета в расчетах.

Работы поддержаны ГК Росатом и Минобрнауки России в рамках Федерального проекта 3 (U3), проект № FSEG-2023-0018 «Разработка и создание систем струйной и пеллет инъекции с повышенными производительностью и ресурсом».

Литература

- [1]. Тимохин В.М. и др. // Письма в ЖЭТФ, 116:5 (2022), 292 – 299.
- [2]. Muñoz Burgos J.M. et al. // Phys. Plasmas 19, 012501 (2012).
- [3]. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, формула (4.18), стр. 81 (1984).
- [4]. Rozhansky V.A. et al., Nucl. Fusion 41, 387 (2001).

РЕГИСТРАЦИЯ ВНУТРЕННЕГО ТРАНСПОРТНОГО БАРЬЕРА С ПОМОЩЬЮ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЙНИЯ НА ТОКАМАКЕ T-10

¹Асадулин Г.М., ^{1,2}Кирнева Н.А., ¹Бельбас И.С., ¹Горшков А.В., ^{1,2}Панфилов Д.С.,
¹Крылов С.В., ¹Немец А.Р., ¹Сергеев Д.С., ¹Соловьев Н.А.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.020

В 2016 году на токамаке T-10 была модернизирована диагностика томсоновского рассеяния [1]. Основу обновленной диагностики томсоновского рассеяния (ТР) на установке T-10 составляет 100-Гц Nd:YAG лазер, выдающий в импульсе до 2,5 Дж энергии на второй гармонике, $\lambda = 532$ нм. Для регистрации используется телевизионная система на основе CMOS камеры и усилителя яркости (ЭОП). Диагностика использовалась для измерения электронной температуры в трех экспериментальных кампаниях. Новые диагностические возможности модернизированной системы томсоновского рассеяния на токамаке T-10 позволили наблюдать эволюцию профиля электронной температуры плазмы на протяжении всего плазменного разряда с пространственным разрешением до 5 мм.

В работе продемонстрировано формирование областей с повышенным градиентом температуры, которое интерпретируется как формирование внутреннего транспортного барьера, в режимах с нецентральной электронно-циклотронной генерацией тока, r_{cd} от 7,5 до 10 см. Значения нормализованных градиентов в зоне барьера достигали $R/L_{Te} \sim 20$, что заметно превышает характерные величины для L-моды, $R/L_{Te} \leq 10$.

Для определения положения транспортного барьера относительно положения рациональных поверхностей были выполнены расчеты эволюции профиля тока и профиля фактора запаса устойчивости q с помощью транспортного кода ASTRA [2]. Проведенное моделирование показало, что включение нецентрального ЭЦ нагрева и генерации тока приводит к снижению магнитного шира в зоне вклада мощности. В рассматриваемых экспериментах она соответствует области вблизи поверхности $q = 1$. Снижение магнитного шира приводит к разрежению рациональных магнитных поверхностей. Это обуславливает формирование транспортного барьера в зоне слабого шира вблизи рациональной поверхности в соответствии с современными теоретическими представлениями [3]. Оценки эффективного коэффициента электронной теплопроводности (χ_{eff}) из энергобаланса показывают снижение χ_{eff} в области повышенного градиента электронной температуры, что также свидетельствует о формировании транспортного барьера.

Полученные в работе результаты не противоречат существующим теоретическим представлениям о механизме формирования ВТБ и согласуются с более ранними результатами T-10 [4].

Литература

- [1]. Asadulin G.M., Bel'bas I.S., Gorshkov A.V. // Fusion Eng. and Design. 2022. V. 177. 113066.
- [2]. Pereverzev G.V., Yushmanov P.N. Preprint IPP 5/98. February, 2002.
- [3]. Razumova K.A. et al // Nucl. Fusion. 2004. V.44. 1067.
- [4]. T-10 Team (prepared by D.A. Kislov) // Nucl. Fusion. 2001. 1473.

ВЛИЯНИЕ ТОРОИДАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА ТОРОИДАЛЬНЫЕ АЛЬФВЕНОВСКИЕ МОДЫ В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

¹Балаченков И.М., ¹Бахарев Н.Н., ¹Гусев В.К., ¹Жильцов Н.С., ¹Курский Г.С.,
¹Киселев Е.О., ¹Минаев В.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Петров Ю.В., ²Пономаренко А.М.,
¹Сахаров Н.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Щеголев П.Б., ^{1,2}Яшин А.Ю.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург,
 Российская Федерация, balachenkov@mail.ioffe.ru

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.021

На токамаке Глобус-М2 [1] и ранее на токамаке Глобус-М [2] в режимах с инжекцией атомов высокой энергии наблюдались тороидальные альфвеновские моды (ТАЕ) [3, 4]. ТАЕ наблюдались магнитными зондами и другими диагностиками в частотном диапазоне сотен кГц как в виде относительно коротких вспышек колебаний длительностью 0,1 – 0,5 мс, так и в виде продолжительных мод (до 10 мс). Продолжительные ТАЕ представляют интерес с точки зрения применения этих сигналов в диагностических целях, так как в некоторых режимах они наблюдаются в виде неэквидистантных гармоник, частота которых выражается по формуле [5]: $f_{lab}^n = f_{TAЕ} + n \cdot f_{Doppler}$, где f_{lab}^n наблюдаемая частота n-й гармоники, $f_{TAЕ}$ – частота первой гармоники ТАЕ, а $f_{Doppler}$ – доплеровский сдвиг, связанный с тороидальным вращением плазмы. Таким образом, наблюдение нескольких гармоник позволяет определить как несдвинутую частоту ТАЕ, так и скорость вращения плазмы. Данная техника магнитной спектроскопии применялась ранее как на классических токамаках, таких как, DIII-D [5], так и на сферических, например, на установке NSTX [6].

В настоящей работе измерения скорости вращения, полученные описанным методом, сравнивались с прямыми измерениями скорости тороидального вращения, полученными при помощи диагностики CXRS [7] на радиусе локализации моды, а частота $f_{TAЕ}$ сравнивалась с частотой ТАЕ, также вычисленной на радиусе локализации. Радиальное распределение интенсивности моды определялось при помощи диагностики доплеровского обратного рассеяния. При сравнении также учитывалась поправка [5, 8] на разность скоростей вращения примеси, линия которой используется в спектроскопических измерениях диагностикой CXRS, и основного компонента плазмы.

В результате было установлено хорошее соответствие частоты $f_{TAЕ}$, определенной в эксперименте, расчетной частоте первой гармоники ТАЕ на радиусе локализации. Для скорости вращения, измеренной при помощи CXRS и полученной методом магнитной спектроскопии, наблюдается удовлетворительное соответствие. В работе обсуждаются причины возможных отклонений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-72-20007.

Литература

- [1]. V.V. Minaev et al. // Nucl. Fusion 57 066047 (2017).
- [2]. В.К. Гусев и др. // Журнал Технической Физики 1999 Т. 69 В. 9 С. 58–62.
- [3]. Yu.V. Petrov et al. // J. Plasma Phys. 81 515810601 (2015).
- [4]. N.N. Bakharev et al. // Phys. Plasmas 30 072507 (2023).
- [5]. E.J. Strait et al. // Plasma Phys. Control. Fusion 36 1211 (1994).
- [6]. M. Podest'a et al. // Nucl. Fusion 52 094001 (2012).
- [7]. А.Ю. Тельнова и др. // Письма в ЖТФ, 2021, Т. 47 В. 9 С. 25–28.
- [8]. Y.V. Kim, P.H. Diamond, and R.J. Groebner // Phys. Fluids B 3 2050 (1991).

ПРИМЕНЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭВОЛЮЦИИ РАДИАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М

Белокуров А.А., Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Жубр Н.А., Корнев В.А.,
Лебедев С.В., Разуменко Д.В., Смирнов А.И., Тукачинский А.С., Шергин Д.А.,
Шувалова Л.К.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: belokurov@mail.ioffe.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.022

Нейтральная инжекция является эффективным методом нагрева плазмы, генерации вращения и доставки топлива в центральную область плазменного шнура. Ко-инжекция (по току плазмы) более эффективна с точки зрения захвата быстрых частиц по сравнению с контр-инжекцией (против направления тока плазмы), однако влияние ко-инжекции на удержание плазмы определяется совместным эффектом от генерации положительного E_r за счет вращения плазмы и генерации отрицательного E_r за счет потерь быстрых частиц.

Как было показано ранее [1], в случае с низкой концентрацией плазмы (среднехордовая концентрация $n < 1,2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$) ко-инжекция оказывается малоэффективной с точки зрения нагрева плазмы, генерации вращения и инициирования L-H перехода, т.к. потери, в первую очередь на пролет, велики. Это было заметно по отсутствию эволюции потенциала, измеренного с помощью диагностики пучком тяжелых ионов, при нейтральной инжекции [1], в то время как при ко-инжекции можно ожидать как положительного прироста потенциала, связанного с генерацией вращения плазмы удерживаемыми быстрыми частицами, так и отрицательного, связанного с потерями быстрых ионов с первой орбиты.

В сценариях с ко-инжекцией при среднехордовой концентрации $n > 2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ (в момент начала нейтральной инжекции) были проведены измерения эволюции потенциала плазмы с помощью диагностики пучком тяжелых ионов (ДПТИ). Пучок нейтральных атомов инжектировался в плазму в разрядах с различной концентрацией $(2 - 3) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Измерения показывают, что при большей концентрации плазмы после нейтральной инжекции происходит эволюция потенциала плазмы в сторону более положительных значений, с изменением в диапазоне 100 – 300 В. Это говорит о том, что в плазме появляется дополнительное тороидальное вращение, связанное с быстрыми ионами.

С помощью ДПТИ были проведены прямые измерения радиального электрического поля в омических разрядах токамака ТУМАН-3М в двухточечной схеме зондирования. В данной схеме возможно измерять потенциал плазмы в двух соседних точках и таким образом локально измерять радиальное электрическое поле с пространственным разрешением, равным расстоянию между объемами вторичной ионизации (для характерных разрядов токамака ТУМАН-3М – 1 – 3 мм). В омических разрядах токамака ТУМАН-3М в водороде и дейтерии с близкими параметрами плазмы наблюдалась схожая эволюция радиального электрического поля: значения $E_r = (-4) - (-8) \text{ кВ/м}$ на малом радиусе $r = 15 \text{ см}$ близки к оценкам для локального неоклассического E_r в омическом разряде в стационарной фазе. Увеличение концентрации плазмы при газонапуске приводило к эволюции E_r в сторону более отрицательных значений, что согласуется с представлением о зависимости неоклассического радиального электрического поля от градиента концентрации.

Работа стандартных диагностик токамака ТУМАН-3М осуществляется при поддержке гос. контракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2019-0023. Эксперименты с нейтральной инжекцией осуществлены при поддержке гос. контракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0034-2021-0001. Исследования с помощью ДПТИ на токамаке ТУМАН-3М обеспечиваются РФФИ (проект 22-12-00062).

Литература

[1]. Белокуров А.А. и др. // Письма в ЖТФ, 2022, Т. 48, Вып. 24.

ВЫБОР СХЕМЫ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНИКА НЕЙТРАЛЬНОГО ПУЧКА ДЛЯ ИНЖЕКТОРОВ ТОКАМАКА Т-15МД

Бочарова Е.В., Баркалов К.Е., Ерёмин В.А., Никулин В.А.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.023

Инжектор нейтрального пучка – система, используемая для нагрева и поддержания тока в термоядерных установках типа токамак с помощью ввода быстрых атомов водорода и его изотопов. Приемник нейтрального пучка является одним из элементов тракта инжектора. Он используется для принятия мощности пучка при настройке инжектора, выводе его на рабочий режим и диагностике параметров. В режиме ввода пучка в плазму токамака панели калориметра открываются [1].

Расчетная плотность мощности пучка, инжектируемого в токамак Т-15МД, достигает десятков МВт/м², то есть приемник будет работать в режимах критических тепловых нагрузок, что требует использования трубчатой схемы и V-образной формы калориметра с двумя панелями, аналогично приемникам инжекторов токамака ИТЭР [2]. Наклон панелей относительно оси пучка позволяет снижать приходящую плотность мощности до величин не выше 10 МВт/м². Каждая панель представляет из себя набор трубок из хромоциркониевой бронзы, расположенных в два слоя. Передние трубки частично перекрывают задние, предотвращая проникновение частиц пучка сквозь панели. Для турбулизации потока в трубки устанавливаются шнековые интенсификаторы.

Проведен анализ термомеханических параметров трубок различных диаметров. Тепловой расчет проводился методом адиабатических сечений с использованием аналитических формул, базирующихся на экспериментальных исследованиях [3]. Также рассчитаны поля температур и напряжений в трубках и их деформация. В результате выбраны трубки с внешним диаметром равным 14 мм, так как они достаточно эффективно обеспечивают снятие всей приходящей мощности при наименьших расходах воды.

Для диагностики получаемого профиля мощности пучка в тени трубок переднего слоя устанавливается набор коллекторов, принимающий вторично-эмиссионные электроны [4]. Произведена численная оценка полного тока электронов на коллектор в зависимости от расстояния между слоями трубок. Было выбрано расстояние 5 мм, так как оно обеспечивает достаточный ток, позволяющий производить диагностику и настройку прицела оси пучка на вход токамака.

Литература

- [1]. Семашко Н.Н., Владимиров А.Н., Кузнецов В.В. и др., Инжекторы быстрых атомов водорода, М.: Энергоиздат, 1981, 168 с.
- [2]. Hensworth R.S. et al. Overview of the design of the ITER heating neutral beam injectors // New Journal of Physics, 2017, Т. 19, № 2, 21 с.
- [3]. Ягов В.В. Теплообмен при развитом пузырьковом кипении жидкостей // Теплоэнергетика, 1988, № 2, 4 с.
- [4]. Barkalov K.E., Barkalov E.E., Panasenkov A.A, Experimental investigation of a high power long-pulse neutral beam profile diagnostic based on secondary electron emission // AIP conference proceedings, 2018, Т. 2052, № 1, 7 с.

ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС И ЕГО ОСОБЕННОСТИ НА УСТАНОВКЕ ТОКАМАК Т-15МД (К ЭКСПЕРИМЕНТАМ ПО ПРЕДЫОНИЗАЦИИ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ ЭЦР)

Борщеговский А.А.

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва,
Россия,*

e-mail: Borschegovskiy_AA@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.024

В весенне-летний период 2023 г. на установке Т-15МД была проведена первая серия экспериментов по предыонизации рабочего газа (H_2) на второй гармонике ЭЦР. Подобные эксперименты ранее проводились на установках Т-7 и Т-10 [1 – 2].

Сфокусированное СВЧ-излучение на частоте 82,6 ГГц с вертикальной линейной поляризацией вектора \vec{E} волны вводилось под тороидальным углом $\psi = 18^\circ$ со стороны слабого магнитного поля. Значение индукции поля на оси камеры составляло величину $H_0 = 1,0 - 1,1$ Тл. Зона «холодного» резонанса на данной частоте располагалась на стороне сильного магнитного поля. Максимальная плотность мощности в поперечном сечении СВЧ-пучка при $\rho_0 = 2,7$ см в этой области составляла величину $p = 38$ кВт/см², при полном значении вводимой мощности $P = 0,87$ МВт. Амплитуда вектора электрического поля волны \vec{E} достигала 3,8 кВ/см. При указанных параметрах и наличии вертикального магнитного поля был успешно произведен ЭЦР-пробой, который был зарегистрирован быстродействующими камерами. Плазменный разряд поддерживался на протяжении всего импульса гиротрона. Проведен анализ энергии электронов в зоне электронно-циклотронного резонанса при выполнении условия доплеровского синхронизма в реальной геометрии ввода СВЧ-излучения на установке токамак Т-15МД. Основанием для проведённых исследований послужил тот факт, что на стационарной стадии разряда, при отсутствии электрических полей токамака во внутреннем объеме вакуумной камеры, были зарегистрированы высокоэнергичные кванты рентгеновского излучения в диапазоне 2 – 3 МэВ [3]. В данной работе обсуждается возможность образования электронов с такими энергиями.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Alikaev V.V., Borschegovskii A.A., Chist'akov V.V., et al. «Experiments on Current Drive and Plasma Heating by LH and EC Waves in the T-7 Tokamak» // Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. Vienna: IAEA, 1987, V. 1, P. 533–544.
- [2]. Borshchegovskiy A., Dremine M., Il'in V., Kirneva N., Kislov A., Krupin V., Maltsev S., Pavlov Y., Petrov D., Roy I., Shelukhin D., Sokolov M., «Optimization of ECR-breakdown and plasma discharge formation on T-10 tokamak, using X-mode second harmonic of ECR» // EPJ Web of Conferences 32, 020, 2012.
- [3]. Шестаков Е.А., Саврухин П.В., Лисовой П.Д. и др., «Диагностика надтеплового и жёсткого рентгеновского излучения на токамаке Т-15МД» // ДВП 2023, Тезисы докладов, С. 129 – 131.

СКЕЙЛИНГ ПОДОБИЯ ТОКАМАКОВ КАДОМЦЕВА ДЛЯ ГИБРИДНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

^{1,2}Будаев В.П.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, Budaev_VP@nrcki.ru,

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.025

Для разработки проекта гибридного термоядерного реактора (ГТР) необходимо использовать обоснованные скейлинги (закономерности) на основе анализа многочисленных экспериментов на токамаках с различными параметрами. Наиболее общий фундаментальный подход рассмотрения токамака как сложной системы был предложен в классических работах Бориса Борисовича Кадомцева [1, 2], рассмотревшего подобие токамаков на основе анализа размерностей (аналог симметричного подхода) и свойств самоорганизации в сложной системе с громадным числом степеней свободы, какой является плазма в токамаке. При анализе размерностей в [1] Б.Б. Кадомцев рассмотрел идеализированную ситуацию чистой (без примесей) плазмы в токамаке, с одиннадцатью основными величинами: ($a, R, B_z, B_p, c, e, m, M, T_e, T_i, n$). На основе такого анализа для параметров центральной плазмы токамака предложен скейлинг подобия токамаков, S_K , характеризующий зависимость от аспектного отношения A , большого радиуса R , тороидального магнитного поля B_z на оси, атомной массы ионов M семейства плазменных систем, эквивалентных с точки зрения удержания энергии, см. [3, 4]:

$$S_K = RB^{4/5} A^{-3/2} M^{-3/5} . \quad (1)$$

Поскольку продолжают обсуждения преимуществ токамаков с различными значениями A при одинаковых магнитном поле и токе, возникает вопрос о выборе параметров гибридного термоядерного реактора. В [4,5] предложен модифицированный скейлинг с учетом характеристик термоядерного выхода – усиления мощности Q для токамаков-реакторов. Вместе с тем, такая модификация не учла существенные процессы, определяющие устойчивость и эффективность, в том числе, при стационарной эксплуатации, такой сложной системы как токамак: взаимодействие плазма-стенка и фундаментальные свойства сильной турбулентности плазмы, влияющей на динамику системы, выявленные в последние годы по результатам масштабных экспериментальных исследований [6]. Для дальнейшего развития подхода, рассматривающего подобие токамаков, следует учесть параметры взаимодействия плазма-стенка и турбулентности плазмы. В настоящей работе предложено рассмотреть модифицированный скейлинг Кадомцева S_{K-P} для реактора-токамака:

$$S_{K-P} = RB^x A^y Q^z , \quad (2)$$

где показатели x, y, z будут функциями от параметров взаимодействия плазма-стенка и параметров сильной турбулентности плазмы, таких как скейлинги спектров турбулентности и аномального переноса плазмы (супердиффузии), скейлинги эрозии обращенных к плазме материалов камеры, влияющей на поступление примесей в разряд, характеристики дуговых процессов на стенке, протекание токов из плазмы на поверхность и неамбиполярный перенос. В этом числе, следует сохранить учёт эффектов нарушения квазинейтральности в приповерхностном слое на границе разряда, т.е. в проблеме подобия токамаков сохранить рассмотрение числа частиц N_D в сфере с дебаевским радиусом.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Кадомцев Б.Б. // Физика плазмы, 1975, 1, 4, 531-535.
- [2]. Tokamak plasma: a complex physical system. В.В. Kadomtsev, Taylor & Francis, 1992.
- [3]. Romanelli M. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion, 2021, 63, 125004.
- [4]. Orsitto F.P. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, 44, 2, 78.
- [5]. Orsitto F. P. et al. // 47th EPS Conf. Plasma Phys., June 21-25, 2021, P2.1002.
- [6]. Будаев В.П. и др. // УФН, 2011, 181, 905–952.

ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПЛАЗМЫ В ДЛИННОЙ ДИАМАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Черноштанов И.С.

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия,
e-mail: I.S.Chernoshtanov@inp.nsk.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.026

Одно из преимуществ линейных осесимметричных систем заключается в принципиальной возможности работы в режимах с высоким относительным давлением плазмы β . В предельном случае, когда давление плазмы равно давлению магнитного поля (т.н. режим диамагнитного удержания), происходит полное вытеснение магнитного поля из занятой плазмой области и формируется так называемый диамагнитный пузырь [1]. Теоретические оценки показывают принципиальную возможность существенного (по крайней мере, на порядок) увеличения времени жизни частиц при переходе в диамагнитный режим [1, 2]. В настоящее время эксперименты по диамагнитному удержанию плазмы планируются на установке КОТ в ИЯФ СО РАН [3], удержание плазмы с предельно высоким давлением исследуется на установке C2-W компании Tri Alpha Energy. Следует отметить эксперимент по формированию популяции быстрых ионов с высоким относительным давлением на установке 2ХИВ [4] и эксперименты по удержанию плазмы с высоким β в каспах [5].

В настоящее время отсутствуют систематические данные о кинетических неустойчивостях и аномальном транспорте при $\beta \approx 1$. На установке 2ХИВ наблюдались колебания с частотой порядка циклотронной частоты ионов, вызывавшие аномальное рассеяние ионов и ограничивавшие давление плазмы. В каспах наблюдались неустойчивости, связанные с дрейфом электронов в переходном слое, приводившие к уширению слоя и ограничившие время жизни плазмы [5, 6]. Теоретически устойчивость колебаний в длинной ловушке с тонким слоем быстрых ионов исследована в [7].

В докладе обсуждаются механизмы возбуждения кинетических неустойчивостей в осесимметричной диамагнитной ловушке, заполненной холодной мишенной плазмой; диамагнитный ток в пузыре поддерживается популяцией быстрых ионов. Пренебрегается продольной неоднородностью плазмы, при этом возмущение электрического поля можно искать в виде $E_0 e^{ikz+im\theta-i\omega t}$. Возмущение функции распределения ионов находится из линеаризованного уравнения Власова, для решения которого используется разложение возмущенных величин в ряд Фурье по фазам радиальных и азимутальных колебаний; такой подход позволяет явно учесть сложную картину невозмущенного движения ионов.

Рассматриваются колебания с $m = 0$ (осесимметричные волны, соответствуют Геодезическим акустическим модам, наблюдаемым на установке ГДЛ) и $m = 1$ (соответствуют альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости). Обсуждаются зависимости частот и инкрементов от параметров плазмы, прослежено изменение характеристик неустойчивостей при переходе от плазмы с умеренным давлением к диамагнитному удержанию.

Литература

- [1]. A.D. Beklemishev // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. P. 082506, doi: 10.1063/1.4960129
- [2]. И.С. Черноштанов // Физика плазмы. 2022. № 2. С. 99, doi: 10.31857/S0367292122020056
- [3]. В.В. Гамов и др. // Труды 51-й Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, 2024.
- [4]. W.C. Turner, et. al. // Nucl. Fusion. 1989. V. 19. P. 8, doi: 10.1088/0029-5515/19/8/002
- [5]. M.G. Haines // Nucl. Fusion. 1977. V. 17. P. 811, doi: 10.1088/0029-5515/17/4/015
- [6]. М.С. Иоффе и др. В сб. Итоги науки и техники. Физика плазмы, т. 9, под. ред. В.Д. Шафранова. М.: ВИНТИ, 1989
- [7]. H.W. Wong et. al. // Phys. Fluids B: Plasma Phys. 1991. V. 3. P. 2973, doi: 10.1063/1.859931

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ИНКРЕМЕНТА НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА

^{1,2}Чукашев Н.В., ^{1,3}Пустовитов В.Д.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: chukashev_nv@nrcki.ru

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.027

Современная аналитическая теория привлекает для расчётов инкремента неустойчивости вертикального положения плазмы (Vertical Displacement Event, VDE) модели равновесия разного уровня сложности [1 – 4]. Простейшая из них основана на так называемом приближении «жестких стержней», в котором плазма и стенка заменяются простыми параллельными проводниками [1, 2]. Взаимодействие плазмы и стенки описывается амперовскими силами притяжения или отталкивания токов. Такая модель позволяет ухватить качественные закономерности динамики проводника, имитирующего плазменный шнур в квадрупольном магнитном поле, но предсказывает идеальную неустойчивость даже в случае, когда плазма окружена проводящим кожухом.

Для учёта реакции вакуумной камеры на вертикальное смещение плазмы ранее использовалась модель равновесия Гаджевского для прямого плазменного шнура с эллиптической границей и однородной плотностью тока [5]. Стенка рассматривалась как тонкая оболочка, сечение которой имеет форму эллипса, конфокального границе плазмы. В литературе известны всего два примера [3, 4], когда описанный подход применялся для расчёта инкремента VDE в токамаке с резистивной стенкой, однако обе работы дают разные результаты. При этом провести их исчерпывающее сравнение не представляется возможным, поскольку в [3] формула для инкремента вертикальной неустойчивости даётся без вывода.

В подобной ситуации единственным способом установления верного результата является вычисление инкремента неустойчивости с помощью альтернативного метода. В нашей работе для этого предлагается использовать метод функции Грина в сочетании с недавно развитой моделью равновесия [6]. Во-первых, это позволит обобщить ранее полученные результаты на случай произвольной плотности тока в плазме. Во-вторых, вместо граничного условия на стенке, связывающего внешнее решение задачи равновесия с диффузией магнитного потока через проводник [3, 4], используется интегральное уравнение динамики токов индукции. Его главным преимуществом является возможность избавиться от нефизических ограничений на геометрию задачи в виде конфокальности границы плазмы и стенки, а также развитая техника нахождения аналитических решений [6].

Литература

- [1]. Kiramov D.I., Breizman B.N. // Phys. Plasmas, 2017, 24, 100702.
- [2]. Pfefferle D., Bhattacharjee A. // Phys. Plasmas, 2018, 25, 022516.
- [3]. Wesson J.A. // Nucl. Fusion, 1978, 18, 87.
- [4]. Barberis T. et al. // J. Plasma. Phys., 2022, 88, 905880511.
- [5]. Gajewski R. // Phys. Fluids, 1972, 15, 70.
- [6]. Pustovitov V.D., Chukashev N.V. // Phys. Plasmas, 2023, 30, 042505.

ПОЛНОВОЛНОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО-ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ В УСТАНОВКЕ ГДМЛ

¹Чувакин П.А., ¹Господчиков Е.Д., ²Соломахин А.Л., ¹Шалашов А.Г.

¹*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия,
e-mail: p.chuvakin@ipfran.ru*

²*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.028

Газодинамическая многопробочная ловушка (ГДМЛ) – это открытая ловушка нового поколения для удержания субтермоядерной плазмы, концепция которой развивается в ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Целью проекта является обоснование возможности создания термоядерной системы на основе открытой магнитной ловушки: источника нейтронов и, в перспективе, термоядерного реактора. Проект ГДМЛ должен позволить изучить новые методы удержания плазмы и продемонстрировать существенное увеличение эффективности открытой ловушки [1].

Основным методом нагрева плазмы в таких системах является наклонная инжекция мощных пучков нейтральных частиц, которые захватываются в ловушке в виде ионов с большой энергией. В результате в плазме формируются две ионные компоненты: тёплые ионы мишенной плазмы и анизотропная популяция быстрых ионов. Именно быстрые ионы обеспечивают протекание термоядерных реакций в плазме. В подобных системах с двухкомпонентной плазмой время торможения анизотропной популяции быстрых ионов определяется их столкновениями с электронами. Поэтому для увеличения времени жизни быстрых ионов и, тем самым, для увеличения эффективности ГДМЛ как термоядерной системы ключевой задачей является увеличение электронной температуры. Наиболее прямым методом повышения электронной температуры является электронный циклотронный резонансный (ЭЦР) нагрев электронов излучением мощных гиротронов. Возможность достижения стационарного уровня температуры электронов в 1кэВ в открытой магнитной ловушке за счёт дополнительного ЭЦР нагрева плазмы на первой гармонике была продемонстрирована на установке предыдущего поколения ГДЛ [2].

Геометрооптическое моделирование показало, что в установке ГДМЛ возможен эффективный ЭЦР нагрев на второй гармонике, что позволит перейти к большим плотностям плазмы по сравнению с установкой ГДЛ и использовать ЭЦР нагрев в планируемом режиме работы установки ГДМЛ [1]. Однако резонансный характер взаимодействия греющего СВЧ-излучения с субтермоядерной плазмой может приводить к нарушению ВКБ-приближения и, как следствие, к появлению существенного взаимодействия нормальных волн. Наиболее практически значимым результатом такого взаимодействия может быть отражение греющей электромагнитной волны от резонансной области, что может существенно изменить оценку эффективности нагрева [3-4]. В данной работе было проведено полноволновое моделирование ЭЦР взаимодействия греющей волны на второй гармонике с цилиндрически-неоднородной плазмой с параметрами, ожидаемыми в установке ГДМЛ. Были получены зависимости коэффициентов поглощения для различных магнитных конфигураций от температуры и концентрации плазмы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-20139).

Литература

- [1]. Сковородин Д.И. и др. // Физика плазмы, 2023, Т. 49, № 9, С. 831-884.
- [2]. Vagryansky P. A. et al // Phys. Rev. Lett. 2015 V.114, P. 205001
- [3]. Звонков А.В. // Физика плазмы, 1983, Т. 9, С.547.
- [4]. Господчиков Е.Д. и др. // Физика плазмы, 2023, Т. 49, № 10, С. 953-963.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФУЗИИ И КОНВЕКЦИИ В ПЛАЗМЕ T-10 ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ ЭЦР НАГРЕВЕ ПОСЛЕ ЛИТИЕЗАЦИИ КАМЕРЫ

Андреев В.Ф., Асеев А.С., Данилов А.В., Днестровский Ю.Н.,
Лысенко С.Е., Рыжаков Д.В.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» г. Москва,
Россия, e-mail: danilov_AV@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.029

На токамаке T-10 были проведены эксперименты по изучению эффекта выноса плотности плазмы из области ЭЦР нагрева («density pump-out») после литиезации камеры. Были получены два квазистационарных состояния по плотности плазмы на омической стадии перед включением ЭЦР нагрева и на стадии ЭЦР нагрева [1] (рис. 1). Это позволило найти и сравнить коэффициенты диффузии и пинчевые скорости до и после включения ЭЦР нагрева и сделать вывод о влиянии нагрева на аномальный перенос частиц. Моделирование проводилось для двух серий импульсов T-10 №№63332 – 63335 и №№63339 – 63343. В обеих сериях при $t = 700$ мс включался центральный ЭЦР нагрев мощностью 1,1 МВт в первой серии и 0,55 МВт во второй. Ток плазмы в обеих сериях составлял 180 кА, а средняя плотность плазмы варьировалась в пределах $1,5 - 3,8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Для численного моделирования использовался код ASTRA с Транспортной Моделью Канонических Профилей (ТМКП) [2]. Решались уравнения для температуры электронов и ионов, плотности электронов и плотности тока плазмы. При моделировании средняя плотность частиц подстраивалась к ее экспериментальному значению, что позволило определить источник частиц. Коэффициент диффузии, скорость пинчевания и источник частиц находились для двух моментов времени на квазистационарных стадиях разрядов.

Показано, что при ЭЦР нагреве коэффициент диффузии уменьшается с ростом плотности плазмы, но остается в несколько раз больше, чем на омической стадии. Скорость пинчевания частиц уменьшается с ростом плотности вплоть до некоторого критического значения плотности, выше которого она начинает расти для обеих мощностей нагрева (рис. 2). Такая зависимость коэффициентов переноса может объяснить тот факт, что с ростом плотности эффект «density pump out» сначала возрастает до некоторого критического значения плотности, а потом падает [1]. Для более аккуратного исследования данного эффекта планируется провести анализ большего числа импульсов с различными параметрами.

Работа выполнена в рамках Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт». Моделирование поддержано РНФ, проект 23-72-00042.

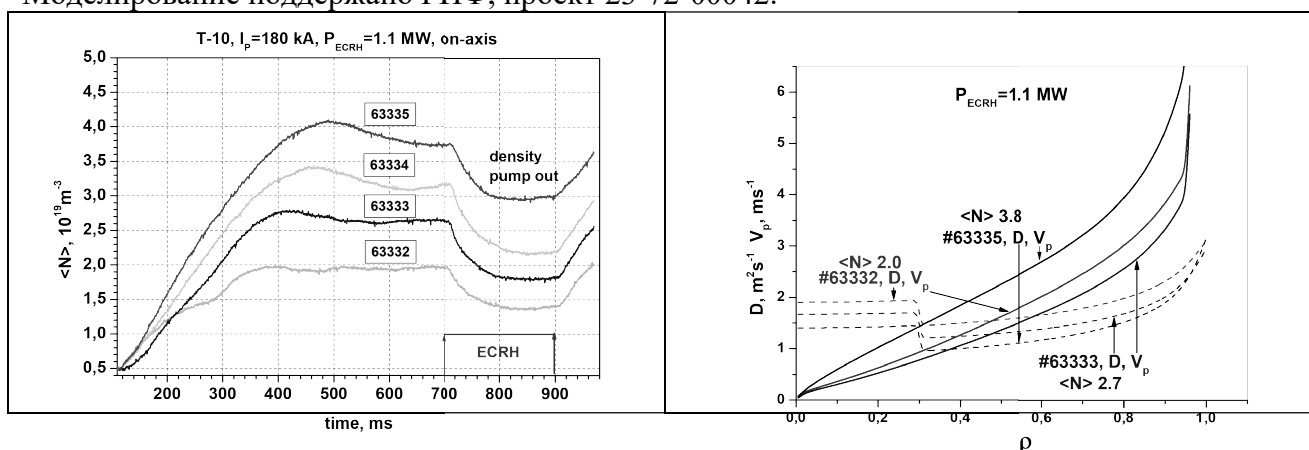


Рис. 1

Рис. 2

Литература

- [1]. Andreev V.F. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion, 2016, 58, 055008.
- [2]. Днестровский Ю.Н., Самоорганизация горячей плазмы, 2013, М: НИЦ «Курчатовский институт», 172 с.

ВЛИЯНИЕ ВСТРЕЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА НА ФОРМИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНЫЙ ТОК ИОННОГО ПУЧКА МОЩНОГО АТОМАРНОГО ИНЖЕКТОРА

¹Дейчули П.П., ¹Бруль А.В., ¹Вахрушев Р.В., ¹Дейчули Н.П., ^{1,2}Орешонок В.В.,
¹Ращенко В.В., ^{1,2}Сорокин А.В., ^{1,2}Ступишин Н.В.

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: pdeichuli@inp.nsk.su*

²*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.030

Атомарные инжекторы широко применяются в термоядерных исследованиях как один из самых эффективных методов нагрева плазмы. Для инжекторов на положительных ионах рабочая плотность тока и, соответственно, мощность инжектора ограничивается чайлд-ленгмюровским предельным током $j_{ч-л}$. Оптимальная плотность тока, когда расходимость пучка минимальна, определяется компромиссом между фокусирующей геометрией электродов и эмиссионной границы с одной стороны и влиянием объемного заряда с другой, на практике она составляет $\sim 0,7 j_{ч-л}$. Известны способы преодолеть предельный ток $j_{ч-л}$ однополярного вакуумного диода. Так в биполярном диоде со встречными ионным и электронным током [1], если нет ограничения по эмиссии с катода и анода, достигается значение, превышающее чайлд-ленгмюровский предел в 1,865 раз. Гораздо более эффективная компенсация объемного заряда ионов достигается в мощном биполярном диоде с магнитной изоляцией электронов, при этом электронный ток почти полностью подавлен, и потери энергии на электроны резко снижены. Здесь ионный ток ограничен достижимым перепадом магнитных давлений между анодом и катодом [2], а достигнутые значения ионного тока могут на порядок и более превышать $j_{ч-л}$, см., например, [3].

В данной работе исследовалась работа инжектора в режиме со сравнительно небольшим встречным электронным током в ионно-оптической системе (ИОС). Использовался инжектор аналогичный [4], энергия пучка 15 кэВ, ток в ионах 150 А, модернизированный на длительность до 0,5 – 1 с. Исследована возможность получить электронный ток ИОС просто понижая отрицательный барьер на запирающей сетке ИОС (или даже меняя полярность). Получено, что в принципе можно получить встречный электронный ток в 3 раза и более превышающий ионный. При величине электронного тока, более чем в 2–3 раза превышающей ионный ток, иногда возникали колебания на токе ИОС, что может приводить к пробоям ИОС. Ясно, что большой незамагниченный встречный поток электронов малоэффективен для повышения предельного ионного тока и при этом многократно повышает затраты энергии. Поэтому в экспериментах исследовалось изменение зависимости угловой расходимости пучка от тока при незначительном росте электронного тока ИОС (до $\leq 10 \div 30\%$ от ионного), прежде всего на участке токов выше оптимального. Первые эксперименты показывают замедление роста расходимости в этом случае, т.е. возможность незначительного ($\leq 10\%$) увеличения рабочих токов инжектора.

Литература

- [1]. Игнатенко В.П. Ионная компенсация пространственного заряда релятивистских потоков электронов // ЖТФ, т.32, № 12, стр. 1428, 1962.
- [2]. Федоров В.М. Предельные плотности тока в диодах с магнитной изоляцией // VII Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике, ч. II, с. 160. Томск, 1988.
- [3]. Дейчули П.П., Федоров В.М. Результаты по генерации мощных ионных пучков в МИД с внешним полем H_r , там же, с. 112.
- [4]. Deichuli P., Davydenko V., Ivanov A., Mishagin V., Sorokin A., Stupishin N., Korepanov S., Smirnov A. Low energy, high power hydrogen neutral beam for plasma heating // Review of Scientific Instruments. 2015. v. 86. № 11. p. 113509.

РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ СИСТЕМ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ (BTR CODE)

Длугач Е.Д.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва,
e-mail: edlougach@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.031

Код BTR (*Beam Transmission with Re-ionization*) [1,2] используется в проектировании систем нейтральной инжекции (СНИ, NBI). Первая версия BTR выпущена в 2003, основной инструмент разработки MS Visual C++ for Windows. Код BTR исходно является открытым и предназначен для свободного распространения. Благодаря простоте использования и интерактивности он подобен симулятору СНИ и нередко применяется для обучения специалистов.

Начиная с версии BTR-2 (multi-thread), расчеты на BTR особенно эффективны на многопроцессорных ПК. Статистика и детализация модели пучка в BTR все еще не имеют равных среди всех известных программных инструментов, предназначенных для СНИ, поэтому код набирает популярность среди пользователей и свободно распространяется ими, хотя изначально BTR использовался преимущественно в ИТЭР [3] – для проектов нагревных и диагностического инжекторов. Одно из важнейших преимуществ – BTR работает даже на старых медленных ПК (под Windows); он способен эффективно моделировать поведение 10^{10} частиц, и это занимает от нескольких секунд до 1–2 часов. Все модели BTR – детерминированные («легкие»), аналитически проверяются и воспроизводятся. Поэтому код традиционно применяется не только для расчетов, но и для проверки и верификации других инжекционных кодов. Емкость и параметры расчетных моделей, уровень детализации и способы ввода конфигурации (вручную или импорт из САПР), разрешение карт тепловой нагрузки – все это легко адаптируется к выбранной пользователем задаче исследования. Код BTR по-прежнему развивается, пользователям доступна бесплатная поддержка. Информация об обновлениях BTR и руководства пользователя доступны онлайн [1].

Спектр задач, решаемых с применением BTR, достаточно широк и включает анализ потерь мощности пучка, исследование его формирования и транспортировки вдоль тракта инжекции, анализ поведения отдельных компонент и построение карт тепловых нагрузок для дальнейшего инженерно-физического анализа компонентов СНИ. В данной работе показаны результаты работы над BTR кодом в период с 2018 по 2022 (версия BTR-5), а также обновления, предложенные пользователями и запланированные к реализации в новой версии BTR-6 (2025).

Литература

- [1]. E. Dlugach, BTR code for neutral beam design. <https://sites.google.com/view/btr-code/home>
- [2]. E. Dlugach, M. Kichik, Beam Transmission (BTR) Software for Efficient Neutral Beam Injector Design and Tokamak Operation // Software 2023, 2, 476-503
<https://doi.org/10.3390/software2040022>
- [3]. ITER Final Design Report; NB H&CD, DDD 5.3; IAEA: Vienna, Austria, 2001.

АНАЛИЗ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЧ ВОЛН В ТОКАМАКАХ И СТЕЛЛАТОРАХ ПО ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ КАНОНИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ

¹Днестровский Ю.Н., ¹Мельников А.В., ¹Андреев В.Ф., ¹Лысенко С.Е.,
¹Нургалиев М.Р., ²Шалашов А.Г.

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт” Москва, Россия,
e-mail: yudnestrov@gmail.com

²Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.032

На токамаке Т-10 температура электронов при СВЧ нагреве на второй гармонике необыкновенной волны (электронно-циклотронная (ЭЦ) мода X2) при невысокой плотности плазмы ($n < 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$) оказывается существенно ниже, чем на первой гармонике обыкновенной волны (O1), рис. 1. Возможно, это вызвано неполным поглощением ЭЦ-волн на второй гармонике. Анализ экспериментальных данных токамака Т-10 и стеллараторов ТЖ-II и Л-2М, использующий транспортную модель канонических профилей, показал, что доля поглощенной мощности $\eta = Q_{ab}/Q_{EC}$ при $n < n_{cr}$ линейно растет с плотностью. Здесь Q_{ab} и Q_{EC} – поглощенная и введенная СВЧ мощность, критическая плотность n_{cr} зависит от магнитного поля: $n_{cr} = 1,2 \cdot B$, [10^{19} м^{-3} , Тл]. Теория [2] предсказывает, что в случае X2 моды доля поглощенной мощности η зависит от оптической толщины плазмы τ

$$\eta = 1 - \exp(-\tau), \text{ где } \tau \approx 5.6 \left(\frac{n T_e R}{1.5 B} \right). \quad (1)$$

На рис. 2 показана зависимость эффективности нагрева от плотности для токамака Т-15МД при $B = 1,5$ и 2 Тл. Кривые с насыщением – теоретические формулы (1); пунктирные линии построены по эмпирической формуле [1]. Видно, что расхождения между классической и эмпирической формулами находятся в диапазоне изменения плотности $n < 2 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Для преодоления области неполного поглощения в Т-15МД предлагается использовать дополнительный нагрев ИЦ волнами или нейтральной инжекцией, или начинать разряд при $n > n_{cr}$, а затем сбрасывать плотность с одновременным подогревом.

Работа поддержана Государственным заданием для НИЦ «Курчатовский институт». Моделирование Т-10, ТЖ-II и Л-2М поддержано грантом РФФИ 23-72-00042.

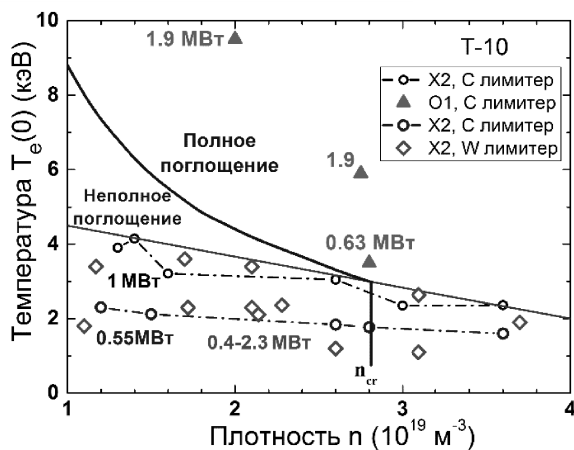


Рис. 1. Сравнение нагрева на первой (O1) и второй (X2) гармонике в токамаке Т-10.

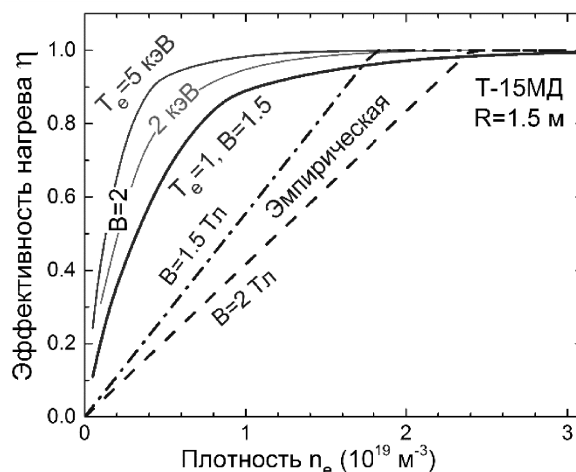


Рис. 2. Теоретические (сплошные линии) и эмпирические (пунктир) зависимости эффективности ЭЦ-нагрева в Т-15МД.

Литература

- [1]. Днестровский Ю.Н. и др. // Письма в ЖЭТФ 118 (2023) 252.
[2]. Prater R. // Phys. Plasmas 11 (2004) 2349.

ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ В ДИВЕРТОРНОЙ ОБЛАСТИ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 МЕТОДОМ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ (СТАТУС РАБОТ)

¹Ермаков Н.В., ¹Жильцов Н.С., ¹Курские Г.С., ¹Мухин Е.Е., ¹Толстяков С.Ю.,
¹Ткаченко Е.Е., ¹Соловей В.А., ²Долгова К.В., ³Кавин А.А., ¹Коваль А.Н.,
¹Николаенко К.О., ¹Новохацкий А.Н., ¹Петров Ю.В., ²Рожанский В.А., ¹Сахаров Н.В.,
²Сениченков И.Ю.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

³Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.033

В докладе представлен статус диагностической системы томсоновского рассеяния (ТР) в диверторе открытого типа на сферическом токамаке Глобус-М2, а также результаты измерений в области “private flux region”, внутренней диверторной ноги и краевой плазмы в области X-точки со стороны сильного поля. Вертикальная хорда зондирования (большой радиус $R = 24$ см) имеет длину 11 см. Рассеянное излучение собирается из 9 пространственных точек с помощью оптической системы, которая состоит как из внутривакуумных элементов, расположенных на подвижном перископе, так и объектива снаружи установки. Диагностика предназначена для локальных измерений электронной температуры $T_e(Z)$ в диапазоне 1 – 100 эВ и концентрации $n_e(Z)$ в диапазоне $10^{17} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Источником зондирующего излучения является лазер, разработанный в процессе подготовки аппаратуры диверторной диагностики ТР токамака ИТЭР: Nd:YAG 1064 нм / 2 Дж / 100 Гц / 3 нс. Для измерения спектра ТР использованы полихроматоры, аналогичные разработанным для диагностики на ИТЭР.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения механизмов работы различных режимов дивертора, отличающихся сниженным взаимодействием плазмы с диверторными пластинами. Ослабление нагрузки может достигаться при поддержании повышенного давления нейтрального компонента в диверторной области камеры, например, путем подачи в диверторную плазму излучающей примеси. В этом случае мощность, приходящая в дивертор из центральной плазмы, распределяется на мощность изотропного излучения и мощность потока нейтральных частиц. Таким образом, плотность мощности падающей на обращенную к плазме поверхность в диверторе значительно снижается за счет увеличения площади взаимодействия. Подобный режим полного или частичного «отрыва» плазмы от диверторных пластин необходимо оптимизировать: варьируя скорость и место напуска излучающей примеси, добиться переизлучения большей части мощности вне зоны удержания. В докладе будут представлены результаты измерений в диверторе Глобус-М2 и их сопоставление с результатами моделирования кодом SOLPS-ITER.

Разработка диагностики ТР дивертора и проведение измерений электронного компонента выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-00033) с использованием УНУ «Сферический токамак Глобус-М».

СИСТЕМА МОЩНОЙ АТОМАРНОЙ ИНЖЕКЦИИ НА УСТАНОВКЕ КОТ

¹Гамов В.В., ¹Ступишин Н.В., ^{1,2}Колесниченко К.С., ¹Воскобойников Р.В.,
¹Зубарев П.В., ¹Моисеев Д.В., ¹Хильченко А.Д., ¹Вахрушев Р.В., ^{1,3}Кравец Е.А.,
¹Мурахтин С.В.

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

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.034

В настоящее время в ИЯФ СО РАН построена и введена в эксплуатацию установка КОТ – компактный осесимметричный тороид. Установка КОТ представляет собой осесимметричный пробкотрон с двухкомпонентной плазмой – относительно холодной и плотной мишенной плазмой и плазмоида с термоядерными параметрами. Научная программа работы на КОТ заключается в оптимизации параметров стартовой мишенной плазмы, отработке методов удержания и стабилизации плазмоида с высоким относительным давлением $\beta \approx 1^1$ (диамагнитное удержание). Создание популяции быстрых ионов является ключевым моментом для успешного выполнения этой задачи. Для создания популяции быстрых ионов на КОТ установлена система мощной атомарной инжекции, пучки которой захватываются мишенной плазмой пробкотрона и превращаются в быстрые ионы.

Благодаря достигнутому в ИЯФ СО РАН прогрессу в строительстве мощных нагревных инжекторов [1] планируется получить плотность тока 2 экв.А/см^2 на поверхности плазмы (для сравнения – $1,6 \text{ экв.А/см}^2$ на 2ХИВ [2]). Система атомарной инжекции состоит из двух мощных инжекторов с баллистической фокусировкой пучков. Инжекторы установлены в центральной плоскости перпендикулярно оси установки под углом 90° друг относительно друга. Энергия инжектируемых частиц – 15 кэВ, ток в ионах – 140 А, длительность инжекции – 4 мс.

Цель данной работы – демонстрация работы системы атомарной инжекции и результатов измерений основных параметров пучков: инжектируемой мощности, плотности тока на поверхности плазмы и угловой расходимости.

Литература

- [1]. P. Deichuli, V. Davydenko, A. Ivanov, S. Korepanov, V. Mishagin, A. Smirnov, A. Sorokin, and N. Stupishin. Low energy, high power hydrogen neutral beam for plasma heating. Review of Scientific Instruments, Vol.86, 2015, 113509, doi:10.1063/1.4936292.
- [2]. Munan Lin, Ming Liu, Guanghui Zhu, Peiyun Shi, Jian Zheng, Quanming Lu, Xuan Sun. Field-reversal experiments in a neutral-beam-injected mirror machine // Review of Scientific Instruments, Vol.88, 2017, doi: 10.1063/1.5001313.
- [3]. R. Uhlemann, R.S. Hemsworth, G. Wang, H. Euringer. Hydrogen and Deuterium ion species mix and injected neutral beam power fractions of the TEXTOR-PINIs for 20-60 kV determined by Doppler shift spectroscopy // Rev. Sci. Instrum. – 1993. – Vol. 64. – No. 4. – p.974-982; doi: 10.1063/1.1144100/.

¹ $\beta = 8\pi P_{\perp}/B^2$ – отношение поперечной составляющей давления плазмы к давлению магнитного поля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУИ ГАЗА, СОЗДАВАЕМОЙ УСКОРИТЕЛЕМ ПЛАЗМЫ

^{1,2}Горяинов В.Ю., ¹Воронин А.В.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: vgoruainov@mail.ioffe.ru

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.035

Струи газа, движущиеся со сверхзвуковой скоростью, могут быть использованы для диагностики и управления параметрами плазмы в токамаке [1,2]. Настоящее исследование направлено на создание гелиевой струи газа, движущейся с большой скоростью, с помощью коаксиального ускорителя плазмы. Этот источник планируется применить в составе гелиевого термометра [3] для глубокого зондирования пристеночной плазмы в токамаке Глобус-М2. Метод состоит в трансформации плотной и холодной струи плазмы в поток газа. С этой целью плазма пропусклась через длинный канал, в котором по мере движения она могла рекомбинировать. На выходе рекомбинационной трубы мог образовываться поток газа, скорость которого близка к скорости движения потока плазмы. В результате проведенных исследований обнаружены условия, при которых на выходе из трубы в основном выходила струя нейтрального гелия со скоростью около десяти километров в секунду.

Исследования проводили на стенде, содержащем набор диагностик и вакуумную камеру объемом 2,5 м³. Коаксиальный ускоритель плазмы питали от емкостного накопителя 400 мкФ с напряжением на электродах до 5 кВ. До начала разряда в ускоритель напускали рабочий газ с помощью быстродействующего электродинамического клапана. Спустя ~400 мкс после открытия клапана инициировали ток в ускорителе. Длительность импульса тока составляла около 30 мкс. Плотность и скорость струи плазмы на выходе из ускорителя могли достигать 10¹⁵ – 10¹⁶ см⁻³, <100 км/с, соответственно. Вдоль движения плазменной струи, соосно с ускорителем располагали длинную рекомбинационную трубу, в которой плазма по мере движения могла трансформироваться в поток газа.

Предложен ряд диагностических решений, позволяющих измерять направленную скорость, температуру, плотность и давление струи. Эффективность трансформации плазмы в поток газа контролировали по отношению интенсивностей свечения струи на входе и выходе рекомбинационной трубы с помощью фотоэлектронных умножителей с калиброванными коэффициентами усиления. Для скорости движения струи больше скорости звука проведены расчеты, учитывающие изменение параметров (давления и концентрации частиц) газа после его прохождения через скачок уплотнения, образующийся перед поверхностью датчика давления.

Работа выполнена на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях". Поддержание функционирования экспериментального стенда плазменной пушки осуществлялось в рамках госзадания № 0040-2019-0023, разработка диагностик для эксперимента происходила в соответствии с госзаданием № 0034-2021-0001.

Литература

- [1]. А.В. Воронин и др. // Физика плазмы, 2021, том 47, № 8, с. 675 – 683.
- [2]. А.Н. Новохацкий и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 4.
- [3]. В.М. Тимохин и др. // Письма в ЖТФ, 2016, том 42, вып. 15, С 13 – 18.

ПЛАЗМА ЭЦР РАЗРЯДА В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ КАК ЦИКЛОТРОННЫЙ МАЗЕР: ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ И ВЛИЯНИЕ НА УДЕРЖАНИЕ

Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г.

*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия,
e-mail: egos@ipfran.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.036

В данном докладе обсуждаются электронное циклотронное резонансное (ЭЦР) взаимодействие электромагнитных волн и плазмы, удерживаемой в лабораторных открытых магнитных ловушках. Подобные исследования обычно связаны с ЭЦР-нагревом плазмы, используемым для достижения высокой температуры электронов в открытых магнитных конфигурациях различного масштаба: от относительно компактных технологических источников ионов до крупномасштабных плазменных ловушек, используемых в термоядерных исследованиях.

Эти приложения имеют давнюю историю, но до сих пор остаются актуальными, главным образом, благодаря прогрессу в разработке мощных источников СВЧ-излучения, таких как гиротроны, с последующим существенным увеличением нагрузки СВЧ-мощности и, тем самым, увеличением количества неравновесных резонансных электронов. Взаимодействие СВЧ волн с резонансными электронами приводит к специфическому переносу электронов в импульсном пространстве, который заканчивается их попаданием в конус потерь и высыпанием из ловушки. Такие электроны могут приводить также к развитию кинетических ЭЦР неустойчивостей в более широком диапазоне частот, чем те, которые используются для резонансного нагрева плазмы. Если это происходит, надтепловые электроны действуют как усиливающая среда для собственного электромагнитного шума, в то время как тепловая плазма и вакуумная камера обеспечивают резонатор для нестабильных мод. Во многих случаях этот механизм определяет потери избыточной энергии, запасенной в ускоренных электронах, тем самым ограничивая достижение пиковых параметров плазмы в приложениях. Последние достижения в теории такого циклотронного мазера предлагают подходы к контролю нежелательной турбулентности плазмы, вызванной сильным ЭЦР-нагревом [1 – 6].

В докладе обсуждаются различные динамические режимы генерации излучения в результате развития ЭЦР неустойчивостей, влияние этих неустойчивостей на удержание горячих электронов и основной плазмы в ловушке.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00377).

Литература

- [1]. A.G. Shalashov et al. // Phys. Rev. Lett. 120, 155001 (2018).
- [2]. A.G. Shalashov et al. // EPL 124, 35001 (2018).
- [3]. A.G. Shalashov, E.D. Gospodchikov, I.V. Izotov // PPCF 62 065005 (2020).
- [4]. I.V. Izotov et al. // Plasma PPCF 63 045007 (2021).
- [5]. V.A. Skalyga et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 54, 385201 (2021).
- [6]. A.G. Shalashov and E. D. Gospodchikov // Phys. Rev. E 108, 025207 (2023).

ОБРАТНОЕ ВЛИЯНИЕ ВЫСЫПАНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ДИНАМИКУ КИНЕТИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Господчиков Е.Д., Изотов И.В., Шалашов А.Г.

*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия,
e-mail: egos@ipfran.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.037

Развитие кинетических электронных циклотронных (ЭЦ) неустойчивостей в плазме, удерживаемой в открытой магнитной ловушке, является основным механизмом потерь энергичных электронов, образующихся при достаточно мощном ЭЦ-резонансном нагреве плазмы [1]. В экспериментах наблюдались как непрерывный, так и квазипериодический вспыхивающий режим таких высыпаний. На установке ECRIS/JYFL (Финляндия) в 2022 году было показано, что в стационарном ЭЦ разряде вспышки рентгеновского излучения, характерные для высыпаний энергичных электронов, имеют двухпериодическую структуру – импульсы высыпаний группировались в повторяющиеся серии, состоящие из фиксированного числа эквидистантных импульсов, при этом период следования серий был заметно больше чем их длительность [2]. Такой характер поведения говорит об обратном влиянии высыпаний на развитие циклотронных неустойчивостей через изменение параметров основной плазмы.

В настоящей работе в рамках концепции циклотронного мазера обсуждаются особенности «медленной» динамики кинетических ЭЦ неустойчивостей. Показано, что временная эволюция коэффициента неупругих потерь энергичных электронов, отражающая общее падение среднего зарядового числа ионов при сопутствующей высыпанию энергичных электронов перестройке амбиполярного потенциала [3], приводит к формированию двухпериодической структуры вспышек, объясняющей экспериментальные наблюдения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00377).

Литература

- [1]. I.V. Izotov et al. // Plasma Phys. Control. Fusion, 2021, 63, 045007.
- [2]. B.S. Bhaskar et al. // AIP Advances, 2022, 12 (1), 015223.
- [3]. V.A. Skalyga et al. // J. Phys. D: Appl. Phys., 2021, 54, 385201.

ВЛИЯНИЕ РАССЕЯННЫХ ПОЛЕЙ ТОКАМАКА И СОСЕДНИХ СОЛЕНОИДОВ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА УСТАНОВКИ Т-15МД НА ВЫХОД ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НА КОЛЛЕКТОРЕ ГИРОТРОНА

^{1,2}Губанова А.И., ¹Борщеговский А.А., ¹Пименов И.С., ¹Рой И.Н.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: GubanovaAI@trpe.i.ru

²Национальный исследовательский институт «МЭИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.038

Гиротронный комплекс установки Т-15МД в перспективе должен включать восемь гиротронов. На данный момент введен в строй один гиротрон с частотой 82,6 ГГц, мощностью ~1 МВт [1]. К концу 2025 года планируется установка еще четырех гиротронов. На рис. 1 показано расположение гиротронных стенов СВЧ-комплекса установки Т-15МД. Каждый гиротрон установлен в криомагнит, создающий магнитное поле величиной 3,27 Тл или 3,98 Тл в центре соленооида в зависимости от рабочей частоты гиротрона (82,6 и 105 ГГц соответственно).

Коллектор гиротрона испытывает высокую тепловую нагрузку [2]. При КПД прибора ~50% мощность электронного пучка составляет величину ~1 МВт. Система коллекторных катушек, состоящая из статической и динамической секций, обеспечивает равномерное распределение энерговыделения вдоль охлаждаемой поверхности. При этом для обеспечения

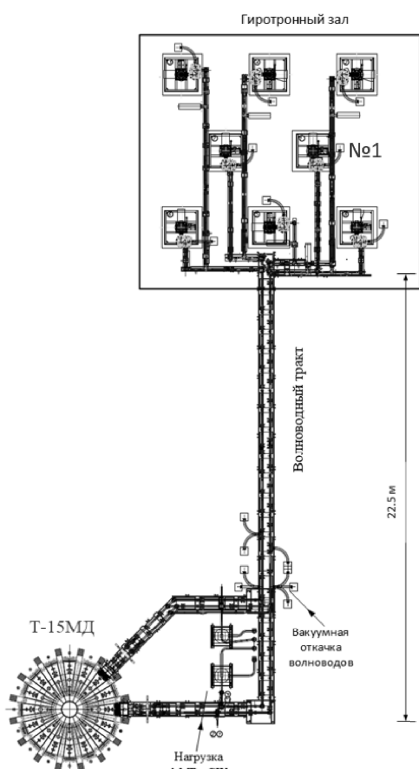


Рисунок 1. Гиротронный комплекс токамака Т-15МД

нормальной работы гиротрона, радиальная составляющая магнитного поля вблизи стенок коллектора не должна превышать 2 – 5 Гс. В связи с этим возникает необходимость моделирования магнитной обстановки, которая создается в данной конфигурации СВЧ-комплекса. В конечном итоге задача сводится к определению воздействия магнитного поля соседних соленоидов и токамака на коллектор каждого гиротрона.

На данном этапе решается задача о влиянии одного из соседних криомагнитов на распределение магнитного поля в области коллектора гиротрона №1, которое может привести к осаждению части пучка на неохлаждаемые участки.

Параметры коллекторных катушек определяются изготовителем гиротронов, компанией ЗАО НПП «ГИКОМ». С целью проверки правильности конфигурации магнитного поля, создаваемого размазывающими катушками, была разработана программа, позволяющая определить экскурсию электронного пучка вдоль поверхности коллектора. Таким образом, влияние рассеянных полей можно наблюдать визуально.

Результаты по оценке дополнительного влияния магнитных полей соседних криомагнитов могут войти в доклад.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Г.Г. Денисов, В.И. Малыгин, А.И. Цветков и др. // Известия вузов. Радиофизика, том LXIII, № 5 – 6, с. 369
- [2]. V.N. Manuilov, M.V. Morozkin, O.I. Luksha, and M.Yu. Glyavin Gyrotron collector: types and capabilities. Infrared Physics & Technology, Volume 91, June 2018, P. 46–54.

СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ В МНОГОПРОБОЧНОМ И ВИНТОВОМ МАГНИТНОМ ПОЛЯХ В ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

Инжеваткина А.А., Судников А.В., Толкачев М.С., Устюжанин В.О.

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: a.a.inzhevatkina@inp.nsk.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.039

В ИЯФ СО РАН проходит успешное изучение физики плазмы, удерживаемой в открытой винтовой ловушке СМОЛА [1]. Плазма вращается за счет $[E \times B]$ дрейфа. Во вращающейся системе отсчета скорость бегущих магнитных пробок сравнима со скоростью продольного потока. Скорость магнитных возмущений в условиях удержания направлена вдоль градиента плотности плазмы. Одними из параметров, отвечающих за качество удержания плазмы, являются угловая [2] и продольная скорости. Скорость течения плазменной струи в транспортной секции измеряется с помощью плоских зондов Маха [3], установленных в нескольких точках по длине установки.

В винтовом поле важным эффектом является превышение локальной плотности ионов, движущихся со стороны плазмодриемника, по сравнению с локальной плотностью ионов, движущихся со стороны источника плазмы. Обратный поток захваченных частиц наблюдался на расстоянии 15 – 20 мм от центра плазмы, где V_{\parallel} составляет $\sim 10^5$ см/с. Средние продольные скорости на периферии плазмы составляют $\sim 6 \cdot 10^5$ см/с и $\sim 3 \cdot 10^5$ см/с в прямом и винтовом полях соответственно. Эти эффекты согласуются с моделью радиального переноса частиц в винтовом магнитном поле [4]. При существующих параметрах плазмы обратный поток должен наблюдаться уже при среднем по сечению пробочном отношении $R_{\text{mean}} = 1,02$, соответствующее радиусу плазмы 0,8 см.

Были проведены экспериментальные серии, направленные на сравнение движения плазменного потока в прямом и винтовом магнитном полях, а также при осесимметричной гофрировке с пробочным отношением $R = 1,15 \div 1,4$ и комбинированном магнитном поле, включающим осесимметричную и винтовую гофрировки. Среднее по сечению пробочное в винтовом поле варьировалось в диапазоне 1,15 – 1,52. Обратный поток захваченных частиц наблюдался только в комбинационном или винтовом полях. Таким образом, экспериментально продемонстрировано, что улучшенное удержание является эффектом не многопробочной конфигурации, а влиянием именно винтового поля.

В докладе также представлено сравнение продольных скоростей течения в условиях осесимметричной и винтовой гофрировки в режиме ускорения плазмы.

Работа выполнена при поддержке РФФ (No. 22-12-00133).

Литература

- [1]. A.V. Sudnikov et al. // Plasma flow suppression by the linear helical mirror system // Journal of Plasma Physics, 88(1), 905880102 (2022).
- [2]. А.А. Инжеваткина и др. Исследование вращения плазмы в открытой винтовой ловушке СМОЛА // Физика плазмы, Т. 47. № 8. С. 706 – 715 (2021).
- [3]. А.А. Инжеваткина и др. Исследование потоковой скорости плазмы в открытой винтовой ловушке СМОЛА // Физика плазмы, (в печати).
- [4]. A.D. Beklemishev, AIP conf. proceedings, 1771, 040006 (2016).

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МГД-ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД^{1,2}Изарова А.Д., ¹Балашов А.Ю., ^{1,3}Белов А.М., ¹Елисеев Л.Г., ^{1,4}Саранча Г.А.¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия³Государственный научный центр Российской Федерации ТРИНИТИ, Москва, Россия⁴Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.040

Токамак Т-15МД имеет широкий спектр диагностических систем, одной из которых является массив магнитных зондов, используемый как для определения формы и положения плазменного шнура, так и для обнаружения и исследования МГД-возмущений. Массив зондов располагается на внутренней стороне стенки вакуумной камеры в полоидальном сечении. Конструкционные особенности установки, такие как некруглое сечение и относительно высокая тороидальность, усложняют обработку данных магнитных зондов. В связи с этим, необходимо подобрать методику, имеющую наименьшее количество ограничений и позволяющую получить наиболее точный результат.

В данной работе рассматривается ряд методов обработки сигналов магнитной диагностики, позволяющих получить информацию о структуре МГД-возмущений. К ним относятся: разложение в ряд Фурье; двойное Фурье-преобразование; метод фазовых матриц [1]; метод преобразования Гильберта-Хуанга [2] и метод выделения сингулярных значений (SVD). Производится тестирование данных методов на синтетическом сигнале с целью выявления области применимости методов и факторов, которые могут помешать их корректной работе. На рис. 1 представлены результаты обработки вышеуказанными методами синтетического сигнала, являющегося композицией двух мод на различных временных частотах и учитывающего зашумление сигнала, а также преобразование Мережкина в тороидальном приближении. Считается, что сигнал приходит на круглый массив датчиков. Кроме того, проведено моделирование сигналов, приходящих на конфигурацию зондов, соответствующую установленной на Т-15МД. Далее обработке подвергаются реальные экспериментальные сигналы, чтобы подтвердить выявленные ограничения и сделать вывод о наиболее предпочтительном методе для данной установки.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

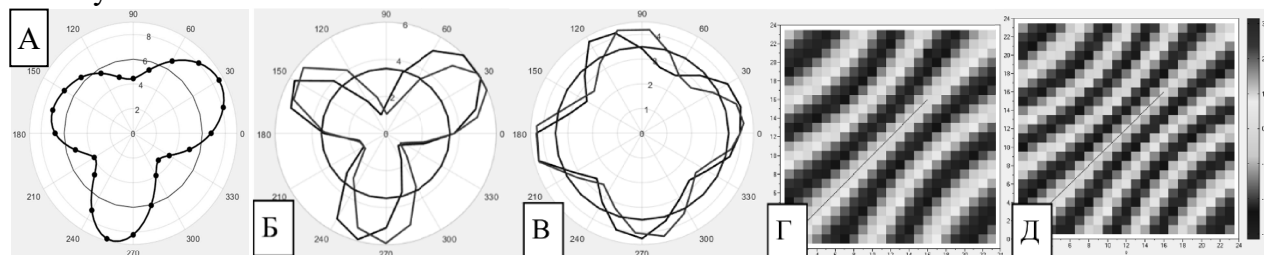


Рис. 1 А - Угловое распределение амплитуд сигналов магнитных зондов; Б, В - моды $m = 3$ и $m = 4$ выделенные методом SVD (чёрные линии) с последующей обработкой преобразованием Гильберта (красные линии); Г, Д - матрицы кросс-фазы выделенных мод $m = 3$ и $m = 4$. По осям расположены номера магнитных зондов

Литература

- [1]. Melnikov A.V. et al. Quasicoherent modes on the COMPASS tokamak //PPCF. – 2015. – Т. 57. – №. 6. – С. 065006.
- [2]. Какурин А.М., Орловский И.И. Преобразование Гильберта-Хуанга в МГД-диагностике плазмы // Физика плазмы. – 2005. – Т. 31. – №. 12. – С. 1129-1138.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-15МД В РАЗРЯДАХ С УМЕНЬШЕННЫМ ОБЪЕМОМ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА НА ОСНОВЕ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ КАНОНИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ

^{1,2}Касьянова Н.В., ¹Днестровский Ю.Н., ^{1,2,3}Мельников А.В.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Kasyanova_NV@nrcki.ru

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.041

В работе [1] была показана возможность получения в токамаке Т-15МД равновесных конфигураций с уменьшенным объемом плазменного шнура. Преимуществом таких разрядов является возможность увеличения удельной мощности дополнительного нагрева и более легкого достижения режимов с улучшенным удержанием. В данной работе проводится моделирование переноса в плазме токамака Т-15МД с уменьшенным объемом и с омическим и ЭЦР нагревом для магнитного поля $B = 1 - 2$ Тл. Рассматривается водородная плазма в лимитерной конфигурации круглого сечения с малым радиусом $a = 0,3$ м.

Моделирование переноса проводится с помощью транспортной модели канонических профилей (ТМКП) [2]. Решаются уравнения для температуры электронов T_e , ионов T_i и диффузии тока. Профиль плотности плазмы задается таким образом, чтобы в нормированных координатах $\rho = r/(IR/B)^{1/2}$ нормированный расчетный профиль давления во всех режимах имел канонический вид $p(\rho)/p(0) = (1 - \rho^{3/2})^3$, в соответствии с наблюдениями на разных токамаках [3].

Получены ожидаемые значения электронной и ионной температуры и времени удержания энергии в широком диапазоне значений средней плотности плазмы в режимах с омическим и ЭЦР нагревом при разных положениях плазменного шнура ($R = 1,13, 1,5, 1,87$ м, аспектное отношение $A = 3,8 - 6,2$). Для омических режимов проводится сравнение расчетных профилей электронной и ионной температуры для токамака Т-15МД с экспериментальными данными, полученными на установке Т-10 в аналогичных разрядах с низким магнитным полем ($B = 1,55 - 2,1$ Тл). Результаты моделирования показывают, что при низкой плотности плазмы время удержания энергии τ_e в электронной компоненте водородной плазмы Т-15МД практически не зависит от \bar{n}_e , т.е. наблюдается режим насыщенного омического удержания (SOC), в то время как в дейтериевой плазме Т-10 τ_e линейно растет с ростом средней плотности – наблюдается режим линейного омического удержания (LOC).

Литература

- [1]. Горбун М.С., Мельников А.В., Сычугов Д.Ю., Садыков А.Д. В сб. Прикладная математика и информатика. Труды факультета Вычислительной математики и кибернетики МГУ им. М.В. Ломоносова, 2020, т. 64, с. 5 – 16.
- [2]. Днестровский Ю.Н. и др., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т.45, вып. 1
- [3]. Razumova K.A. et al. // Nucl. Fusion. 49 (2009) 065011.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ И СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУСКА ТОКАМАКА Т-15МД

Соколов М.М., Игонькина Г.Б., Качкин А.Г., Хайрутдинов Э.Н.

Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.042

На базе токамака Т-15МД впервые в России создается система управления плазмой (СУП) для крупной установки с D-образным сечением, системами дополнительного нагрева и поддержания тока плазмы различными методами. В СУП Т-15МД реализуется распределенная многосвязная цифровая система управления, объединяющая контуры магнитного и кинетического управления параметрами плазмы, интегрированные с системами дополнительного нагрева плазмы, с системой детектирования и компенсации вертикального срыва, а также с диагностикой и кодом восстановления параметров плазмы в реальном времени [1]. Взаимодействия между контроллером СУП, сервером восстановительного кода и исполнительными системами, а также с сервером платформы моделирования для проверки сценария разряда и регуляторов перед экспериментом осуществляются по сети рефлексивной памяти. Контроллер СУП создан на базе оборудования PXI и FlexRIO National Instruments (NI). На рисунке 1 представлена структурная схема СУП Т-15МД.

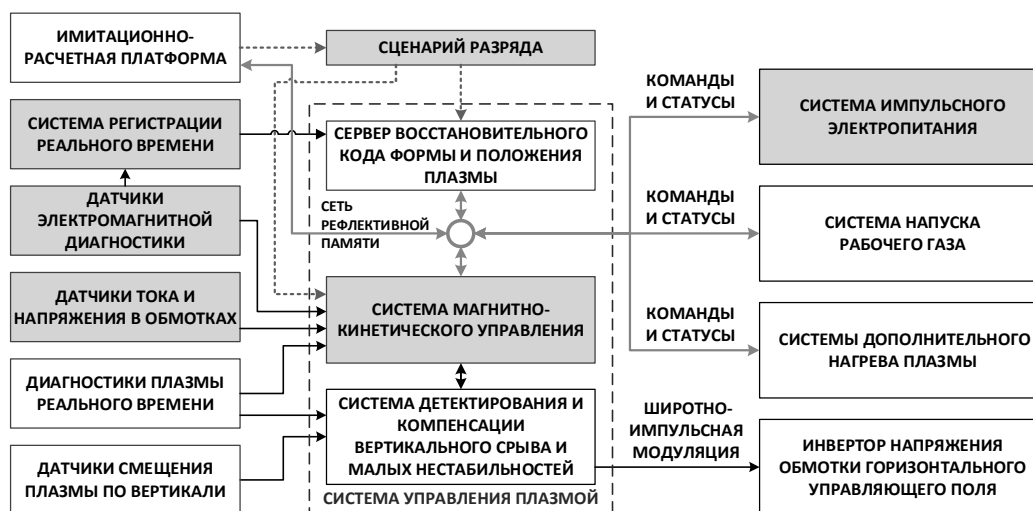


Рисунок 1. Структурная схема СУП Т-15МД (заливкой показан контур для энергетического пуска)

Для регистрации данных в цифровой системе регистрации (ЦСР) диагностического комплекса Т-15МД применены АЦП NI-Score, DAQmx и Sk-mTCA производства NI и ООО «Скинер» соответственно. Система синхронизации для ЦСР, системы визуализации плазмы и гиротрона предыонизации интегрирована в СУП. Сбор данных осуществляется в раздел Т-15МД объединенной базы данных DASSQL [2].

Во время энергетического пуска и осенней экспериментальной кампании 2023 г. получены плазменные разряды с реализацией заданных сценариев токов в обмотках, синхронизацией работы гиротрона предыонизации, систем визуализации плазмы и сбора данных.

Литература

- [1]. Sokolov M., Kachkin A., Igonkina G., Khayrutdinov E. and others. The architecture and test-bed of the T-15MD tokamak plasma control system. // 31th symposium on fusion technology, Topic C – Plasma Engineering and CODAC, Poster P4.093, Book of Abstracts p. 666.
- [2]. Соколов М.М., Игонькина Г.Б. Унификация доступа к экспериментальным данным установок управляемого термоядерного синтеза. // Труды Всероссийской научной конференции "Научный сервис в сети Интернет", г. Новороссийск, 18-23 сентября 2006г., Изд-во МГУ, 2006, с. 242 – 244.

КВАЗИ-ИЗОДИНАМИЧЕСКИЕ СТЕЛЛАТОРЫ СО СЛОЖНОЙ СТРУКТУРОЙ ПЕРИОДА И УМЕНЬШЕННЫМ АСПЕКТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ

¹Ханаева Р.А., ²Михайлов М.И.

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия, zasshu@yandex.ru

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия, mikhaylov_mi@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.043

Квази-изодинамические для всех запертых частиц стеллараторы с простой структурой периода были рассмотрены ранее для различных значений числа периодов (см., например, [1] ($N = 6$), [2] ($N = 2$), [3] ($N = 12$)). В квази-изодинамических стеллараторах топология линий $B = \text{const}$ на магнитных поверхностях определяется наличием гофрировки продольного поля. В сечениях с экстремумами продольного поля кривизна магнитной оси конфигурации обращается в ноль. Период конфигурации между сечениями с максимумами магнитного поля является КРЭЛом [4], что уже приводит к существенному уменьшению вторичных токов. Однако внутри периода дипольный ток как на внешнем, так и на внутреннем обходе не меняет знак, обращаясь в ноль в сечениях с максимумами модуля магнитного поля и имея противоположные направления на внутреннем и внешнем обходах. Дальнейшего уменьшения вторичного тока можно добиться, усложняя структуру периода таким образом, чтобы вторичный ток был знакопеременным и на внутреннем и на внешнем обходе тора. Ранее возможность существования таких конфигураций была показана в работах [5, 6] для шестипериодной конфигурации с большим аспектным отношением, $A \sim 30$. Свойства конфигураций рассматривались при $\langle \beta \rangle \sim 0,2$. В данной работе исследуются возможности выполнения условия квази-изодинамичности в двух типах конфигураций со сложной структурой периода для уменьшенного числа периодов, и, соответственно, уменьшенного аспектного отношения. В конфигурациях обоих типов кривизна магнитной оси меняет знак на периоде, при этом в стеллараторах первого типа имеется один максимум и один минимум продольного поля на периоде, а в конфигурациях второго типа – два максимума и два минимума. Показывается, что найденные конфигурации устойчивы относительно локальных мод и имеют приемлемо малые величины эффективных рипплов и геометрического фактора бутстрэп-тока. Данные приводятся для пятипериодной конфигурации с $A \sim 20$ и $\langle \beta \rangle \sim 0,2$.

Литература

- [1]. Subbotin et al. // Nucl. Fus 46 (2006) 921.
- [2]. Samitov M. et al. // J. Plasma Fusion Res. SERIES, 6 (2004) 534-537.
- [3]. Mikhailov M. et al. // Theory of Fusion Plasmas: Joint Varenna-Lausanne International Workshop, AIP Conf. Proc. Vol. 871, 2006, p.388.
- [4]. Glagolev V.M. et al. // 10th European Conf. Control. Fusion and Plasma Phys, Moscow 1981, 1 E8.
- [5]. Bovshuk V. et al. // Plasma and Fusion Research 3 (2008) S1046.
- [6]. Bovshuk V. et al. // 22nd IAEA Fusion Energy Conf. (FEC) – 50th Anniversary of Controlled Nuclear Fusion Research, Geneva, Switzerland, October 10–18, 2008 th_p9-2.

КВАЗИОПТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ЭЦР-НАГРЕВУ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ НА ЧАСТОТЕ 54.5 ГГц

¹Хусаинов Т.А., ¹Балакин А.А., ¹Господчиков Е.Д., ^{1,2}Соломахин А.Л., ¹Шалашов А.Г.

¹*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия, HTA@appl.sci-nnov.ru*

²*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.044

Поглощение электромагнитных волн в условиях электронного циклотронного (ЭЦ) резонанса широко применяется для нагрева высокотемпературной плазмы в крупномасштабных магнитных ловушках, используемых для исследований в области управляемого термоядерного синтеза (УТС). В большинстве случаев это ловушки тороидальной конфигурации, но в последнее время возрождается интерес и к прямым открытым ловушкам. В разных странах идёт разработка открытых ловушек нового поколения [1–3], и это делает актуальной разработку методов ЭЦ нагрева для систем такого типа.

Впервые эффективный ЭЦ нагрев плотной плазмы в большой открытой ловушке был продемонстрирован в конце 2013 года на установке ГДЛ (газодинамическая ловушка) в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера [4]. Для эксперимента была разработана принципиально новая схема нагрева, в которой волновой пучок вводился через боковую поверхность плазменного столба, а затем захватывался за счёт тонких эффектов рефракции в неоднородной плазме и поглощался на основной гармонике необыкновенной волны [5]. В результате за счёт дополнительного нагрева удалось поднять температуру электронов до рекордного для этого класса установок значения ~ 1 кэВ и увеличить поток термоядерных нейтронов на 80% [6]. В тоже время разработанная схема накладывала ряд ограничений на параметры плазмы и магнитную конфигурацию установки, а также давала слабые возможности для управления положением области энерговклада. Для решения части этих проблем на ГДЛ была предложена другая схема, где излучение вводится вдоль поверхности резонанса, и нагрев идёт на второй гармонике необыкновенной волны.

В данном докладе будут представлены результаты квазиоптического моделирования нового сценария нагрева на второй гармонике. Моделирование позволяет учитывать взаимное влияние диссипации энергии и дифракции пучка, которое может оказаться существенным при распространении пучка вдоль поглощающего слоя [7].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-72-20139).

Литература

- [1]. Сковородин Д.И. и др. // Физика плазмы 2023, 49(9), 831.
- [2]. Endrizzi D. et al. // J. Plasma Phys. 2023, 89, 975890501.
- [3]. Yakovlev D., Chen Z., Bagryansky P. et al. // Nucl. Fusion 2022, 62, 076017.
- [4]. Bagryansky P.A., Demin S.P., Gospodchikov E.D. et al. // Fusion Science and Technology 2013, 63(1T), 40.
- [5]. Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Smolyakova O.V. et al. // Physics of Plasmas 2012, 19, 052503.
- [6]. Bagryansky P.A. et al. // Nucl. Fusion 2015, 55, 053009.
- [7]. Шалашов А.Г., Господчиков Е.Д. // УФН 2022, 192, 1399.

НЕЛИНЕЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОТИРИНГОВОЙ МОДЫ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М

^{1,2}Киселев Е.О., ¹Бахарев Н.Н., ¹Варфоломеев В.И., ¹Гусев В.К., ¹Курский Г.С.,
¹Мишаев В.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Патров М. И., ¹Петров Ю.В., ²Пономаренко А.М.,
¹Сахаров Н.В., ¹Солоха В.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Теплова Н. В., ¹Токарев В.А.,
¹Тюхменева Е.А., ¹Хромов Н.А., ¹Щеголев П.Б., ^{1,2}Яшин А.Ю.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия,

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.045

Одной из причин аномального переноса в плазме токамаков являются развивающиеся в ней различные микронеустойчивости, вызывающие потери тепла и частиц, а также приводящие к увеличению теплопроводности и уменьшению времени удержания энергии. Для экспериментального изучения термоизоляции плазмы проводятся исследования зависимости времени удержания энергии τ_E от различных параметров плазмы, таких как: тороидальное бета β_T , нормализованный ларморовский радиус ρ^* , столкновительность ν^* , аспектное отношение A , вытянутость k и другие. В ходе этих исследований было обнаружено, что зависимость τ_E от столкновительности и от тороидального магнитного поля B_T в сферических токамаках проявляется сильнее, чем в классических (для сферических токамаков MAST $B_T \tau_E \propto \nu^{*-0.82}$ [1], NSTX $B_T \tau_E \propto \nu^{*-0.97}$ [2] и Глобус-М2 $B_T \tau_E \propto \nu^{*-1}$ [3], в то время как для токамаков с большим аспектным отношением зависимость слабее $B_T \tau_E \propto \nu^{*-0.01}$ [4]).

Сильная зависимость времени удержания энергии от столкновительности может говорить о снижении потерь тепла при уменьшении ν^* . Возможным объяснением данного явления может быть снижение активности микронеустойчивостей, например, микротиринговой моды (МТМ), создающей магнитное перезамыкание на масштабе ионного ларморовского радиуса. В результате gyrokinetic моделирования в плазме с улучшенным удержанием на сферических токамаках NSTX [2, 5], MAST [1] и Глобус-М [6] было обнаружено, что МТМ нестабильна и, действительно, ее активность снижается при уменьшении ν^* .

Данная работа посвящена нелинейному моделированию микротиринговой неустойчивости с помощью кода GENE [7]. Исследования проводились в центральной области плазмы компактного сферического токамака Глобус-М [8] (большой радиус $R = 0,36$ м, малый радиус $a = 0,24$ м, аспектное отношение $A = 1,5$, ток плазмы I_p до 200 кА, тороидальное магнитное поле B_T до 0,4 Тл). Получено, что поток тепла, связанный с флуктуациями электромагнитного поля, сравним с потоком тепла, полученным с помощью транспортных вычисления кодами ASTRA [9] и NUBEAM [10].

Приводятся также анализ результатов полноволнового моделирования возможного сигнала обратного доплеровского рефлектометра, рассеянного на флуктуациях плотности плазмы микротиринговой моды, полученного кодом IPF-FD3D [11].

Эксперименты проведены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях". В рамках выполнения гос. задания осуществлена подготовка нагревных (тема 0034-2021-0001) и диагностических систем (0040-2019-0023) токамака.

Литература

- [1]. Valovic M. et al. // 2011 Nucl. Fusion 51 073045.
- [2]. Kaye S.M. et al. // 2013 Nucl. Fusion 53 063005.
- [3]. Kurskiv G.S. et al. // 2022 Nucl. Fusion 62 016011.
- [4]. ITER Physics Basis // 1999 Nucl. Fusion 39 217.
- [5]. Guttenfelder W. // 2012 Physics of Plasmas 19 022506.
- [6]. Kiselev E.O. et al. // 2018 EPS P1.1104.
- [7]. Dannert T. and Jenko F. // 2005 Phys. Plasmas 12 072309.
- [8]. Gusev V.K. et al. // 2013. Nucl. Fusion 53 093013.
- [9]. Pereverzev G. and Yushmanov P.N. // 2002 Max-Planck IPP report 5/98.
- [10]. Pankin A. et al. // Computer Phys. Communications. 2004. V. 159. P. 157.
- [11]. Lechte C. et al. // 2017 Plasma Phys. Control. Fusion 59 075006.

СТАТУС КОНЦЕПЦИИ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ ГЛОБУС-3

¹Бахарев Н.Н., ²Бондарчук Э.Н., ²Бондарь А.В., ¹Варфоломеев В.И., ²Воронова А.А.,
¹Гусев В.К., ¹Дьяченко В.В., ²Кавин А.А., ²Кедров И.В., ²Конин А.Ю.,
²Кудрявцева А.М., ¹Курские Г.С., ²Лабусов А.Н., ¹Минаев В.Б., ²Минеев А.Б.,
¹Мирошников И.В., Петров¹ Ю.В., ²Родин И.Ю., ¹Сахаров Н.В., ²Танчук В.Н.,
²Трофимов В.А., ²Филатов О.Г., ¹Щёголев П.Б.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: voronova@sintez.niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.046

В докладе анализируется концепция российского сферического токамака следующего поколения – проект Глобус-3. Из рассмотренных подходов к созданию электромагнитной системы («тёплые» обмотки из медных сплавов, вариант с предварительным захолаживанием обмоток, использование НТСП или ВТСП) в качестве первого шага выбран вариант с «тёплой» медью. Расчёты показали, что имеющаяся в ФТИ им. А.Ф. Иоффе инфраструктура, включая габаритные ограничения, в этом случае позволяет обеспечить работоспособность сферического токамака с тороидальным магнитным полем $B_t = 1,5 - 3,0$ Тл, током плазмы $I_p \sim 1$ МА, длительностью разряда Δt_{pulse} в несколько секунд при большом радиусе тора R менее метра. Такие параметры новой установки – обоснованная экстраполяция системы установок Глобус (Глобус-М: $B_t = 0,4$ Тл, $I_p \sim 0,2$ МА, $\Delta t_{\text{pulse}} \leq 0,3$ с, $R = 0,36$ м; Глобус-М2: $B_t = 0,9$ Тл, $I_p \sim 0,5$ МА, $\Delta t_{\text{pulse}} \leq 0,5$ с, $R = 0,36$ м).

Проведённый параметрический анализ позволил сделать предварительный выбор параметров установки Глобус-3 для последующей инженерной проработки: $B_t = 1,5$ Тл, $I_p \sim 0,8$ МА, $\Delta t_{\text{pulse}} \leq 2 - 3$ с, $R = 0,76$ м.

Проведены расчёты базового сценария разряда плазмы длительностью до 3 с, комплекс теплофизических и механических расчётов, которые позволили разработать концепцию электромагнитной системы и вакуумной камеры установки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Соглашение № 21-79-20133 от 24.03.2021 между РФФИ и организацией АО «НИИЭФА»). В работе была использована база данных уникальной научной установки «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав федерального центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Литература

- [1]. В.Б. Минаев, А.Б. Минеев, Н.В. Сахаров, Ю.В. Петров, Н.Н. Бахарев, Э.Н. Бондарчук, А.В. Бондарь, В.И. Варфоломеев, А.А. Воронова, В.К. Гусев, В.В. Дьяченко, А.А. Кавин, И.В. Кедров, А.Ю. Конин, А.М. Кудрявцева, Г.С. Курские, А.Н. Лабусов, И.В. Мирошников, И.Ю. Родин, В.Н. Танчук, В.А. Трофимов, О.Г. Филатов, П.Б. Щёголев // Физика плазмы, 2023, Т. 49, № 12, С. 1375

ИНЖЕКЦИЯ ВОДОРОДА ИЗ КООКСИАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКУЮ ЛОВУШКУ

Багрянский П.А., Колесников Е.Ю.

*Институт ядерной физики СО РАН им. Г.И. Будкера, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: E.Yu.Kolesnikov@inp.nsk.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.047

В данной работе представлены результаты экспериментов по инжекции водорода из коаксиального плазменного ускорителя в ГазоДинамическую Ловушку (ГДЛ).

ГДЛ [1] это осесимметричный пробкотрон с двухкомпонентной плазмой. Первая компонента — это быстрые ионы со средней энергией около 10 кэВ. Они создаются при инжекции пучков нейтральных атомов с энергией 20 кэВ. Вторая компонента – это относительно холодная мишенная плазма со средней энергией порядка 100 эВ. Эта компонента выполняет несколько функций. Во-первых, она служит мишенью для захвата пучков нейтральных атомов. Во-вторых, служит для стабилизации дрейфово-конусных неустойчивостей, вызванных неравновесностью функции распределения быстрых ионов, связанной с незаполненностью конуса потерь для бесстолкновительных быстрых ионов в открытых ловушках [2]. Мишенная плазма за счет высокой столкновительности заполняет конус потерь, стабилизируя неустойчивости. И, в-третьих, поток мишенной плазмы через магнитные пробки поддерживает электрический контакт между плазмой ловушки и торцевыми плазмоприемниками, позволяя использовать радиальное электрическое поле для стабилизации МГД неустойчивостей плазмы методом вихревого удержания. [3] При этом мишенная плазма свободно покидает ловушку в столкновительном газодинамическом режиме. Суммарный эквивалентный ток потерь мишенной плазмы в ГДЛ можно оценить в 1 кА. Таким образом, возникает задача поддержания баланса мишенной плазмы, особенно при переходе к квазистационарным временам существования плазмы в открытой ловушке.

Для решения этой задачи было решено использовать инжекцию плазмы в ГДЛ с помощью коаксиального плазменного ускорителя, также известного как пушка Маршалла [4]. В ускорителе диаметром 4 см между двумя коаксиальными электродами ускоряется около 10^{20} ионов водорода до энергии порядка 100 эВ. Плотность получившейся струи вещества порядка $10^{15} - 10^{16}$ см³. Как было показано в предыдущей работе [5], при движении в ускорителе струя плазмы активно нейтрализуется и на выходе ускорителя большая часть энергии разогнанной струи вещества находится в нейтральной компоненте.

В ходе эксперимента струя водорода инжестировалась поперек магнитного поля установки, где величина магнитного поля составляет около 7 кГс. В работе представлены результаты измерения параметров ГДЛ различными диагностиками до и после инжекции.

Литература

- [1]. А.А. Иванов, В.В. Приходько. Газодинамическая ловушка: результаты исследований и перспективы // УФН, т. 187, № 5, с. 547-574 (май 2017). DOI: 10.3367/UFNr.2016.09.037967.
- [2]. I.A. Kotelnikov, I.S. Chernoshtanov, V.V. Prikhodko. Electrostatic instabilities in a mirror trap revisited // Physics of Plasmas v. 24, p. 122512 (2017). DOI: 10.1063/1.5013059.
- [3]. Alexei D. Beklemishev, Peter A. Bagryansky, Maxim S. Chaschin & Elena I. Soldatkina (2010) Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps // Fusion Science and Technology, 57:4, 351-360, DOI: 10.13182/FST10-A9497.
- [4]. А.И. Морозов Введение в плазмодинамику. 2е изд. М.: Физматлит, 2008.
- [5]. Е.Ю. Колесников // L Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 20 – 24 марта 2023, ICRAF-2023. Сборник тезисов докладов, с. 139.

ИСПЫТАНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛИТИЕВОЙ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ В УСТАНОВКЕ ПЛМ

¹Коньков А.А., ¹Чан К.В., ^{1,3}Кавыршин Д.И., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Федорович С.Д.,
^{1,2}Карпов А.В., ¹Лукашевский М.В., ^{1,2}Рогозин К.А.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

³Объединённый институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.048

Использование жидкометаллических литиевых капиллярно-пористых систем (КПС) в качестве обращенных к плазме поверхностей [1, 2] в токамаках представляется перспективным решением проблемы взаимодействия плазма-стенка в стационарном термоядерном реакторе. Необходимо провести испытания жидкометаллических КПС при длительной плазменной нагрузке для определения режимов оптимальной эксплуатации КПС.

На плазменной установке ПЛМ проведены экспериментальные испытания жидкометаллической литиевой КПС стационарными потоками плазмы. Используются несколько режимов работы установки ПЛМ с разными температурами катода установки и потенциалами, подаваемыми на КПС для термостабилизации температуры ее поверхности. Температура поверхности КПС и скорость испарения с нее лития зависят от характеристик плазмы и знака потенциала на КПС. Зарегистрированы значения температуры поверхности КПС от 690 до 720 К, поток испарения лития $5 \times 10^{21} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, электронная температура приповерхностной плазмы от 1 до 3 эВ.

После плазменных экспериментов проведён анализ поверхности КПС с использованием сканирующего электронного микроскопа. Не были выявлены изменения структуры молибденовой сетки КПС после плазменной нагрузки, что свидетельствует об эффективном экранировании металла жидкометаллической поверхностью и испаренным в плазму литием. На поверхности КПС после испытаний зарегистрированы наноструктуры и кристаллиты из литиевых материалов, сформированные при охлаждении материалов КПС и сложных процессах агломерации материалов на поверхности. Структура литиевой поверхности КПС после плазменных испытаний схожа с литиевыми структурами, наблюдавшимися на токамаках Т-10 и Т-11М при испытаниях КПС.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 21-79-10281.

Литература

- [1]. S.V. Mirnov // J. Nucl. Mater. 390 (1), 876-885 (2009).
- [2]. I.E. Lyublinski et al. // Nuclear Fusion 57(6), 066006 (2007).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА НЕЙТРАЛОВ ВОЛЬФРАМА В ЛИМИТЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА

Кожурин А.А., Хайрутдинов Р.Р., Лукаш В.Э.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.049

Сценарии ввода тороидального тока в плазму включают рост сечения плазменного шнура у внутренней стенки, где напряженность вихревого электрического поля выше. Моделирование таких сценариев можно проводить с помощью кода ДИНА [1]. Транспорт частиц и энергии в ДИНЕ одномерный. Реально же плазма, ограниченная внутренней стенкой, формирует лимитерную конфигурацию, где за пределами последней замкнутой магнитной поверхности (LCMS) потоки ионов активно распыляют материал поверхности стенки. Известная проблема загрязнения основной плазмы тяжёлыми примесями требует совершенствования моделей переноса, в частности внутри LCMS.

В данной работе рассматривается перенос нейтралов вольфрама, распыленных со стенки, в лимитерной конфигурации плазмы ИТЭР. Соответствующие сценарию из базы IMAS [2] равновесные двумерные профили параметров периферийной плазмы с нейтралами дейтерия и вольфрама были рассчитаны с помощью программного комплекса SOLPS-ITER [3]. Также расчеты переноса нейтралов вольфрама проводились с помощью нового двумерного Монте-Карло кода MCN-2D [4] с несколькими моделями распыления. Целью работы являются: оценка правок в граничное условие на LCMS для потока распыленных нейтралов вольфрама в лимитерной конфигурации, проверка применимости в данном случае реализованных в ДИНЕ одномерных транспортных моделей нейтралов и апробация кода MCN-2D. Более подробная постановка расчетов, описание используемых моделей и анализ результатов расчета будут представлены в полной версии доклада.

Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса» НИЦ «Курчатовский институт», <http://ckp.nrcki.ru/>.

Литература

- [1]. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. // Journal of Computational Physics, 1993, V. 109, No. 2, P. 193.
- [2]. Pinches S.D. et al. // Preprint: 2018 IAEA Fusion Energy Conf. TH/P6-7, 2018.
- [3]. Rozhansky V.A. et al. // Nucl. Fusion, 2001, V. 41, P. 387.
- [4]. Кожурин А.А. и др. // ЛаПлаз-2023: Сборник трудов конференции, 2023.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ НЕЛОКАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ТЕПЛА ПРИ ИНЖЕКЦИИ ПОЛИСТИРОЛОВЫХ МАКРОЧАСТИЦ В ПЛАЗМУ ГЕЛИОТРОНА LHD

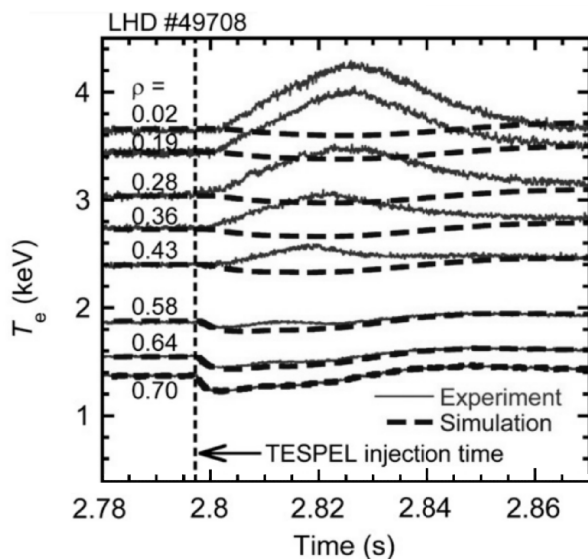
¹Кривошеев А.Н., ¹Сергеев В.Ю., ²Скоков В.Г., ¹Лашкина Ю.С.

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

²Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.050

Явление «нелокального переноса» (нагрев/охлаждение центра плазмы при охлаждении/нагреве периферии) до сих пор не имеет общепринятого объяснения. Пример такого явления после инъекции полистироловой макрочастицы в плазму гелиотрона LHD [1] показан на рисунке красными кривыми. Синими пунктирными линиями на рисунке показаны расчетные эволюции температуры электронов с коэффициентом электронной температуропроводности $\chi_e^{PB}(r)$ из стационарного уравнения энергобаланса в рамках диффузионной модели неподвижной плазмы. Делаются попытки объяснить это явление пространственно-временной эволюцией коэффициента электронной температуропроводности $\chi_e(r, t)$. Физические модели, объясняющие такую эволюцию, только создаются [1, 2].



В работе [3] указано, что при создании возмущения параметров плазмы необходимо учитывать возможность нарушения равновесия и движения плазмы, которое может приводить к обмену тепловой и магнитной энергии в процессе распространения возмущения. Моделирование движения плазмы со скоростью $v(r, t)$ при инъекции макрочастицы в установку LHD [4] продемонстрировало работоспособность такого подхода.

В данном докладе развиваются алгоритмы для исследования обоих вышеуказанных подходов с использованием экспериментальных данных эволюции электронной температуры $T_e(r, t)$ и плотности $n_e(r, t)$ на LHD. Алгоритмы позволяют восстанавливать

эволюцию или $\chi_e(r, t)$ в предположении $v(r, t) \equiv 0$, или $v(r, t)$ в предположении $\chi_e(r, t) \equiv \chi_e^{PB}(r)$.

Развитые методики используются для анализа распространения возмущения в установке LHD [2], в которой экспериментально продемонстрировано, что проявления «нелокального переноса» зависит от плотности плазмы и/или от уровня создаваемого возмущения.

Работа поддержана ГК Росатом и Минобрнауки России в рамках Федерального проекта 3 (U3), проект № FSEG-2023-0018 «Разработка и создание систем струйной и пеллет инъекции с повышенными производительностью и ресурсом».

Литература

- [1]. N. Tamura et al. // Nucl. Fusion 47, 449 (2007).
- [2]. S. Inagaki et al. // Plasma Phys. Control. Fusion 52, 075002 (2010).
- [3]. V.D. Pustovitov // Plasma Phys. Control. Fusion 54, 124036 (2012).
- [4]. V.Yu. Sergeev et al. // Plasma and Fusion Research 14, 3402121 (2019).

УНИВЕРСАЛЬНОСТЬ НОРМИРОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ В ТОКАМАКАХ: ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

^{1,2,3}Кукушкин А.Б., ¹Сдвиженский П.А.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Kukushkin_AB@nrcki.ru,

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия,

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.051

Универсальность профилей температуры и плотности тороидального электрического тока как функций нормированного малого радиуса плазменного шнура в токамаке на стадии квазистационарности полного тороидального электрического тока была предложена Б. Коппи [1]. Проверка этой гипотезы (начиная с [2]) и создание эвристических теоретических моделей (обоснование феномена т.н. «самосогласованности профиля»), начиная с [3, 4] и близких подходов) показали ее продуктивность. Современное состояние подхода, основанного на развитии идей [1, 3, 4] с учетом экспериментальных данных с различных установок, представлено в монографии [5].

Гипотеза [1] подтверждена недавним статистическим анализом [6] пространственно-временной динамики профилей электронной температуры T_e и плотности n_e в примерно девяти тысячах разрядов в токамаке JET в течение последних 10 лет его работы. Дополнительно обнаружено, что сильные, до ~100% по амплитуде, скачки температуры электронов на стадии квазистационарности (плато по времени, flat-top) полного тороидального электрического тока в плазменном шнуре, вызванные включением сильного дополнительного нагрева плазмы (общей мощностью вплоть до 20 МВт), могут быть описаны скачками усредненной по пространственной переменной температуры, если для описания стационарной формы (но не абсолютных значений) пространственного профиля температуры используются найденные универсальные нормированные профили.

В докладе представлен обзор экспериментов и теоретических моделей, указывающих на универсальность нормированных профилей температуры и плотности в токамаках и на сложности моделирования быстрых переходных процессов. Это включает, в частности, анализ времени существенного поднятия профиля T_e при сохранении универсального нормированного профиля T_e при включении мощного дополнительного нагрева в JET и сравнение с характерными временами, предсказываемыми современными моделями аномальной диффузии тепла; моделирование формирования «самосогласованных» профилей давления в турбулентной плазме токамака T-10 в режимах с омическим нагревом и в переходных режимах с включением электронно-циклотронного (ЭЦ) нагрева [7]; демонстрацию необходимости скачкообразного изменения коэффициентов переноса при включении ЭЦ-нагрева для объяснения экспериментов в токамаках T-10 [8] и ASDEX [9].

Литература

- [1]. Coppi B. 1980 // Comments Plasma Phys. Control. Fusion, 5 (6), 261–270.
- [2]. Esiptchuk Yu.V., Razumova K.A. 1986 // Plasma Phys. Control. Fusion 28, 1253.
- [3]. Kadomtsev B.B. 1987// Sov. J. Plasma Phys. 13, 443.
- [4]. Biskamp D. 1986 // Comments Plasma Phys. Contr. Fusion, 10, 165.
- [5]. Dnestrovskij Yu.N. Self-Organization of Hot Plasmas. The Canonical Profile Transport Model. Springer, 2015.
- [6]. Kukushkin A.B., Sdvizhenskii P.A. et al. // 2023 Plasma Phys. Control. Fusion 65, 075009.
- [7]. Пастухов В.П., Смирнов Д.В. 2016 // Физика плазмы, 42(4), 307–320.
- [8]. Andreev V.F. et al. // 2004 Plasma Phys. Control. Fusion 46, 319–335.
- [9]. Kirov K.K., Andreev V.F. et al. // 2006 Plasma Phys. Control. Fusion 48, 245–262.

СПЕКТР КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ

^{1,2,3}Кукушкин А.Б., ¹Куличенко А.А.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Kukushkin_AB@nrcki.ru,

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия,

³Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.052

Ранее [1, 2] было показано, что флуктуации плотности плазмы, наблюдаемые в токамаке Т-10 с помощью кросскорреляционной рефлектометрии ЭМ волн [3, 4], могут иметь турбулентное происхождение. Показатель спада в распределении Леви для вероятности длины свободного пробега флуктуаций плотности, найденный в формализме интегро-дифференциальных уравнений нелокального переноса флуктуаций в режиме типа «прогулок Леви», оказался близок к его аналогу в эмпирическом законе Ричардсона [5] для гидродинамической турбулентности газов и жидкостей. В [1, 2] также получено универсальное описание связи наблюдаемой квази-когерентной компоненты [3, 4] в спектре рассеянных ЭМ волн в плазме токамака Т-10 с процессом типа рассеяния Мандельштама-Бриллюэна.

В настоящей работе получены следующие результаты.

1. Получен общий аналитический результат для спектра удельной кинетической энергии флуктуаций плотности турбулентной среды в модели стационарной квазиоднородной (не обязательно изотропной) гидродинамической турбулентности. Спектр имеет универсальную зависимость от функции распределения по длине свободного пробега флуктуаций плотности плазмы в заданной квазиоднородной среде. Поскольку указанный спектр удельной кинетической энергии прямо связан с наблюдаемым спектром рассеяния ЭМ волн на флуктуациях плотности, из спектра рассеяния можно надежно определить характерные параметры кинетической энергии флуктуаций плотности.

2. Обобщена формула [1, 2] для кросскорреляционной функции рефлектометрического зондирования флуктуаций плотности квазиоднородной турбулентной среды на случай неизотропности среды. Этот результат охватывает случай плазмы в однородном магнитном поле и применим к измерениям кросс-корреляций в токамаке на, например, нескольких сантиметрах в плазме, вдали от периферии плазменного шнура с малым радиусом ~ 30 см.

3. Рассчитан спектр удельной кинетической энергии флуктуаций плотности плазмы по экспериментальным данным [4] на токамаке Т-10 и проведено сравнение с соответствующим спектром Колмогорова [6] для стационарной однородной гидродинамической турбулентности. Показано, что спектр энергии близок к колмогоровскому в крыле спектральной линии, называемой квазикогерентной компонентой [3] и соответствующей, как показано в [1, 2], рассеянию зондирующего излучения на флуктуациях плотности, движущихся по малому радиусу плазменного шнура (т.е. поперек сильного магнитного поля) в обоих направлениях – внутрь и наружу плазменного шнура – со средней скоростью $\sim 10^4 - 10^5$ см/с.

Литература

- [1]. Kukushkin A.B., Kulichenko A.A. // 2022 Symmetry 14(6), 1265 (32 pages).
- [2]. Кукушкин А.Б., Куличенко А.А. // 2022 Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез 45 (2), 105 – 122.
- [3]. Vershkov V.A., Soldatov S.V., Dreval V.V. // 1999 Rev. Sci. Instrum. 70, 1700.
- [4]. Urazbaev A.O., Vershkov V.A., Soldatov S.V., Shelukhin D.A. // 2006 Plas. Phys. Rep. 32, 443–460.
- [5]. Richardson L.F. // 1926 Proc. Roy. Soc. 110, 709.
- [6]. Kolmogorov A.N. // 1941 C.R. Acad. Sci. U.R.S.S. 30, 301.

РАДИАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

¹Кукушкин К.А., ^{1,2}Яшин А.Ю., ¹Рожанский В.А., ¹Кавеева Е.Г., ²Хромов Н.А.,
²Киселев Е.О., ¹Долгова К.В., ¹Пономаренко А.М.

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.053

Радиальное электрическое поле представляет большой интерес для изучения в рамках физики магнитного удержания высокотемпературной плазмы, так как именно радиальное электрическое поле приводит к возникновению шири дрейфовой скорости плазмы ($E \times B$ дрейф). Шир дрейфовой скорости путем подавления турбулентности плазмы позволяет осуществить переход в режим улучшенного удержания [1].

Эффективным методом изучения поперечной скорости плазмы и радиального электрического поля является диагностика доплеровского обратного рассеяния (ДОР). Данная диагностика была успешно применена для изучения L-H переходов на токамаке ASDEX Upgrade, причем полученные из экспериментов данные показали хорошее согласование с вычисленным по неоклассической формуле радиальным электрическим полем в различных режимах работы установки [2]. Для этих же целей аналогичные диагностики успешно применялись на установках LHD [3], EAST [4] и других.

Большое развитие диагностика ДОР получила на сферических токамаках Глобус-М и Глобус-М2. На данный момент на токамаке установлено два многочастотных рефлектометра с наклонными антеннами. Разные частоты зондирования позволяют исследовать как периферийные ($0.8 < \rho < 1.1$), так и центральные области плазменного шнура ($0.4 < \rho < 0.8$). Диагностика измеряет скорость перпендикулярного вращения плазмы путем регистрации доплеровского сдвига СВЧ-излучения, обратно рассеянного на флуктуациях плазмы, что позволяет построить профиль радиального электрического поля E_r [5]. С течением времени возникла идея сравнения полученных результатов с результатами численного моделирования.

Для этого в данной работе было проведено моделирование пристеночной плазмы токамака Глобус-М2 кодом SOLPS-ITER 3.0.8, в состав которого входят гидродинамический код V2.5 и код Монте-Карло для нейтральных частиц EIRENE. SOLPS-ITER уже успешно применялся для моделирования радиального электрического поля в установках ASDEX-Upgrade и ITER [6]. Для данной работы используемая в коде геометрия установки Глобус-М2 была обновлена по последним данным о параметрах вакуумной камеры токамака. Данные о магнитном равновесии были получены с помощью кода ruGSS по экспериментальным данным выбранного разряда. В ходе расчета проводилась корректировка по данным Томсоновской диагностики и диверторных зондов, собранным в моделируемом разряде.

По результатам моделирования было проведено сравнение радиального электрического поля, полученного различными способами: диагностикой ДОР в ходе экспериментов, моделированием пристеночной плазмы, по неоклассической формуле из измерений скорости тороидального вращения и транспортного моделирования в центре токамака.

Литература

- [1]. Biglari H. et al. // Phys. Fluids B Plasma Phys., 1990, 2, 1–4.
- [2]. Sauter P. et al. // Nucl. Fusion, 2011, 52, 012001.
- [3]. Tokuzawa, T. et al. // Rev. Sci. Instrum., 2018, 89, 10H118.
- [4]. Zhou, C. et al. // Rev. Sci. Instrum, 2013, 84, 103511.
- [5]. Yashin A. et al. // Appl. Sci. 2021, 11(19), 8975.
- [6]. Kaveeva E., Rozhansky V. // Plasma Phys, Control. Fusion, 2023, 65, 055020.

ИЗОТОПНЫЙ ЭФФЕКТ В РЕЖИМЕ С ГОРЯЧИМИ ИОНАМИ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

¹Курскиев Г.С., ¹Мирошников И.В., ¹Сахаров Н.В., ¹Гусев В.К., ¹Минаев В.Б.,
¹Петров Ю.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Бахарев Н.Н., ¹Киселев Е.О., ¹Жильцов Н.С.,
¹Щеголев П.Б., ¹Балаченков И.М., ¹Варфоломеев В.И., ¹Воронин А.В.,
¹Горяинов В.Ю., ²Кавин А.А., ¹Крикунов С.В., ¹Мельник А.Д., ²Минеев А.Б.,
¹Новохацкий А.Н., ¹Патров М.И., ³Петров А.В., ³Пономаренко А.М., ¹Скрекель О.М.,
⁴Соловей В.А., ¹Солоха В.В., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Токарев В.А., ¹Голстяков С.Ю.,
¹Тюхменева Е.А., ¹Хромов Н.А., ¹Чернышев Ф.В., ¹Шулятьев К.Д., ^{1,3}Яшин А.Ю.

¹*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия,*
²*Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия*
³*Политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия*
⁴*Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.054

Доклад посвящен экспериментальному исследованию нагрева плазмы сферического токамака Глобус-М2 при высоком тороидальном магнитном поле методом нейтральной инжекции. Инжекция пучка дейтерия в дейтериевую плазму позволяет получить существенно бóльшие значения температуры ионов, чем при нагреве дейтериевой плазмы водородным пучком, причем в обоих случаях ионная температура существенно превышает электронную, и плазма находится в т.н. режиме с горячими ионами [1, 2]. Похожие явления отмечены и в экспериментах на токамаке ST40 [3]. Время удержания энергии плазмы при нагреве дейтериевым пучком в два раза выше, чем при инжекции водорода, вследствие более высокой эффективности термоизоляции ионного компонента плазмы, в то время как перенос тепла по электронному каналу находится на одном и том же уровне. При инжекции водородного пучка нагрев ионов оказывается значительно менее эффективным из-за более высоких тепловых потерь по ионному каналу. В этом случае оценка средней ионной температуропроводности в эксперименте в 3 ÷ 4 раза превышает «неоклассическое» значение. При дейтериевой инжекции ионная температуропроводность близка к неоклассической. В анализируемых разрядах наблюдается разная скорость тороидального вращения плазмы. По данным диагностики активной спектроскопии перезарядки, при инжекции водородного пучка в центре плазмы скорость вращения плазмы достигает 120 км/с, а при инжекции дейтериевого – 170 км/с. Электронная температуропроводность в обоих случаях существенно не отличается. В разряде с дейтериевой инжекцией электронный канал является основным каналом тепловых потерь, полностью определяющим время удержания энергии плазмы. Эксперименты проведены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях".

Литература

- [1]. G.S. Kurskiev, I.V. Miroshnikov, N.V. Sakharov et al. // Nucl. Fusion 62, 104002 (2022).
- [2]. G.S. Kurskiev, N.V. Sakharov, V.K. Gusev et al. // Plasma Physics Reports 49, 403 (2023).
- [3]. S.M. Kaye et al. // Plasma Phys. Control. Fusion, 65 095012 (2023).

ДИАГНОСТИКА НАДТЕПЛООВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

^{1,2}Лисовой П.Д., ^{1,2}Саврухин П.В., ¹Шестаков Е.А., ^{1,2}Тепикин В.И., ¹Храменков А.В.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Lisovoy_PD@nrcki.ru

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.055

Развитие пучков ускоренных электронов с надтепловыми энергиями (20 – 300 кэВ) является характерной особенностью экспериментов на токамаках в режимах с развитием магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей при развитии срывов и при неиндукционном поддержании тока СВЧ волнами. Исследование пространственной и временной эволюции пучков электронов позволяет проанализировать физические механизмы развития МГД-возмущений, включая перезамыкание магнитных силовых линий, а также оценить эффективность применения СВЧ и ВЧ волн для поддержания тока в высокотемпературной плазме. Анализ эволюции ускоренных электронов может быть обеспечен с использованием многоканальных томографических систем регистрации рентгеновского излучения с надтепловыми энергиями.

В докладе рассматривается возможность оборудования на токамаке Т-15МД многоканальной системы регистрации надтеплового рентгеновского излучения (20 – 300 кэВ) на основе детекторов теллурида кадмия CdTe фирм Eurorad и BSI. Анализируется схема расположения четырех диагностических камер в одном тороидальном сечении: в верхнем (+90°), наклонных (+55° и –55°) и экваториальном (0°) патрубках для проведения томографической реконструкции распределения интенсивности рентгеновского излучения (рис. 1а). Пространственное разрешение обеспечивается трубчатыми свинцовыми коллиматорами и коллиматорами Соллера. Конструкция коллиматоров и CdTe детекторов, подключенных к системе предварительного усиления сигналов (операционные усилители с инвертирующим сигналом), обеспечивает пространственное и временное разрешение до 4 – 10 см и 1 мкс, соответственно. Для измерения распределения излучения в тороидальном направлении предусмотрена возможность поворота коллиматора, расположенного в экваториальном патрубке (рис. 1б). Для исследования спектра излучения применяется набор спектрометрических детекторов CdTe фирмы Eurorad и сцинтилляционных блоков детектирования на основе кристаллов бромида лантана LaBr₃(Ce).

В докладе приводятся результаты тестирования прототипа диагностики на основе CdTe детекторов на лабораторном стенде и в предварительных экспериментах на токамаке Т-15МД.

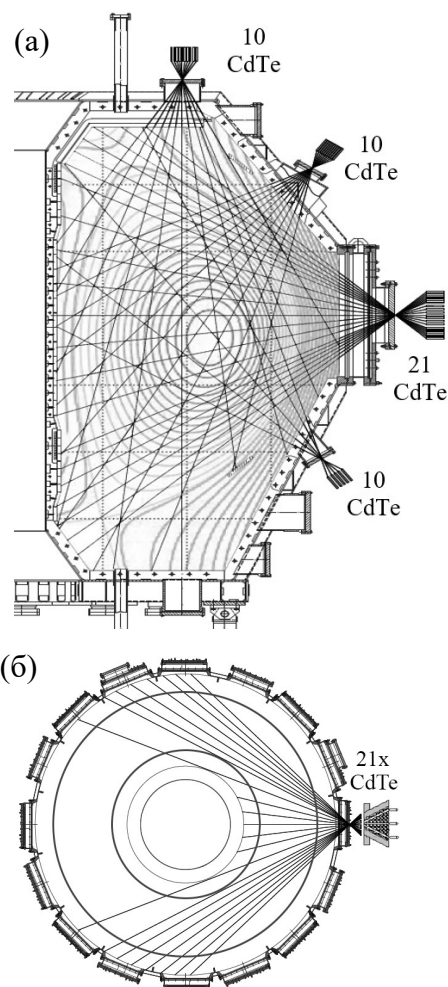


Рис. 1. Схематическое изображение диагностики надтеплового рентгеновского излучения на токамаке Т-15МД.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ КОРРЕЛЯЦИОННОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА НА ТОКАМАКЕ T-15МД

^{1,2}Логинов А.А., ¹Шелухин Д.А., ¹Вершков В.А., ^{1,2}Владимиров И.А.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «Московский физико-технический институт», г. Долгопрудный, Россия.

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.056

При изучении поведения высокотемпературной плазмы в токамаке особый интерес представляет исследование турбулентности и процессов недиффузионного переноса частиц и тепла в разряде. Одним из методов диагностики мелкомасштабных флуктуаций плотности является корреляционная рефлектометрия [1, 2]. В основе метода лежит зондирование плазменного шнура электромагнитной волной в области частот от 10 до 100 ГГц. По флуктуациям набега фазы отражённой волны можно судить о параметрах возмущений электронной плотности в окрестности поверхности отсечки.

Данная работа посвящена анализу ограничений при работе рефлектометрии на обыкновенной волне на установке T-15МД. Первое ограничение связано с поглощением волны при прохождении областей электронно-циклотронного резонанса. Второе – ограничение максимальной измеряемой амплитуды флуктуаций плотности, связанное с предельным возмущением набега фазы отраженной волны [2].

Для оценки условий, при которых будет возможно проведение измерений при произвольном размещении антенны в вакуумной камере и направлении зондирования, разработан код, позволяющий определить предельную амплитуду измеряемых флуктуаций и доступность для наблюдений рефлектометром областей внутри плазмы. Алгоритм применим к любой магнитной конфигурации. В частности, для типичных сценариев разряда с тороидальными полями в 1,0, 1,5 и 2,0 Тл получены и проанализированы случаи зондирования в направлении магнитной оси из экваториального, вертикального и наклонного портов со стороны слабого поля. Показано, что при зондировании из экваториального и наклонного портов в плазме существуют обширные области недоступности, однако в определённых сценариях существует область прозрачности вплоть до центра плазменного шнура. При измерениях из вертикального патрубка существенных ограничений на область наблюдения не наблюдается. Максимальная измеряемая амплитуда флуктуаций в центральной и градиентной частях составляет 0,2 – 0,6 %, а на периферии достигает 1 – 2 %.

Помимо этого, в докладе будут представлены результаты оценок связи антенн и соотношения сигнал-шум.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Costley A.E., Cripwell P., Pretince R., Sips A.C.C. // Rev. Sci. Instrum. 1990. V. 61. № 10. P. 2924.
- [2]. Verzhkov V.A., Dreval V.V., Soldatov S.V. A Three-Wave Heterodyne Correlation Reflectometer developed in the T-10 tokamak // Rev. Sci. Instrum. 1999. V. 70. № 3. P. 1700–1709.
- [3]. Mazzucato E., Nazikian R. // Rev. Sci. Instrum., 1995, 66 (2), p. 1237–1240.

РОЛЬ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ В ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССАХ В САМООРГАНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ В ТОРОИДАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ

Мещеряков А.И., Гришина И.А.

*Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва,
Россия, e-mail: meshch@fpl.gpi.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.057

На многих токамаках в режимах с дополнительным нагревом наблюдается эффект улучшения удержания плазмы в условиях напуска примесей (гелий, неон, аргон) [1, 2]. При этом, несмотря на очевидный рост радиационных потерь, происходит увеличение энергосодержания и энергетического времени жизни плазмы. В частности, явление улучшения удержания плазмы при напуске примесей исследовалось на токамаке Т-10 в режимах с дополнительным электронным циклотронным резонансным (ЭЦР) нагревом [2]. Авторы работы [2] объясняют это явление, используя концепцию самоорганизации плазмы. Поскольку рост радиационных потерь при напуске примесей, казалось бы, должен приводить к ухудшению удержания плазмы, разрешить это противоречие можно, выяснив, какую роль играют радиационные потери в механизме самоорганизации плазмы и в транспортных процессах в плазме тороидальных магнитных ловушек.

В данной работе анализировалось удержание энергии плазмы в стеллараторе Л-2М в режиме электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева. Удержание энергии исследовалось как на квазистационарной стадии, так и на стадии релаксации после выключения ЭЦР нагрева. Получены экспериментальные зависимости времени удержания энергии плазмы от мощности радиационных потерь. В этих экспериментах дополнительный напуск примесей не производился, но возрастание радиационных потерь происходило за счет поступления примесей со стенки. Для стелларатора Л-2М этими примесями были бор и углерод (легкие примеси, которые излучают на периферии плазменного шнура). Полученные зависимости свидетельствуют о том, что увеличение радиационных потерь из краевой плазмы на стеллараторе Л-2М не приводит к ухудшению удержания плазмы.

Объяснение этого эффекта может состоять в том, что удержание плазмы в стеллараторе Л-2М и суммарные тепловые потоки в ней по различным каналам потерь (теплопроводностные потери, диффузионные потери, турбулентные потери, радиационные потери и т.д.) определяются явлением самоорганизации плазмы. Увеличение радиационных потерь приводит лишь к перераспределению тепловых потоков: уменьшаются тепловые потоки в других каналах потерь. Этот факт установлен экспериментально.

На основании проведенных экспериментов предложено объяснение эффекта увеличения энергосодержания плазмы, наблюдаемое при дополнительном напуске примесей в токамаках.

Литература

- [1]. R.R. Weynants et al. // Nucl. Fusion 39, 1637 (1999).
- [2]. K.A. Razumova et al. // Plasma phys. Rep. 43, 1043 (2017).

2D-4D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ЦЕНТР ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА В СТЕЛЛАТОРЕ Л-2М. ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОДА ASTRA

¹Мещеряков А.И., ¹Гришина И.А., ²Касьянова Н.В.

¹Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия,

e-mail: meshch@fpl.gpi.ru

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.058

В работе [1] выполнено 2D и 3D моделирование проникновения нейтральных частиц в плазму с помощью программы, учитывающей экспериментальные условия в режиме омического нагрева на стеллаторе Л-2М. Получены радиальные распределения нейтралов и модельные энергетические спектры потока нейтралов, вылетающих из плазмы. При проведении 2D моделирования использовалась плоско-слоистая модель плазмы с одномерной функцией распределения нейтралов в пространстве скоростей. 3D моделирование предполагало цилиндрическую модель плазмы и двумерное распределение нейтралов по скоростям.

Для верификации работы программы было проведено контрольное моделирование с использованием широко известного кода ASTRA. В коде ASTRA при расчете проникновения нейтралов со стенки также используется плоско-слоистая модель плазмы с одномерной функцией распределения в пространстве скоростей [2]. При этом в кинетическое уравнение в двух местах введен коэффициент $\sqrt{3}$, чтобы приблизить результаты расчета с одномерной функцией распределения в пространстве скоростей к результатам расчета с трехмерной функцией распределения в пространстве скоростей:

$$v \frac{\partial f_N}{\partial x} + \left(s_{ion}^{(e)} n_e + s_{ion}^{(i)} n_i + s_{cx} n_i \right) f_N = \frac{\sqrt{3}}{2} n_i (s_{cx} N + s_{rec} n_e) \delta \left(v \pm \frac{v_{Ti}}{\sqrt{3}} \right),$$

где v и v_{Ti} – скорость нейтралов и тепловая скорость ионов, N – плотность нейтралов, n_e и n_i – плотности электронов и ионов, f_N – функция распределения нейтралов по скоростям, s_{ion} – скорости ионизации электронным и ионным ударом, s_{cx} – скорость перезарядки, s_{rec} – скорость рекомбинации.

С использованием обеих программ проведены вычисления проникновения нейтралов со стенки в центр плазменного шнура при одинаковых параметрах плазмы. По результатам верификации получено систематическое расхождение расчетов с использованием вышеуказанных программ: расчеты по коду ASTRA дают большую концентрацию нейтралов в центральных областях плазмы. Расхождение можно устранить, если в программе, написанной для стеллатора Л-2М, аналогичным образом добавить коэффициент $\sqrt{3}$ в правой части уравнения (1). Это показывает корректность работы программы, написанной для Л-2М.

Было также проведено моделирование проникновения нейтральных частиц с использованием плоско-слоистой модели плазмы и двумерной и трехмерной функцией распределения нейтралов по скоростям (3D и 4D моделирование). Моделирование показало, что при использовании двумерной функции распределения нейтралов по скоростям, проникновение нейтралов в центральные области плазмы совпадает с результатами расчетов с одномерной функцией распределения нейтралов по скоростям, если тепловую скорость нейтралов уменьшить в $\sqrt{3}$ раз. Другими словами, введение коэффициента $\sqrt{3}$ позволяет приблизить результаты одномерных по скоростям расчетов к двумерным (но не трехмерным).

Литература

- [1]. А.И. Мещеряков, И.Ю. Вафин, С.Е. Гребенщиков, И.А. Гришина // Физика плазмы (2023), т. 49, стр. 1070.
 [2]. G.V.Pereverzev, P.N Yushmanov, Preprint IPP 5/98.Garching, Germany, 2002.

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ МНОГОПРОХОДНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ИНЖЕКТИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПЛАЗМОЙ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА В ТОКАМАКАХ

¹Минашин П.В., ^{1,2}Филипенко Д.Р., ^{1,2}Кукушкин А.Б.

¹*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Minashin_PV@nrcki.ru,*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия.*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.059

Электронно-циклотронный (ЭЦ) резонансный нагрев широко используется в действующих токамаках на квазистационарной стадии разряда для дополнительного нагрева плазмы и генерации неиндуктивного тока [1]. Но в больших токамаках со сверхпроводящими катушками (ИТЭР, ДЕМО) ЭЦ-нагрев будет применяться и на начальной стадии разряда (предионизация, преодоление радиационного барьера, стадия подъема тока). Это связано с технологическими особенностями, из-за которых достижимая величина ускоряющего тороидального электрического поля мала по сравнению с необходимым значением для ионизации плазмы и генерации плазменного тока, что приводит к невозможности надежного получения плазмы с помощью чисто омического нагрева [2 – 4].

Температура и плотность плазмы на начальной стадии разряда в токамаках таковы, что невозможно реализовать полное ЭЦ-поглощение инжектированной в плазму электромагнитной (ЭМ) волны на одном проходе волны до отражения от первой стенки. Поэтому при моделировании начальной стадии разряда в токамаках для сценариев с использованием дополнительного ЭЦ-нагрева требуется учитывать многопроходное ЭЦ-поглощение волн. Такое моделирование можно проводить с помощью разных моделей: (1) модифицированные лучевые коды для расчета ЭЦ-нагрева, в которых учитываются несколько проходов ЭЦ-волны, изменение поляризации ЭЦ-волн при отражении от стенки и поглощение волны в стенке (как, например, в коде TORAY [5]); сюда относятся и лучевые коды, упрощенные для условий начальной стадии разряда (использование аналитических коэффициентов поглощения ЭЦ-волн в разреженной максвелловской плазме [6]); (2) модель для учета многопроходного поглощения в приближении изотропного и однородного размешивания излучения после первого отражения от стенки вакуумной камеры [7] (модель кода CYNEQ для переноса собственного ЭЦ-излучения плазмы на немалых гармониках основной ЭЦ-частоты [8]) и мультирезонаторная модель для расчета излучения, рассеянного при отражении ЭМ-волн, инжектированных системой ЭЦ-нагрева плазмы [9].

В работе проведено сравнение существующих подходов к моделированию многопроходного ЭЦ-поглощения инжектированных ЭМ-волн плазмой на начальной стадии разряда в токамаках.

Литература

- [1]. Prater R. // *Physics of Plasmas*, 2004, 11, 2349-2376.
- [2]. Lloyd B., Carolan P.G. // *Plasma Phys. and Contr. Fusion*, 1996, 38, 1627-1643.
- [3]. Stober J., Jackson G.L., Ascasibar E., Bae Y.S., et al. // *Nuclear Fusion*, 2011, 51, 083031.
- [4]. de Vries P.C., Gribov Y. // *Nuclear Fusion*, 2019, 59, 096043.
- [5]. Granucci G., Garavaglia S., Ricci D., Artaserse G., et al. // *Nuclear Fusion*, 2015, 55, 093025.
- [6]. Bornatici M., Cano R., De Barbieri O., Engelmann F. // *Nuclear Fusion*, 1983, 23, 1153.
- [7]. Minashin P.V., Kukushkin A.B., Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. // *EPJ Web of Conferences*, 2015, 87, 03005.
- [8]. Kukushkin A.B. // *Proc. 14th IAEA Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Wuerzburg, Germany, 1992, IAEA, 2, 35-45.
- [9]. Moseev D., Oosterbeek J.W., Sirinelli A., Corre Y., et al. // *Fusion Engineering and Design*, 2021, 172, 112754.

СТ (СФЕРИЧЕСКИЕ ТОКАМАКИ), КАК ГЕНЕТИЧЕСКИЙ СБОЙ В СЕМЕЙСТВЕ ТОКАМАКОВ И СТЕЛЛАТОРОВ

Мирнов С.В.

Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Троицк,
г. Москва, Россия, e-mail: mirnov@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.060

Обнаружение того факта, что энергетическое время τ_E «классического» токамака растет не от тороидального магнитного поля, а от тока J_p [1] сразу же породило попытки оптимизации магнитной конфигурации токамака, с использованием в качестве главного оптимизационного параметра ток. Так родилось предложение Арцимовича – Шафранова об удлинении шнура по вертикали k без изменения запаса устойчивости $q(a)$. Успех этой акции вдохновил последователей на следующие шаги. Наиболее радикальным из них стало предельное уменьшение большого радиуса R вплоть до удаления радиационной защиты, урезания катушек магнитного поля и индуктора. Авторы при этом отдавали себе отчет, что катушки, оставшись без защиты, рано или поздно придут в негодность и служить далее реактором УТС не смогут. Утешением было, что перед этим они дадут ученым новые знания о природе. Отсюда и возник вопрос: «Имеют ли эти устройства термоядерное будущее? [2]». Сегодня ответ: «при некоторых возникающих необходимости смогут». На каких особенностях следовало бы заострить внимание? Лет 20 назад автор некоторое время работал на NSTX ($R/a = 1,3$, USA [3]). Остались ощущения и размышления. Главная особенность СТ – радикальная роль запертых электронов. СТ, фактически, пробкотрон. Компактными или сферическими токамаками принято считать замкнутые плазменные ловушки с большой долей запертых электронов, обладающие магнитными конфигурациями, топологически идентичными классическому токамаку, но предельно «прижатыми» по R к внутреннему обводу магнитного соленоида тороидального поля ($R/a = \epsilon < 1,5$, рис. 1). Это дало:

1. Скейлинг для τ_E , с радикальным «сбоем генетики» в сторону от ИТЭРовского скейлинга.
 2. Ток J_p меньший в 1,5 – 2 раза (рис. 2) по сравнению с расчетным при $q(a) = 3$.
 3. По сути, импульсный режим работы (0,5 – 1 с, NSTX, MAST) по сравнению с токамаками.
- Совет – перестроить курс на создание компактных материаловедческих ТИНов.

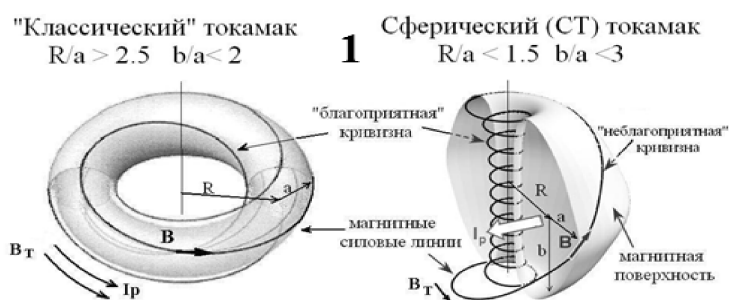


Рис.1 Магнитные конфигурации токамака и СТ.

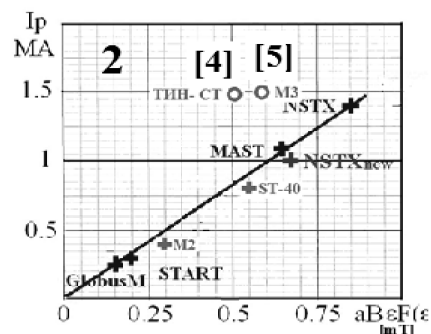


Рис. 2. Максимальные токи J_p , реально полученные на разных СТ(+), и рассчитанные (o) в предположении $q(a) = 3$

Литература

- [1]. Gorbunov E.P., Mirnov S.V., Strelkov V.S. // Nucl. Fus., 1970, V. 10, P. 43.
- [2]. Мирнов С.В. // Физика плазмы, 2012, том 38, № 12, с. 1011–1021.
- [3]. Semenov I.B., Mirnov S.V., Darrow D. et al. // Phys. Plasmas, 2003, V. 10, P. 664.
- [4]. Кутеев Б.В., и др. // Физика плазмы, 2010, Т. 36, С. 307
- [5]. Минеев А.Б. и др. // ВАНТ, серия Термоядерный синтез, 2021, Т. 44, Вып. 3, С. 37.

НИЗКОПороГОВЫЙ ДВУХПЛАЗМОННЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РАСПАД НЕОБЫКНОВЕННОЙ ВОЛНЫ ПРИ МОНОТОННОМ ПРОФИЛЕ ПЛОТНОСТИ

Наговицын А.А., Гусаков Е.З., Попов А.Ю.

*Физико-технический институт им А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: nagovitsyn@mail.ioffe.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.061

Электронный циклотронный резонансный нагрев (ЭЦРН) хорошо зарекомендовал себя в тороидальных установках магнитного удержания плазмы. Однако в последнее время в ходе ЭЦРН экспериментов обнаружен целый ряд аномальных паразитных эффектов: появление мощного СВЧ-излучения плазмы [1, 2], которое может приводить к повреждению измерительного оборудования [3], и генерация групп ускоренных ионов [4, 5]. Эти явления наблюдались при появлении на пути пучка СВЧ-волн области плазмы с немонотонным – из-за присутствия магнитного острова [6] или “electron rump-out” эффекта [7] – профилем плотности. Они были интерпретированы как последствия низкопороговой параметрической распадной неустойчивости (ПРН) волны накачки, в результате которой возбуждались дочерние волны, локализованные около локального максимума плотности [8].

В настоящей работе аналитически, основываясь на результатах работ [9, 10], и численно показано, что низкопороговая ПРН необыкновенной волны, сопровождающаяся возбуждением нелокализованных дочерних верхнегибридных (ВГ) волн, может наблюдаться и при монотонном профиле плотности и магнитного поля. Сценарий реализуется при наличии двух соседних точек распада волны накачки. В этом случае при возбуждении дочерних волн, имеющих противоположно направленные групповые скорости, создается положительная обратная связь, что может приводить к нарастанию амплитуд ВГ волн во времени [11]. Полученные результаты позволяют под другим углом взглянуть на обнаруженный недавно при анализе многолетних данных токамака Т-10 эффект значительного уширения профиля энерговыделения [12, 13], и могут объяснить этот эффект как последствия возбуждения низкопорогового двухплазмонного распада субмегаваттной СВЧ-волны.

Аналитические выкладки выполнены при поддержке гранта РФФ 22-12-00010, численное моделирование - при поддержке госконтракта ФТИ 0040-2019-0023, код для моделирования разработан при поддержке госконтракта ФТИ 0034-2021-0003.

Литература

- [1]. S.K. Hansen, S.K. Nielsen, J. Stobe et al. // *Nucl. Fusion*, 2020, V. 60, P. 106008.
- [2]. A. Tancetti, S.K. Nielsen, J. Rasmussen et al. // *Nucl. Fusion*, 2022, V. 62, P. 074003.
- [3]. S.K. Hansen, A.S. Jacobsen, et al. // *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2021, V. 63, P. 095002.
- [4]. S. Coda for the TCV Team // *Nucl. Fusion*, 2015, V. 55, P. 104004.
- [5]. M. Martínez, B. Zurro, et al. // *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2018, V. 60, P. 025024.
- [6]. M.Yu. Kantor, A.J.H. Donne, et al. // *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2009, V. 51, P. 055002.
- [7]. C. Angioni, A.G. Peeters, X. Garbet, et al. // *Nucl. Fusion*, 2004, V. 44, P. 827.
- [8]. Е.З. Гусаков, А.Ю. Попов // *УФН*, 2020, Т. 190, С. 396–420.
- [9]. M.N. Rozenbluth // *Phys. Rev. Lett.*, 1972, V. 29, P. 565.
- [10]. А.Д. Пилия // *ЖЭТФ*, 1973, Т. 64, С. 1237.
- [11]. А.Д. Пилия // *Письма в ЖЭТФ*, 1973, Т. 17, С. 374.
- [12]. Ю.Н. Днестровский, А.В. Данилов // *Физика плазмы*, 2020, Т. 46, С. 387.
- [13]. Yu.N. Dnestrovskij, A.V. Danilov, et al. // *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2021, V. 63, P. 055012.

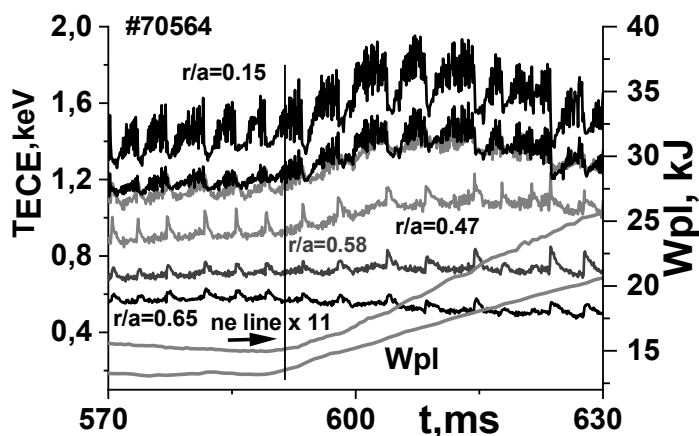
АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С НАПУСКОМ НЕОНА ПРИ ЭЦРН В ТОКАМАКЕ T-10 С ВОЛЬФРАМОВЫМ И УГЛЕРОДНЫМ ЛИМИТЕРОМ

Неудачин С.В., Борщеговский А.А., Земцов И.А., Немец А.Р., Пименов И.С.

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва,
Россия, e-mail: sneudat@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.062

В плазме с вольфрамовым лимитером был обнаружен новый тип L–H переходов, названный полуглобальным. Спонтанные переходы (включая квазипериодические переходы) наблюдаются лишь при одновременной со+contr-генерации тока ЕС-волнами мощностью 1,5 МВт [1 – 2]. В отличие от глобальных L–H переходов, обнаруженных на токамаках JET и JT-60U (см. [3] и ссылки внутри), рост температуры происходит лишь в центральной части шнура и формируется ВТБ. Часть результатов данного доклада опубликована в [2]. Анализ экспериментов [4 – 5] показал, что подобные переходы в плазме с вольфрамовым лимитером вызываются и напуском неона при различной мощности ЭЦ-нагрева. Пример перехода, вызванного напуском неона (начало за 5–10 мс до перехода) показан на рисунке. Коэффициент диффузии падает почти во всем объеме плазмы. Величина Z_{eff} растет в процессе напуска неона. Анализ эволюции профилей Z_{eff} , вольфрама и неона проводится в настоящий момент. Показано, что энергосодержание плазмы W почти линейно зависит от плотности, а роль ВТБ невелика во всех исследованных случаях. Заметные положительные последствия напуска неона не ясны.



Показано, что энергосодержание плазмы W почти линейно зависит от плотности, а роль ВТБ невелика во всех исследованных случаях. Заметные положительные последствия напуска неона не ясны.

Последствия напуска неона в плазме с углеродным лимитером анализируются в настоящее время. Переходов, подобных описанным выше, пока не обнаружено. Проверятся утверждения некоторых авторов [6], что величина W зависит, в первую очередь, от излучения плазмы, а не от плотности. Работа

выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Borschegovskiy A., Neudatchin S., Pimenov I. et al. // 2019 EPJ Web of Conf. 203, 02004.
- [2]. Neudatchin S.V., Borschegovskiy A.A., Pimenov I.S., Zemtsov I.A. // 2020 Proc. 28-th Fusion Energy Conference (virtual Conf. 2021) EX/P4-26.
- [3]. Neudatchin S. V., Takizuka T., et al. // Plasma Phys. Control. Fusion 44 A383-389 (2002).
- [4]. Kasyanova N.V., Rasumova K.A. et al. // 2018, in Procs. of 45th EPS Conf. on Pl. Ph, Prague, ECA, Vol 42A, P4. 1106.
- [5]. Kirneva N.A. et al. // 2018, 45th EPS Conf. on Pl. Ph., Prague, ECA, Vol 42A, P4. 1081.
- [6]. Разумова К.А., Борщеговский А.А., и др. // Физика плазмы 2017 т. 43 № 11, с. 879.

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЛИНЕЙНОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-NB ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ПУЧКА БЫСТРЫХ АТОМОВ

Никишин А.В., Баткин В.И., Иванов И.А., Куклин К.Н., Поступаев В.В.,
Ровенских А.Ф., Сидоров Е.Н.

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: A.V.Nikishin@inp.nsk.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.063

Установка ГОЛ-NB представляет собой линейную осесимметричную открытую ловушку с гофрированными магнитными пробками. Стартовая плазма в установке создаётся с помощью дуговой плазменной пушки, дальнейший нагрев осуществляется с помощью двух инжекторов быстрых нейтральных атомов, суммарной мощностью до 1 МВт [1]. Проектные параметры плазмы: температура ионов $T_i \sim 20$ эВ, плотность в центральной секции с пониженным полем $n = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Для изучения физики течения плазмы через многопробочную систему на установке используется ряд диагностических систем, одна из которых базируется на измерении линейной плотности плазмы по ослаблению пучка быстрых нейтральных атомов. Она установлена в середине длинной пробки с противоположной стороны от системы формирования стартовой плазмы. Диагностика собрана на базе широкоапертурного ионного источника «Старт», формирующего пучок атомов с энергией 8 кэВ и апертурой 100 мм, перекрывающей все сечение плазмы, текущей через пробку. Энергия пучка настраивается для оптимального измерения его потерь при движении сквозь плазму. Регистрация поперечного профиля тока пучка осуществляется с помощью двух наборов из 15 вторично-эмиссионных датчиков, расположенных на входе и на выходе пучка из установки. Контроль тока пучка на входе в установку позволяет значительно уменьшить влияние нестабильности тока пучка на результат измерений. Оба набора датчиков имеют идентичную геометрию и расположены на расстоянии 130 мм от центра плазменного шнура в точке локального нуля магнитного поля установки. В результате, с учетом расходимости пучка диагностика имеет поперечное пространственное разрешение 5,3 мм. Более подробно конструкция диагностической системы описана в [2].

В данном докладе представлены результаты измерения профиля линейной плотности плазмы в выходной секции гофрированного магнитного поля.

Литература

- [1]. Postupaev V.V., Batkin V.I., Beklemishev A.D., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Chernoshtanov I.S., Gorbovsky A.I., Ivanov I.A., Kuklin K.N., Mekler K.I., Rovenskikh A.F., Sidorov E.N., Yurov D.V. // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. doi:10.1088/1741-4326/57/3/036012.
- [2]. Никишин А.В., Иванов И.А., Баткин В.И., Бурдаков А.В., Куклин К.Н., Меклер К.И., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф. // Физика плазмы, 2022, том 48, № 3, с. 213–222. doi: 10.31857/S036729212203012X.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ГИРОТРОНА И ВОЛНОВОДНОГО ТРАКТА УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД ПРИ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА

Пименов И.С., Борщеговский А.А., Ахмедов Э.Р., Неудачин С.В., Новиков В.Н., Павлов В.Н., Рой И.Н., Севастьянов С.А., Шапотковский Н.В.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия. e-mail: Pimenov_IS@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.064

Установка токамак Т-15МД оснащена системой СВЧ-нагрева плазмы, в состав которой на данный момент входит один гиротрон с рабочей частотой излучения 82,6 ГГц и мощностью ~1 МВт [1–4]. Гиротрон и комплект дополнительного оборудования изготовлены компанией ЗАО НПП «Гиком» совместно с ИПФ РАН (г. Нижний Новгород). Чтобы исключить влияние рассеянного магнитного поля токамака, гиротронный стенд расположен на значительном удалении от установки. СВЧ-мощность передавалась по откачному волноводному тракту длиной ~30 м до поглощающей нагрузки с водяным охлаждением, которая, в свою очередь, герметично соединена с волноводной линией. Нагрузка рассчитана на прием СВЧ-излучения мегаваттного уровня в непрерывном режиме и не предназначена для проведения точных калориметрических измерений.

В данной работе представлены результаты первых (наладочных) испытаний гиротрона совместно с волноводным трактом при работе на поглощающую нагрузку. Длительность высоковольтного импульса от источника питания «Виктория» составляла величину ~10 с.

В ходе испытаний, варьируя длительность импульса и выходную мощность гиротрона, проводилась тренировка зеркально-волноводной линии передачи и поглощающей нагрузки. Процесс тренировки сопровождался СВЧ-пробоями на отдельных участках вакуумного тракта, которые не приводили к значительному ухудшению вакуума, вследствие быстрого срабатывания системы защит и сводили к минимуму влияние этих пробоев на работу гиротрона.

В рамках отведенного времени была достигнута длительность импульса $T = 9,4$ с при номинальных параметрах работы гиротрона. При отсутствии калибровочных измерений была получена грубая оценка поглощенной мощности, проведенная по разностным сигналам с термодатчиков, установленных на входе и выходе водяного контура охлаждения нагрузки, которая составила величину ~0,8 МВт. Причиной ограничения длительности импульса, на значении 9,4 секунды, явилось техническое ограничение программного средства управления записью аналоговых сигналов (напряжение и ток катодного и анодного источников), которое впоследствии было устранено.

Измерения температуры элементов зеркально-волноводного тракта и конструкции поглощающей нагрузки, проведенные с помощью тепловизора в паузе между импульсами, не выявили каких-либо областей перегрева.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Хвостенко П.П., Анашкин И.О. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42. вып. 1, стр. 15 – 38.
- [2]. Денисов Г.Г., Малыгин В.И., Цветков А.И. и др. // Известия вузов, Радиофизика LXIII (5-6), 369 (2020)
- [3]. Пименов И.С., Белоусов В.И. и др. // Прикладная физика, № 1, с. 5 – 11 (2022)
- [4]. Пименов И.С., Борщеговский А.А. и др. // Успехи прикладной физики, 2023, том 11, № 5, с. 407 – 415.

МНОГОКАНАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ T-15МД

^{1,2}Рогозин К.А., ^{1,2}Квасков В.С., ¹Сушков А.В.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.065

Многопроволочные пропорциональные камеры были разработаны в ЦЕРН в 1968 году [1] и позже широко использовались в экспериментах по физике высоких энергий. Также их можно использовать для измерения интенсивности мягкого рентгеновского излучения плазмы в установках типа токамак [2, 3].

Преимуществом пропорциональных камер является высокий коэффициент газового усиления 10^5 (в зависимости от напряжения на детекторе), что позволяет обеспечивать оптимальный уровень сигнала в любом режиме работы токамака. Многопроволочные детекторы могут работать как в режиме пропорционального счётчика, генерирующего дискретные импульсы тока, пропорциональные энергии каждого обнаруженного фотона, так и в режиме постоянного тока, когда выходной ток детектора пропорционален интенсивности падающего рентгеновского излучения. Для квазистационарных термоядерных установок представляют интерес многохордовые измерения профиля интенсивности мягкого рентгеновского излучения, позволяющие исследовать флуктуации мягкого рентгеновского излучения из центральной области плазмы с высоким временным и пространственным разрешением.

На установке T-15МД многоканальная диагностика мягкого рентгеновского излучения предназначена для измерения радиального распределения мягкого рентгеновского излучения в диапазоне 1 – 10 кэВ. На период экспериментальной кампании 2023 – 2024 г. в установке T-15МД многопроволочный детектор установлен в вертикальном диагностическом патрубке и обеспечивает обзор плазмы по 32 хордам, в зоне $\pm 0,75$ малого радиуса по горизонтали с пространственным разрешением ~ 33 мм и временным разрешением порядка 30 мс.

В дальнейшем планируется увеличения количества хорд измерения до 64, а также установка дополнительных детекторов для обеспечения многоракурсных измерений и томографического восстановления двумерного изображения интенсивности мягкого рентгеновского излучения плазмы.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт»

Литература

- [1]. Charpak G. et al. The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles // Nucl. Instrum. Methods, 1968, V. 62, P. 262.
- [2]. Sushkov A.V. et al. High-resolution multiwire proportional soft X-ray diagnostic measurements on TCV // Review of Scientific Instruments, 2008, V. 79, P. 023506; DOI: 10.1063/1.2833822
- [3]. Sushkov A.V. et al. Duplex multiwire proportional X-ray detector for multichord time-resolved soft X-ray and electron temperature measurements on T-10 tokamak // Review of Scientific Instruments, 2008, V. 79, P. 10E319; DOI: 10.1063/1.2964999

КОНЦЕПЦИЯ ОПТОВОЛОКОННОГО ДАТЧИКА ТОКА ДЛЯ ТОКАМАКА Т-15МД

^{1,2}Саранча Г.А., ^{1,3}Дрозд А.С., ^{1,3}Кудашев М.С., ¹Сергеев Д.С.

¹Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Москва, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.066

Токамак Т-15МД – экспериментальная российская термоядерная установка [1], важным элементом работы которой является исследование поведения плазмы с токами мега амперного диапазона в длинном импульсе. В настоящее время в России нет работающих токамаков с током плазмы $I_{pl} \geq 1$ МА и длительностью плато тока $t_{\text{плато}} \geq 1$ с.

Основными инструментам для измерения тока плазмы в токамаках являются пояса Роговского и датчики Холла. Однако, интерпретация их результатов часто бывает осложнена учётом индуктивных эффектов или локальностью измерения магнитного поля.

На токамаке Т-15МД предлагается создание дублирующей пояс Роговского диагностики – оптоволоконного датчика тока (ОДТ), принцип работы которого основан на измерении угла поворота плоскости поляризации лазерного излучения в магнитном поле (магнитооптического эффекта Фарадея). Достоинством такого метода является линейная зависимость угла поворота плоскости поляризации от магнитного поля. При создании замкнутого контура из оптоволокна вокруг измеряемого тока, угол поворота будет зависеть только от токов, пронизывающих этот контур, что позволяет исключить влияние рассеянных полей установки. Такая диагностика активно используется и демонстрирует высокую точность и надёжность на таких мировых установках как JET [2] и EAST [3] и планируется к эксплуатации в токамаке ITER.

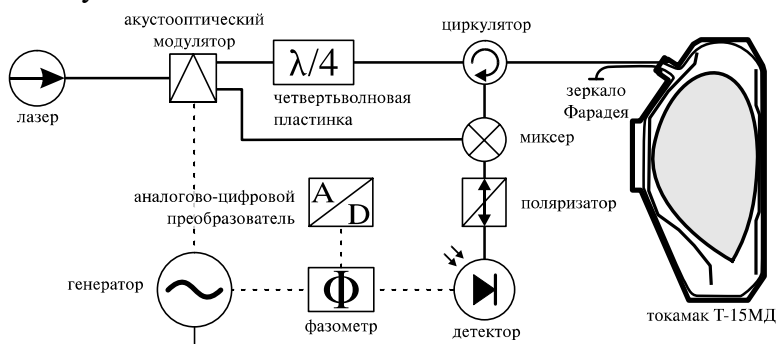


Рис. 1. Концептуальная схема ОДТ для токамака Т-15МД

В установке Т-15МД предлагается новая схема (рис. 1) измерения поворота угла плоскости поляризации, в которой создается изменение фазы колебаний лазерного излучения. Измерение фазового сдвига предлагается проводить относительно задающего

генератора на промежуточной частоте с помощью фазометра,

аналогичному успешно используемому в СВЧ-интерферометре токамака Т-15МД [4]. Такой подход позволит проводить измерения тока плазмы в мега амперном диапазоне в длинных импульсах в режиме реального времени. Рассмотрены параметры диагностики – оценена точность проводимых измерений и динамический диапазон в различных плазменных сценариях установки.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. П.П. Хвостенко и др. // ВАНТ Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15 – 38.
- [2]. W. Leysen et al. // Fusion Engineering and Design 2020, V. 160, P. 111754.
- [3]. M.M. Xue et al. // Fusion Engineering and Design 2019, V. 140, P. 11–15.
- [4]. A.S. Drozd et al. // Rev. Sci. Instrum. 2022, V. 93, P. 063501.

АНАЛИЗ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ГИРОТРОНА ТОКАМАКА Т-15МД

^{1,2}Саврухин П.В., ¹Шестаков Е.А., ^{1,2}Тепикин В.И., ^{1,2}Лисовой П.Д., ¹Храменков А.В.,
¹Рой И.Н., ¹Пименов И.С.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва,
Россия

²НИУ «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.067

Генераторы СВЧ излучения (гиротроны) эффективно используются в экспериментах на токамаках для дополнительного нагрева плазмы и неиндукционного поддержания тока, а также для предварительной ионизации газа на начальной стадии разряда. Безопасная и надёжная эксплуатация такого гиротронного комплекса требует применения эффективных мер защиты не только от СВЧ излучения, но и от рентгеновского излучения гиротронов. Измерение рентгеновского излучения и разработка систем экранирования для уменьшения потоков излучения при оперативном обслуживании гиротронов представляет интерес при проведении экспериментов на токамаках и для проектирования токамака-реактора (ИТЭР).

На токамаке Т-15МД планируется создание гиротронного комплекса, состоящего из 7 гиротронов. Генерируемая каждым из гиротронов мощность СВЧ излучения должна составлять, по крайней мере 1 МВт в импульсе длительностью от 20 до 30 секунд при эффективности генерации не менее 50% (предполагается использование системы рекуперации остаточной энергии электронного пучка). Высоковольтная система питания гиротронов обеспечивает ускоряющее напряжение до $U \sim 70$ кВ (напряжение катода – 46,5 кВ, напряжение анода + 24,5 кВ, ток катода I_c до 37 А) [1].

В докладе приведены результаты измерения рентгеновского излучения при работе гиротрона 82,6 ГГц в рабочем режиме длительностью до 1 с. Для регистрации спектров рентгеновского излучения использовался спектрометрический детектор NaI ($d150 \times 80$ мм). Пространственное распределение излучения определялось с помощью двух сцинтилляционных детекторов LaBr₃(Ce) ($\varnothing 38,1 \times 38,1$ мм) Canberra с предусилителем сигнала 2007P, размещаемых в различных позициях относительно гиротрона. Дополнительно оборудован набор из полупроводниковых детекторов из теллурида кадмия CdTe ($1 \times 1 \times 1$ мм) и кремния Si ($d5 \times 1$ мм) для регистрации рентгеновского излучения в потоковом режиме.

Проведенный спектрометрический анализ в режиме работы гиротрона с ускоряющим напряжением $U = 47,6$ кВ показал непрерывное энергетическое распределение рентгеновского излучения с максимумом в диапазоне 15 – 20 кэВ. Максимальная интенсивность излучения наблюдается вблизи выходного окна СВЧ тракта и в нижней части гиротрона. Значительное (до 3 раз) увеличение интенсивности рентгеновского излучения наблюдается в режиме срыва генерации СВЧ излучения.

Установка защитных свинцовых экранов (толщиной до 4 мм) вблизи коллекторов электронного пучка и в области выходного окна СВЧ тракта обеспечивает ослабление интенсивности рентгеновского излучения до 5 – 10 раз.

Рассматривается проект мобильного измерительного комплекса на базе детекторов LaBr₃(Ce) и NaI в спектрометрическом режиме для определения абсолютных величин потоков рентгеновского излучения.

Литература

- [1]. Пименов И.С., Борщegovский А.А., Новиков В.Н., Павлов В.Н., Рой И.Н., Шапотковский Н.В. Первые результаты по вводу СВЧ-излучения от гиротрона в вакуумную камеру токамака Т-15МД. Звенигородская конференция по физике плазмы 2023 г, М01.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СФЕРИЧЕСКОГО ТОКАМАКА СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ ГЛОБУС-3

¹Бондарчук Э.Н., ²Варфоломеев В.И., ¹Кавин А.А., ¹Кудрявцева А.М., ¹Лабусов А.Н.,
²Минаев В. Б., ²Петров Ю.В., ¹Родин И.Ю., ²Сахаров Н.В., ¹Филатов О.Г.

¹Акционерное общество "НИИЭФА им. Д. В. Ефремова", г. Санкт-Петербург, Россия,

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: kudriavtseva@sintez.niefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.068

Численное моделирование механического состояния электромагнитной системы токамака следующего поколения ГЛОБУС-3 выполнено с использованием комплексного подхода к анализу конструкции, ранее апробированного при проектировании установки ГЛОБУС-М2. Суть подхода заключается в исследовании механического поведения электромагнитной системы с применением современных САЕ (Computed-Aided Engineering) средств численного анализа. На основе конструкторских проработок разработана трёхмерная математическая модель электромагнитной системы, позволяющая определить её напряженно-деформированное состояние под действием эксплуатационных нагрузок, таких как температурное поле, пространственно-распределённые электромагнитные силы и их комбинации. Выполнена обработка результатов расчёта напряжённо-деформированного состояния электромагнитной системы с целью определения групп приведённых напряжений для дальнейшей оценки прочности конструкции. В случае неудовлетворительного по прочности результата, в расчётную модель вносятся коррективы, отражающие изменения в конструкции, с целью достижения критериев прочности за одну или несколько итераций.

Выполнены расчёты напряжённо-деформированного состояния электромагнитной системы, которые позволили разработать концепцию электромагнитной системы и определить общий облик установки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Соглашение № 21-79-20133 от 24.03.2021 между РФФИ и организацией АО «НИИЭФА»). В работе была использована база данных уникальной научной установки «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав федерального центра коллективного пользования «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Литература

- [1]. Д.И. Алексеев, Э.Н. Бондарчук, А.А. Воронова, А.А. Кавин, А.М. Кудрявцева, А.Н. Лабусов, М.В. Манзук, В.Б. Минаев, Ю.В. Петров, И.Ю. Родин, Н.В. Сахаров, О.Г. Филатов. Верификация конечно-элементной модели электромагнитной системы сферического токамака ГЛОБУС-М2 на основе экспериментальных данных. // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2022, Т. 45, № 4, С. 61 – 68.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ

¹Скопинцев Д.А., ^{1,2}Докука В.Н., ^{1,2}Хайрутдинов Р.Р.,
²Андрианова Р.Р., ²Хайрутдинов Э.Н.

¹Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, округ Троицк, Россия, e-mail: scopintsev.d.a@triniti.ru

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: khayrutdinov_rr@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.069

Типовые методы восстановления равновесия плазменного шнура в токамаке [1], также как и представленный метод, предполагают известные из эксперимента величины токов в плазме, катушках полоидального магнитного поля и по вакуумной камере, а также значения магнитных полей в датчиках полоидального магнитного поля и потоков в полоидальных магнитных петлях.

В настоящее время проводится множество исследований на токамаках по удержанию плазмы различного поперечного сечения, круглой, вытянутой по вертикали и диверторной, с положительной и отрицательной треугольностью. Задачу восстановления равновесия по данным магнитных датчиков можно разделить на две части. Первая, это восстановление равновесия после проведения эксперимента, и вторая, - это поддержание равновесия в режиме реального времени в течение разряда.

В первой задаче обычно используются сложные коды, в которых итерационно решается двумерное нелинейное уравнение Грэда-Шафранова, и определяются профили плотности тока. Эта задача требует значительного вычислительного времени. Во второй задаче используются менее точные методы, основанные на представлении плазмы несколькими токовыми филаментами, которые позволяют определять границу плазмы с меньшей точностью, чем в первой задаче, и с большой ошибкой координаты магнитной оси.

Основной задачей управления в режиме реального времени является определение необходимых сигналов из нелинейного отображения магнитных сигналов на значения геометрических параметров [2]. Применение технологии нейронной сети позволяет быстро и эффективно определять параметры формы границы плазмы.

В данной работе используется многослойная нейронная сеть с алгоритмом обратного распространения ошибки. В процессе обучения нейронной сети расчёты прямого равновесия с изменением в заданном диапазоне геометрических величин и параметров плотности тока используются в качестве входных данных нейросети, а на выход нейросети подаются рассчитанные величины сигналов с магнитных датчиков.

Обучающий набор параметров, используемых в качестве желаемых положения и формы границы плазмы, рассчитывается с помощью кода DINA [3], что позволяет получить равновесную конфигурацию плазмы токамака в заданных магнитных полях при условии прохождения границы плазмы через точки, фиксированные в плоскости полоидального сечения токамака.

Литература

- [1]. Bishop C.M., Haynes P.S., Smith M.E.U., Todd T.N., Trotman D.L. // Neural Computation, V. 7, No. 1 (1995), P. 206–217.
- [2]. Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р., Кавин А.А. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2008, Вып. 1, С. 12 – 20.
- [3]. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. // J. Comput. Physics, V. 109 (1993), P. 193–201.

ДИАГНОСТИКА БЫСТРЫХ ИОНОВ И ВОЗБУЖДАЕМЫХ ИМИ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ МЕТОДОМ КОЛЛЕКТИВНОГО ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ ГДЛ

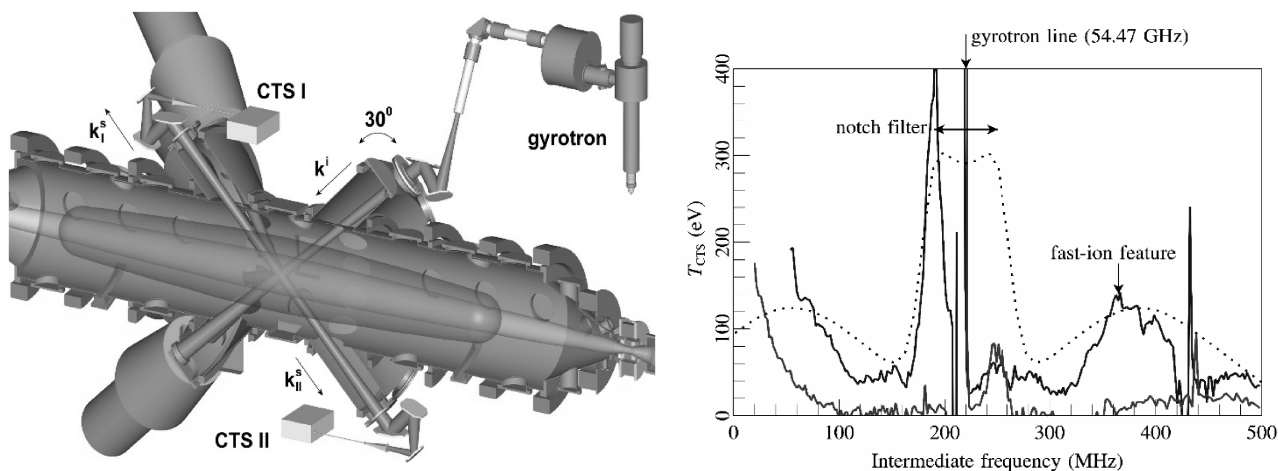
¹Шалашов А.Г., ¹Господчиков Е.Д., ¹Лубяко Л.В., ¹Хусаинов Т.А.,
²Солдаткина Е.И., ²Соломахин А.Л.

¹Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия,
e-mail: ags@ipfran.ru

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.070

Для крупномасштабной магнитной ловушки ГДЛ (ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера, Новосибирск) разработана система регистрации спектров коллективного рассеяния (CTS) микроволнового излучения, позволяющая исследовать функцию распределения быстрых ионов по скоростям и неустойчивости высокотемпературной плазмы с субтермоядерными параметрами. Создан диагностический комплекс, включающий мощный 450 кВ / 54,5 ГГц гиротрон в качестве источника зондирующего излучения, два независимых высокочувствительных радиометра диапазона 54.47 ± 0.55 ГГц для одновременной регистрации рассеянного излучения в «ортогональных» геометриях, квазиоптические системы фокусировки зондирующего и рассеянного излучения. Разработаны методы моделирования распространения и рассеяния микроволновых пучков в неоднородной плазме с необходимой для интерпретации эксперимента точностью.



CTS диагностика и первый рассеянный сигнал от быстрых ионов, зарегистрированный на ГДЛ [1].

В докладе обсуждаются результаты экспериментальных кампаний 2022 и 2023 годов по регистрации коллективного рассеяния на установке ГДЛ с нагревом плазмы нейтральными пучками, в которых была отработана методика CTS измерений и впервые для больших открытых ловушек зарегистрированы сигналы рассеяния от быстрых ионов. Также приводятся сведения о дальнейших планах, включающих совершенствование приемной аппаратуры и возможный переход к новой геометрии рассеяния.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 19-72-20139).

Литература

[1]. A. G. Shalashov et al., Phys. Plasmas, 29, 080702 (2022).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ УРОВНЯ ЛИТИЯ НА ТОКАМАКЕ T-11M ПУТЕМ ПОДАЧИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭМИТТЕР И КОЛЛЕКТОР

Щербак А.Н., Мирнов С.В., Лазарев В.Б., Васина Я.А., Лешов Н.В., Антонов П.А., Зорин А.В., Агеев А.В., Джигайло Н.Т., Джурик А.С., Отрощенко В.Г., Петрова Н.П., Пришвицын А.С., Петров Ю.В., Морозов В.А.

Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, округ Троицк, Россия, e-mail: shcherbak@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.071

Известно, что использование лития в токамаках в качестве материала, контактирующего с плазмой, благоприятно влияет на характеристики плазменного разряда. Введение лития на периферию плазменного шнура, во-первых, приводит к уменьшению содержания легких примесей, а, во-вторых, мешает проникновению тяжелых примесей в центр плазмы, что в конечном итоге выражается в снижении эффективного заряда плазмы и увеличении электронной температуры [1].

Как было предложено ранее [2], решением задачи защиты внутрикамерных элементов для стационарно действующего токамака-реактора могло бы стать создание в области SOL замкнутого контура циркуляции лития с использованием литиевых эмиттеров для его инъекции в плазму SOL и литиевых коллекторов для его сбора из SOL и обратной транспортировки в эмиттер. В случае квазистационарного разряда предлагается применить упрощенную полужамкнутую схему такого литиевого контура. Удаление захваченного лития с коллектора с одновременной дозаправкой эмиттера до исходного уровня предлагается осуществлять в перерывах между плазменными разрядами. При этом в ходе такой работы число циклов «удаление – дозаправка литием» должно снижаться за счет эффекта появления «вторичных» коллектор-эмиттеров [3] в тени основного эмиттера лития. Эффект основан на том, что такие «вторичные» коллекторы способны постепенно накапливать часть поступающего на них лития со всё нарастающим возвратом его в плазму, постепенно разгружая таким образом основной эмиттер. В результате наступает равновесие, когда поступление лития с основного эмиттера и удаление «лишнего лития» с коллектора достигают минимального значения. Следовательно, возникает необходимость контролировать уровень лития, поступающего в плазму и с эмиттера, и с коллектора, для уменьшения общего содержания лития в разрядной камере квазистационарного токамака и предотвращения его накопления.

В данной работе исследуется возможность контроля уровня лития в камере токамака T-11M и, соответственно, возможность управления литиевыми потоками путем подачи потенциала различной полярности относительно стенок разрядной камеры на внутрикамерные элементы: эмиттер и коллектор.

Показано, что подача отрицательного потенциала относительно стенок на коллектор приводит к увеличению сбора лития, как минимум в 1,5 раза по сравнению со случаем, когда к нему прикладывалось положительное напряжение либо коллектор был замкнут на камеру.

Подача положительного потенциала относительно стенок на эмиттер увеличивает поступление лития на периферию плазменного шнура.

Литература

- [1]. Lyublinski I.E. et al, Nucl. Fusion, 57 (2017) 066006.
- [2]. Mirnov S. et al, Fusion Engineering and Design, 2010, Vol. 85, I. 6, 919–923.
- [3]. Mirnov S. et al, Plasma Phys. Control. Fusion, 48 (2006) 821–837.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНЫХ КОРПУСКУЛЯРНЫХ ДИАГНОСТИК ПЛАЗМЫ С УЧЁТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ПУЧКА ИОНОВ

^{1,2}Шелегеда И.А., ^{1,3}Аммосов Я.М., ^{1,3}Вадимов Н.А., ^{1,4}Виницкий Е.А.,
¹Драбинский М.А., ¹Елисеев Л.Г., ^{1,3}Крохалев О.Д., ^{1,3,4}Мельников А.В.,
^{1,3}Саранча Г.А., ^{1,5}Харчев Н.К.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (НИУ), г. Москва, Россия

³Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

⁴Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

⁵Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.072

Интенсивные ионные пучки используются в диагностике зондирования пучком тяжёлых ионов (ЗПТИ, англ. Heavy Ion Beam Probe – HIBP) [1] и пучково-эмиссионной спектроскопии (ПЭС, англ. Beam Emission Spectroscopy – BES) [2]. На токамаке Т-15МД проектируется диагностика ЗПТИ на основе твердотельных термоионных источников.

Абсолютное значение тока ионного пучка определяет уровень получаемого сигнала, а поперечный размер – пространственное разрешение. Из-за наличия пространственного заряда, увеличение интенсивности ведёт к усилению дефокусировки пучка и ухудшению локальности измерений. Управление параметрами пучка (ионный ток, энергия, диаметр и угловая расходимость) осуществляется с помощью ионно-оптической системы (ИОС). Предварительное моделирование в инженерно-расчётных системах является необходимой стадией проектирования ИОС, поскольку позволяет подобрать оптимальные параметры её геометрии: размеры, форму электродов и расстояния между ними.

При моделировании ИОС необходимо учитывать распределение пространственного заряда вдоль траектории пучка и создаваемое им расталкивание. Существующее программное обеспечение не обладает достаточным функционалом для решения задачи трассировки ионного пучка в ИОС ЗПТИ и ПЭС. Проблемы связаны с трудностью интеграции результатов расчётов в существующие диагностические коды, низкой степенью автоматизации, высокими требованиями к вычислительным мощностям ЭВМ, невозможностью моделировать частичную нейтрализацию пучка *in situ* и др.

В докладе приведён способ моделирования ионно-оптической системы корпускулярных диагностик, основанный на расчёте стационарной огибающей ионного пучка, и совместимый с существующей программой для ЭВМ HIBP-SOLVER [3]. В нём возможен расчёт в условиях частичной нейтрализации пучка. Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. L.I. Krupnik et al. // IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 36, no. 4, pp. 1536-1544, Aug. 2008, doi: 10.1109/TPS.2008.927381.
- [2]. G. Anda et al. // Rev. Sci. Instrum. 1 January 2018; 89 (1): 013503
- [3]. Ф.О. Хабанов и др., Программа расчета траекторий зондирующих ионов диагностики HIBP для токамака Т-15МД. RU 2020613011

ОПЕРАЦИОННЫЕ ПРЕДЕЛЫ И СООТНОШЕНИЕ СИГНАЛ-ШУМ РЕФЛЕКТОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ СО СТОРОНЫ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ТОКАМАК Т-15МД

¹Шелухин Д.А., ¹Вершков В.А., ¹Молчанов Д.С., ¹Лукьянов В.В., ^{1,2}Владимиров И.А.,
^{1,2}Логинов А.А.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.073

Диагностика «Рефлектометрия» широко применяется для измерения профиля плотности на действующих и сооружаемых термоядерных установках (см. ссылки в [1]). К преимуществам рефлектометрии относится высокое временное разрешение и пространственное разрешение. В 2022 году рефлектометрия с частотной модуляцией и непрерывной волной (Frequency Modulation Continuous Wave – FMCW) была предложена для проведения измерений плотности на установке Т-15МД [1]. Было предложено использовать схему измерений, предлагаемую для ИТЭР, а именно – сочетание зондирования со стороны сильного магнитного поля и отражения от нижней отсечки необыкновенной (Х) волны [2].

В данной работе была проведена оценка возможности проведения измерений на установке Т-15МД в широком диапазоне плотностей и значений тороидального поля. Из-за сложностей при интеграции внутрикамерной части приемно-передающего тракта в окружение было принято решение о применении в качестве элементов волноводного тракта прямоугольных волноводов с внутренним сечением 16×8 мм вместо запланированных волноводов сечением 23×10 мм. Это привело к необходимости ввода в состав диагностики канала для измерения профиля со стороны сильного магнитного поля на обыкновенной (О) волне. Диапазон измерений на О- и Х-волне в диапазоне частот от 12 до 66 ГГц обеспечивает корректное восстановление профиля в режимах с плотностью на сепаратрисе выше $4 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

Показано, что в режимах с магнитным полем на оси $B_T = 2$ Тл диагностика может осуществлять измерения в центре плазменного шнура вплоть до плотностей порядка $7 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при использовании СВЧ-источников с частотой до 66 ГГц. Ограничение максимальной измеряемой плотности связано с поглощением зондирующей волны на фундаментальной частоте электронного циклотронного резонанса. Измерения во внешней половине шнура возможны вплоть до плотности порядка $1 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Следует отметить, что в режимах с меньшим тороидальным полем ожидается снижения диапазона измеряемых плотностей до $\sim 4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

Анализ влияния мелкомасштабных возмущений плотности на измерения был выполнен с использованием аналитических оценок, приведенных в [3]. Показано, что измерения профиля электронной плотности возможны при уровне флуктуаций, не превышающих 0,2% – 0,4% в центральной части плазменного шнура, что примерно на 20% – 30% ниже наблюдаемого уровня флуктуаций в современных установках.

Для диагностики был проведен анализ баланса СВЧ мощности и соотношения сигнал-шум. Показано, что в ожидаемых режимах работы Т-15МД соотношение сигнал-шум для диагностики составит 35 – 45 дБ.

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт»

Литература

- [1]. Шелухин Д.А., Субботин Г.Ф., и др. // Физика плазмы, 2022, Т. 48, № 7, С. 579-598.
- [2]. Вершков В.А., Солдатов С.В., Шелухин Д.А., Уразбаев А.О. // ПТЭ, 2004, № 2, С. 54.
- [3]. Mazzucato E., Nazikian R. // Rev. Sci. Instrum., 1995, 66 (2), P. 1237–1240.

АНАЛИЗ ГЕНЕРАЦИИ ПУЧКОВ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА ТОКАМАКОВ Т-10 И Т-15МД

Шестаков Е.А., Саврухин П.В., Лисовой П.Д., Тепикин В.И., Храменков А.В.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Shestakov_EA@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.074

Оптимизация условий начальной стадии разряда является актуальной задачей в современных экспериментах на токамаках. Формирование плазменного шнура с однородной ионизованной плазмой затрудняется образованием пучков ускоренных электронов, появляющихся уже на начальной стадии пробоя газа. Ускорение электронов в токамаках с железным сердечником индуктора, как правило связывается с высоким напряжением на обходе тора (десятки вольт), образуемом благодаря высокому потокоцеплению индуктора и плазменного витка. Так в экспериментах на токамаке Т-10 показано, что в индуцированных вихревых электрических полях на обходе тора до 4 В/м, ускоренные электроны с энергиями до 0,5 – 1 МэВ возникают в течение 5 – 9 мс после начала пробоя. Контролируемый поддув газа в режиме обратных связей и управление магнитным потоком в индукторе, а также тщательная предварительная подготовка вакуумной камеры и первой стенки позволяет предотвратить формирование ускоренных электронов.

В токамаках с воздушным индуктором, при ограниченном напряжении на обходе тора в несколько вольт, использование только вихревого поля для пробоя газа затруднено. В этих условиях используются дополнительные способы формирования плазмы с помощью СВЧ волн, инжекция плазменных струй и формирование дополнительных токовых каналов.

В докладе анализируется генерация пучков ускоренных электронов на начальной стадии разряда токамаков Т-10 и Т-15МД как при омическом пробое газа, так и при помощи дополнительного ввода СВЧ волн. Токамаки Т-10 и Т-15МД имеют схожие параметры в части условий пробоя, в том числе сравнимые длины силовой линии и требуемые для пробоя напряженности электрических полей. Эксперименты, проведенные ранее на токамаке Т-10, показали возможность использования СВЧ-пробоя газа для последующего формирования устойчивого плазменного шнура [1]. При этом в части разрядов наблюдается повышенная интенсивность жесткого рентгеновского излучения при вводе СВЧ мощности.

Токамак Т-15МД имеет воздушный индуктор, поэтому на текущий момент основным методом пробоя считается СВЧ-пробой [2]. Эксперименты, проведенные во время энергетического пуска токамака Т-15МД с использованием гиротрона с частотой 82 ГГц ($P_{\text{СВЧ}}$ до 1 МВт), показали возникновение жесткого рентгеновского излучения высокой интенсивности на стадии предварительной ионизации. Анализ показал, что жесткое рентгеновское излучение может быть связано с ускоренными электронами, формируемыми в интенсивных электромагнитных полях. В докладе приводятся результаты исследований ускоренных электронов в токамаке Т-15МД на стадии предварительной ионизации при СВЧ пробое и при комбинированном вводе СВЧ волн одновременно с индукционными вихревыми электрическими полями до 0,2 – 0,4 В/м. Рассматриваются различные возможные способы минимизации эффекта формирования пучков ускоренных электронов при СВЧ пробое для оптимизации начальной стадии разряда в экспериментах на токамаке Т-15МД.

Литература

- [1]. N.A. Kirneva et al., Plasma Start-up Optimization with 2nd Harmonic ECR pre-ionization in T-10 Tokamak // 34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2–6 July 2007 ECA Vol.31F, P-1.164 (2007).
- [2]. П.П. Хвостенко, Статус токамака Т-15МД // Сборник тезисов XLVIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 15-19 марта 2021 г. ICRAF-2021.

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ АНИЗОТРОПНЫХ ИОНОВ В КОНФИГУРАЦИЯХ СО СБЛИЖЕННЫМИ ТОЧКАМИ ОСТАНОВКИ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ

^{1,2}Шмигельский Е.А., ^{1,2}Лизунов А.А., ^{1,2}Солдаткина Е.И., ^{1,2}Приходько В.В.,
^{1,2,3}Соломахин А.Л., ¹Пинженин Е.И., ¹Мейстер А.К.

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

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия,

³Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

e-mail: E.A.Shmigelskiy@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.075

В настоящее время на Газодинамической ловушке (ГДЛ, ИЯФ СО РАН) проводятся исследования удержания быстрых анизотропных ионов в режимах с повышенным относительным давлением β . Увеличение давления быстрых ионов достигается за счет симметричного приближения точек их остановки к центральной плоскости ГДЛ соответствующей модификацией продольного профиля её магнитного поля. Магнитная система установки помимо стандартной конфигурации магнитного поля позволяет реализовывать также конфигурации со сближением точек остановки в 1,5 и в 2 раза. В [1] было показано, что при сокращении области движения быстрых ионов в 1,5 раза вытесняемый плазмой магнитный поток увеличивается на 30%. Также, средние по центральному сечению плазмы значения β , посчитанные по данным диамагнитной петли в предположении параксиального равновесия плазмы, в случае стандартной конфигурации и конфигураций со сжатием области движения быстрых ионов в 1,5 и 2 раза равны соответственно 8%, 10% и 18%.

В докладе представлены результаты измерений магнитного поля в центральном сечении плазмы ГДЛ в трех упомянутых конфигурациях магнитной системы с помощью спектральной MSE диагностики [2]. Диагностика позволяет измерять магнитное поле в пяти точках, распределенных по радиусу однократно за разряд, и в одной из них, вблизи оси установки, – 10 раз за разряд с периодом не менее 0,5 мс. Полученные данные позволяют проследить за эволюцией β и установить его радиальное распределение, что помогает интерпретировать увеличение среднего по сечению β при сокращении области движения быстрых ионов [1]. В дополнение к ним представлены измерения радиальных профилей температуры и плотности электронов в центральной плоскости плазмы, полученные с использованием системы Томсоновского рассеяния [3].

В режимах с повышенным давлением регулярно возбуждается Альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость (АИЦН) [4, 5], приводящая к рассеянию быстрых ионов. MSE-диагностика позволила определить порог развития АИЦН по β в обеих конфигурациях со сближенными точками остановки и прояснить причину изменения частоты неустойчивости в течение разряда.

Литература

- [1]. Shmigelsky E.A. et al. High- β Plasma Confinement Studies in GDT: Recent Results and Planned Experiments // 13th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement. 2023.
- [2]. Lizunov A.A. et al. // Rev. Sci. Instrum. 84, 086104 (2013).
- [3]. Lizunov A.A. et al. // Rev. Sci. Instrum. 94, 033509 (2023).
- [4]. Zaytsev K.V. et al. // Phys. Scr. 161, 014004 (2014).
- [5]. Anikeev A.V. et al. // Plasma Physics Reports 41, 773-782 (2015).

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА В ПЛАЗМЕ УСТАНОВКИ ГДЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТНЫХ ДИАГНОСТИК

^{1,2}Шмигельский Е.А., ^{1,2}Лизунов А.А., ^{1,2}Солдаткина Е.И., ^{1,2}Приходько В.В.,
^{1,2}Котельников И.А.

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

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия,

e-mail: E.A.Shmigelskiy@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.076

Для стабилизации желобковой неустойчивости плазмы Газодинамической ловушки (ГДЛ, ИЯФ СО РАН) применяется метод “вихревого удержания” [1, 2], практически сводящийся к созданию в плазме радиального электрического поля путем подачи потенциалов на кольцевые электроды, что неизбежно приводит к их прямому контакту с плазмой. Кроме того, в режимах с сокращенной областью движения быстрых анизотропных ионов и повышенным относительным давлением β плазма больше подвержена желобковой неустойчивости, и метод вихревого удержания требует увеличенного наддува газа в вакуумную камеру, что увеличивает перезарядные потери быстрых ионов. Также, при превышении порога по относительному давлению β потенциально возможно развитие баллонной неустойчивости. Это делает актуальным рассмотрение альтернативных способов стабилизации желобковой неустойчивости и упреждающих мер для подавления баллонной моды.

В работе [3] теоретически обосновывается метод стабилизации желобковой и баллонной мод с азимутальным волновым числом $m = 1$ аксиально-симметричной проводящей стенкой, окружающей плазму. Для оценки применимости этого метода на практике и разработки проводящего МГД-стабилизатора требуется определить радиальный профиль давления анизотропных ионов и восстановить распределение тока в плазме для случаев удержания ионов в конфигурациях с сокращенной областью их движения. С помощью спектральной MSE диагностики [4] были получены радиальные профили β в центральной плоскости установки. Поле вне плазмы измерялось набором радиальных и аксиальных магнитных зондов, распределенных вдоль оси установки в пределах области удержания быстрых ионов и радиальными зондами в составе трех азимутальныхборок. Геометрия размещения зондов была выбрана исходя из моделирования разрядов кодом DOL [5]. Две азимутальные бороки зондов были размещены вблизи плоскостей, включающих расчетные максимумы давления быстрых ионов в разных магнитных конфигурациях, третья – вблизи центральной плоскости. Подобное расположение зондов, помимо прочего, может позволить отличить баллонную неустойчивость от желобковой. Восстановленное распределение тока сравнивалось с модельным распределением азимутального тока, рассчитанным исходя из величины магнитного поля, создаваемого плазмой согласно расчетам кода DOL.

Литература

- [1]. Beklemishev A.D. et al. // Fusion Sci. Technol. 57 (4), 351–360 (2010).
- [2]. Иванов А.А., Приходько В.В. // Успехи физ. наук, 187 (5), 547–574 (2017).
- [3]. Kotelnikov I.A. et al. // Nucl. Fusion 63 066027 (2023).
- [4]. Lizunov A.A. et al. // Rev. Sci. Instrum. 84, 086104 (2013).
- [5]. Юров Д.В. и др. // Физика плазмы, 42 (3), 217 – 233 (2016).

ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-NB

Сидоров Е.Н., Баткин В.И., Иванов И.А., Куклин К.И., Мельников Н.А.,
Никишин А.В., Полосаткин С.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф., Сквородин Д.И.

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: E.N.Sidorov@inp.nsk.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.077

В докладе представлены результаты исследования процесса накопления плазмы в центральной ловушке установки ГОЛ-NB, выполненного с использованием зондов Ленгмюра и Маха.

Установка ГОЛ-NB [1] создана в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и предназначена для демонстрации подавления продольных потерь плазмы секциями с гофрированным магнитным полем [2]. Она представляет собой газодинамическую ловушку с присоединенными с обеих сторон соленоидами, которые могут либо создавать однородное магнитное с $B \approx 4,5$ Тл, либо гофрированное поле с такой же индукцией с периодом гофрировки 22 см. Стартовая плазма создается дуговой плазменной пушкой, а ее нагрев осуществляется парой нейтральных пучков с энергией до 25 кэВ и суммарной мощностью до 1,1 МВт.

Каждый из зондов состоит из измерительной головки и блока управления зондом. Конструкция зонда Ленгмюра является уникальной [3] и представляет из себя четырех-электродный зонд, измеряющий плотность, температуру и радиальное электрическое поле. Зонд Маха является классическим. Блок управления и передачи данных по Wi-Fi находится в электрически изолированной металлической коробке с малой емкостью на землю [3].

С помощью зондов Ленгмюра и Маха определялись радиальные профили входящего в центральную ловушку и выходящего из нее потока плазмы. Разница между входящим и выходящим потоком сравнивалась с оценкой накопления плазмы, сделанной по ослаблению нагревных пучков. Из построенного баланса определялись поперечные потери плазмы. Измерения, выполненные при работе установки в режиме гофрированного магнитного поля в концевых соленоидах, сравниваются с результатами аналогичных измерений при однородном поле.

Литература

- [1]. Postupaev V.V., et al. // Nucl. Fusion 62, 086003 (2022).
- [2]. Бурдаков А.В., Поступаев В.В. // УФН 188, 651 (2018).
- [3]. Sidorov E.N. et al. // J. Instrumentation 16, T11006 (2021).

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ГОЛ-NB

¹Скуратов Е.Н., ¹Полосаткин С.В., ²Мухин Е.Е., ²Толстяков С.Ю., ²Курский Г.С.,
²Соловей В.А., ²Александров С.Е., ²Коваль А.Н.

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.078

Основной задачей установки ГОЛ-NB [1] является проверка эффективности многопробочного удержания плазмы. Для решения этой задачи требуется точное измерение радиальных профилей концентрации и электронной температуры плазмы. В связи с этим, в настоящее время идет разработка диагностической системы Томсоновского рассеяния (ТР), которая является наиболее надежным и достоверным средством для измерения вышеуказанных параметров плазмы.

Система рассчитана на измерение параметров плазмы в диапазоне концентраций $10^{18} - 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и электронных температур 3 – 100 эВ. В качестве источника света в системе использован лазер на неодимовом стекле ($\lambda = 1064 \text{ нм}$) Beamtech SGR Extra с энергией в импульсе до 15 Дж. Рассеянное в плазме лазерное излучение собирается объективом системы регистрации и по волоконно-оптическим линиям направляется на входы спектральных приборов. Предполагается оснастить систему восемью спектральными приборами для одновременного измерения распределения параметров плазмы по радиусу.

Для спектральной селекции в системе используются четырехканальные полихроматоры на основе интерференционных фильтров [2]. Полосы пропускания фильтров обеспечивают измерение параметров плазмы с точностью не хуже 5% во всем диапазоне ожидаемых параметров плазмы. Для регистрации излучения используются лавинные фотодиоды LSSAPDQ-1800 Beijing Lightsensing Technologies Ltd.

В докладе будут представлены параметры системы и результаты тестирования ее элементов.

Литература

- [1]. Postupaev V. et al., Start of experiments in the design configuration of the GOL-NB multiple-mirror trap // Nuclear Fusion 62(8), 086003 (2022).
- [2]. Kurskiev G.S. et al. Digital filter polychromator for Thomson scattering applications // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A. 2020. V. 963. P. 163734.

ИЗУЧЕНИЕ ЭНЕРГОБАЛАНСА В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ¹Багрянский П.А., ¹Мейстер А.К., ^{1,2}Солдаткина Е.И.¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия*²*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.079

Системы открытого типа для магнитного удержания плазмы имеют перспективы для целого ряда приложений в области управляемого ядерного синтеза. С инженерно-физической точки зрения ближайшим из возможных приложений пробкотрона наиболее простой конструкции является источник нейтронов синтеза ядер D–T, способный производить нейтронный поток с плотностью мощности в несколько мегаватт на квадратный метр [1]. Поток нейтронов такого уровня требуется для проведения полномасштабных материаловедческих исследований, необходимых для конструирования первой стенки и других элементов термоядерных реакторов будущего. Кроме того, мощный генератор нейтронов может быть использован для управления подкритическими реакторами деления, включая устройства для «дожигания» долгоживущих радиоактивных отходов [2]. Магнитные ловушки открытого типа с улучшенным относительно простого пробкотрона продольным удержанием частиц могут быть основой для создания реакторов ядерного синтеза с коэффициентом усиления мощности $Q \gg 1$, которые способны работать с альтернативными видами топлива, не содержащими радиоактивный тритий. Проект прототипа такого реактора развивается в настоящее время в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера [3].

Ключевым с точки зрения приложений параметром является энергетическая эффективность системы, а значит, изучение возможных каналов потерь энергии из системы критически важно для обоснования проекта будущих термоядерных установок на базе открытой магнитной ловушки. Такие исследования ранее проводились на установке ГДЛ в конфигурации с длительностью атомарной инжекции 1 мс [4]. Современная установка ГДЛ оснащена инжекторами длительностью 5 мс, сценарий создания и поддержания разряда также претерпел изменения, полученные параметры приблизились к термоядерным величинам [5], поэтому задача изучения энергобаланса по-прежнему актуальна. В докладе будет представлено описание разработанных для этой задачи диагностических систем, результаты измерений потоков энергии в пробки установки [6], на радиальные лимитеры, а также на стенку вакуумной камеры, будут приведены оценки полных энергетических потерь из установки в разных режимах работы.

Литература

- [1]. Bagryansky P.A., Ivanov A A, Kruglyakov E P et. al. // 2004 Fusion Eng. Des. 70 13.
- [2]. Simonen T.C., Moir R.W., Molvik A.W. and Ryutov D.D. // 2013, Nucl. Fusion 53 063002.
- [3]. Skovorodin D. I. et.al. // 2023 Plas. Phys. Reports 49 № 9 1039.
- [4]. Ivanov A.A. et.al. // 2001 Trans. Fus. Technol. 39 127.
- [5]. Bagryansky P.A. et.al. // 2015 Phys. Rev. Lett. 114, 205001.
- [6]. E. Soldatkina et.al. // Nucl. Fusion 60 086009 (2020).

ТЕЧЕНИЯ И УСКОРЕНИЕ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ СОПЛЕ И ЗЕРКАЛЕ

Смоляков А.И.

Университет Саскачевана, г. Саскатун, Канада

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.080

Plasma flow and acceleration in the magnetic nozzle (mirror) with converging-diverging magnetic configuration are important for applications in electric propulsion and fusion systems such as open mirrors and tokamak divertors. A relatively simple quasi two dimensional paraxial model offers useful analytical insights on many processes in the nozzle. We present some recent results of recent analytical and computational studies. The non-monotonic magnetic field with a local maximum of the magnetic field is necessary for forming the quasi-neutral accelerating potential structure with a unique velocity profile entirely determined by the magnetic field. The explicit form of the solution can be obtained in the form of the Lambert function. The fluid model for acceleration of cold ions has been further extended to include the effects of warm ions with anisotropic ion pressure. It is shown that the perpendicular ion pressure enhances plasma acceleration due to the mirror force. The kinetic effects have been investigated using the fully kinetic model also taking into account the sheath effects formed in the expansion region near the absorbing walls. Further generalization includes the role of the induced azimuthal magnetic field and plasma rotation, i.e., coupling with Alfvén wave dynamics. It is shown that the inhomogeneous magnetic field couples the axial plasma flow with the evolution of the azimuthal magnetic field and plasma rotation resembling the problem of the magnetically driven flow in astrophysical jets and winds. The role of the Alfvén, slow, and fast magnetosonic point singularities in plasma acceleration and plasma detachment are discussed.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НОВОМУ МЕТОДУ ЭЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА ГДЛ

¹Соломахин А.Л., ²Господчиков Е.Д., ¹Лизунов А.А., ²Лубяко Л.В., ¹Пинженин Е.И.,
²Смолякова О.Б., ²Шалашов А.Г.

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: A.L.Solomakhin@inp.nsk.su*

²*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия,
e-mail: egos@ipfran.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.081

Газодинамическая ловушка (ГДЛ) является прототипом термоядерного источника нейтронов для материаловедения, дожигания радиоактивных отходов и гибридного термоядерного реактора [1]. Нейтроны в ГДЛ рождаются в результате реакции термоядерного синтеза при столкновениях в популяции горячих ионов, которые образуются в процессе захвата мощных нейтральных пучков мишенной плазмой. Нейтронный поток пропорционален квадрату времени жизни горячих ионов в плазме. Одним из основных механизмов, определяющих время жизни горячих ионов, является их взаимодействие с электронами. Причём чем меньше температура электронов, тем быстрее горячие ионы теряют свою энергию при столкновениях с электронами. Для увеличения температуры электронов и соответственно времени жизни горячих ионов на ГДЛ применяется дополнительный электронный циклотронный резонансный (ЭЦР) нагрев на первой гармонике необыкновенной волны [2]. Этот метод показал свою эффективность для увеличения электронной температуры, плотности горячих ионов и нейтронного потока [3].

Однако применение этого метода ЭЦР нагрева сопряжено с рядом трудностей, которые накладывают ограничения на параметры плазмы и магнитную конфигурацию установки. Для решения части этих проблем на ГДЛ был предложен ЭЦР нагрев на второй гармонике необыкновенной волны. Моделирование с помощью геометрооптического численного кода даёт при электронной температуре на оси 200 эВ поглощение от 0 до 90% инжектированной мощности в зависимости от плотности плазмы и угла инъекции. Энерговыведение происходит в широкой области плазмы, что не должно приводить к возникновению МГД неустойчивостей плазмы.

Для реализации этого метода одна из двух СВЧ систем для ЭЦР нагрева на первой гармонике была переделана. Старый гиротрон мощностью 400 кВт был заменён на новый мощностью 800 кВт и частотой 54,5 ГГц. Также была модернизирована криогенная система. Заливной криостат был заменён на сухой криомагнит. Новый гиротрон мощнее старого и оснащён системой рекуперации, поэтому для него была собрана новая, более мощная и с большим энергозапасом, система питания. Циклотронный резонанс на второй гармонике расположен в другом месте установки, поэтому волноводная линия и квазиоптическая система ввода излучения в плазму были переделаны. Новая система позволяет производить инъекцию сфокусированного СВЧ пучка в плазму в область с магнитным полем 0,973 Тл, что соответствует второй гармонике электронного циклотронного резонанса на частоте 54,5 ГГц. При этом система ввода позволяет изменять угол инъекции в диапазоне $74^\circ - 84^\circ$ к оси и $\pm 5^\circ$ в перпендикулярной плоскости. Изменение угла позволяет менять область энерговыведения в плазме, а также компенсировать рефракцию излучения в плотной плазме.

Литература

- [1]. A.A. Ivanov and V.V. Prikhodko // Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, 55, 063001.
- [2]. A.G. Shalashov et al. // Physics of Plasmas, 2012, 19, 052503.
- [3]. P.A. Vagryansky et al. // Nuclear Fusion, 2015, 55, 053009.

ЗАПУСК ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ИНЖЕКТОРА ДИНА-КИ60 НА ТОКАМАКЕ T-15МД

^{1,2}Ступишин Н.В., ¹Абдрашитов А.Г., ¹Ращенко В.В., ¹Белавский А.В., ¹Дейчули П.П.,
¹Давыденко В.И., ¹Драничников А.Н., ¹Зубарев П.В., ¹Вахрушев Р.В., ¹Бруль А.В

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: Stupishin@inp.nsk.su*

²*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.082

ИЯФ СО РАН разработал и изготовил для НИЦ «Курчатовский институт» диагностический инжектор атомов ДИНА-КИ60. Инжектор формирует пучок атомов с энергией 60 кэВ, эквивалентным током атомов около 2 А. Суммарная активная длительности пучка составила 1 сек в режиме с модуляцией пучка 1:1. Полная проектная длительность импульса с модуляцией пучка составляет до 10 сек. Инжектор разработан на основе источника плазмы с дуговым генератором. Доля атомов с основной энергией по эквивалентному току более 80%. Инжектор был успешно испытан в апреле 2016 г. в ИЯФ СО РАН, и в ходе экспериментов были продемонстрированы основные проектные параметры [1]. С 2016 г. инжектор хранился в НИЦ «Курчатовский институт».

В 2023 г. перед запуском инжектора была проведена модернизация системы питания инжектора. Напряжение на втором фокусирующем электроде в четырехэлектродной ионно-оптической системе (ИОС) формировалось с помощью резистивного делителя. В ходе модернизации была реализована схема активного формирования напряжения на втором электроде, которая обеспечивает высокую стабильность фокусирующего напряжения независимо от тока на данный электрод. Подобная модернизация радикально улучшила надежность диагностических инжекторов на токамаке ST-40 (ТЕ, Великобритания) в 2020 г. и открытой ловушки с обращенным полем С-2W (ТАЕ, США) в 2021 г.

В сентябре-октябре 2023 г была полностью выполнена механическая сборка системы питания инжектора на нижнем уровне зала токамака Т-15МД. В области размещения наиболее чувствительного шкафа системы управления инжектором по расчетам остаточное поле магнитной системы Т-15МД составляет около 20 Гс. Для запуска инжектор был размещен рядом с токамаком на нештатном месте. Инжектор работал на собственный приемник пучка.

В ходе испытаний были проведены проверки основных и вспомогательных систем инжектора, как покомпонентно, так и совместно. Было выполнено предварительное кондиционирование системы высоковольтных электродов. Испытания проводились при напряжении 56-59 кВ. Ток в системе вытягивания ИОС составил до 4,6 А. Инжектор работал в режиме модуляции пучка 17×7мс. Полная длительность импульса составляла до 0,3 сек.

В дальнейшем планируется установить инжектор на специальную подставку и пристыковать к токамаку. Пучок атомов будет использоваться для определения ионной температуры и плотности примесей в плазме токамака Т-15МД с помощью диагностики CXRS [2].

Литература

- [1]. Stupishin N.V., Deichuli P.P., Ivanov A.A. et al. Multi-Second Neutral Beam Injector (60kV, 6A) for Plasma Diagnostics in the Upgraded T-15 Device // AIP Conference Proceedings v. 1771, 50012, 2016.
- [2]. Krupin V.A. et al. The development of charge exchange recombination spectroscopy diagnostics for the T-15MD tokamak. Plasma Diagnostics in the Upgraded T-15 Device // JINST 15 C02027.

УДЕРЖАНИЕ ПЛАЗМЫ В МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ С ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ И ВИНТОВЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

¹Судников А.В., ¹Инжеваткина А.А., ²Кожевников А.В., ¹Толкачёв М.С.,
¹Устюжанин В.О., ¹Черноштанов И.С.

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия*
e-mail: A.V.Sudnikov@inp.nsk.su

²*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.083

Многопробочное подавление продольных потерь термализованной компоненты плазмы является одним из возможных способов повышения времени жизни частиц и энергии в открытой ловушке. Данный метод предложен для улучшенного удержания плазмы в проекте открытой ловушки следующего поколения ГДМЛ [1]. Передача импульса от периодического магнитного поля к плазме может быть увеличена, если магнитные пробки движутся навстречу потоку со скоростью, сравнимой со скоростью истечения. В работе [2] предложено создание бегущей гофрировки за счёт вращения плазмы в магнитном поле с винтовой симметрией. Теоретически предсказаны экспоненциальная зависимость эффективности удержания от длины участка с винтовым полем и радиальное пинчевание плазмы [3]. Оба этих эффекта повышают эффективность указанного метода по сравнению с классическим многопробочным удержанием.

Многопробочное удержание требует обмена импульсом между популяциями запертых и пролётных частиц. В горячей плазме частота кулоновских столкновений недостаточна, поэтому любое аномальное рассеяние частиц приводит к улучшению удержания. Дополнительным источником энергии для колебаний, вызывающих рассеяние в винтовой системе, будет сама популяция запертых частиц, движущаяся со скоростью магнитных возмущений. Также в работе [4] для дополнительного рассеяния частиц предложена комбинация периодических полей с различной симметрией.

Проверка концепции винтового удержания проводится на установке СМОЛА в ИЯФ СО РАН. Детальное описание установки приведено в [5]. Ранее была показана принципиальная возможность подавления потока плазмы винтовой магнитной пробкой и соответствие экспериментальных скейлингов теоретическим оценкам; наблюдалось 1,6-кратное повышение плотности плазмы в области удержания [6, 7].

В докладе представлены результаты прямого экспериментального сравнения запирающего потока плазмы многопробочной секцией с осевой и винтовой симметрией, а также с их комбинацией при различных экспериментальных параметрах.

Литература

- [1]. D.I. Skovorodin et al. Gas-Dynamic Multiple-Mirror Trap GDMT // Plasma Phys. Rep., 49, 1039–1086 (2023).
- [2]. A.D. Beklemishev. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // Fusion Science and Technology, V. 63, N.1T, May 2013. P. 355
- [3]. A.D. Beklemishev. Radial and axial transport in trap sections with helical corrugation // AIP Conf. Proc. 1771 (2016) 040006, doi: 10.1063/1.4964191.
- [4]. I.S. Chernoshtanov, D.A. Ayupov. Collisionless particle dynamics in trap sections with helical corrugation // Phys. Plasmas, Vol. 28, 2021. P. 032502.
- [5]. A.V. Sudnikov et al. SMOLA device for helical mirror concept exploration // Fusion Engineering and Design 122C (2017) pp. 86–93, doi: 10.1016/j.fusengdes.2017.09.005.
- [6]. A.V. Sudnikov et al. Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness // J. of Plasma Physics, 86(5), 2020, 905860515
- [7]. A.V. Sudnikov et al. Plasma flow suppression by the linear helical mirror system // J. of Plasma Physics, 88 (1), 2022, 905880102. doi: 10.1017/S0022377821001276

СИСТЕМА КОЛЛИМАЦИИ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

^{1,2}Тепикин В.И., ¹Шестаков Е.А., ^{1,2}Саврухин П.В., ^{1,2}Лисовой П.Д., ¹Храменков А.В.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²НИУ «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.084

Интенсивные пучки ускоренных электронов (УЭ) представляют серьезную проблему для безопасной работы токамаков, поскольку взаимодействие этих пучков с камерой приводит к высоким тепловым нагрузкам, распылению и плавлению материалов первых стенок [1]. Развитие пучков УЭ сопровождается генерацией тормозного излучения в диапазоне энергий до десятков МэВ (в области жесткого рентгеновского излучения), возникающего при взаимодействии УЭ с ионами плазмы и материалом первой стенки. Измерение эволюции спектра этого излучения из разных областей плазменного шнура позволяет получить данные об эволюции пучков ускоренных электронов [2].

Для регистрации жесткого рентгеновского излучения на токамаке Т-15МД используются два сцинтилляционных детектора $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ размером $d38,1 \times 38,1$ мм, расположенные в герметичном корпусе с ФЭУ и предусилителем сигнала 2007Р. Система сбора данных построена на базе АЦП NI PXIe-5105. Детекторы располагаются в высокоэффективной коллимационной системе, обеспечивающей высокое пространственное разрешение, позволяющее определить пространственную эволюцию пучков ускоренных электронов и локализацию областей из взаимодействия с внутрикамерными элементами токамака.

В текущем докладе представлена конструкция коллиматора, использующегося при проведении измерений тормозного рентгеновского излучения УЭ на токамаке Т-15МД. Коллиматор представляет собой корпус со свинцовым наполнением и систему соосных отверстий в блоках поглощающих материалов – полиэтилена и свинца. Коллиматор оборудован поворотным основанием с электрическим приводом. Благодаря поворотному основанию существует возможность перемещать поле зрения коллиматора по сечению плазменного шнура. Управление углом поворота осуществляется как в ручном режиме, так и дистанционно с помощью компьютера по протоколу Ethernet.

Для оценки пространственного разрешения разработанной конструкции коллиматора был проведен расчет методом Монте-Карло с помощью кода GEANT4. В результате моделирования эффективность экранирования для гамма-излучения составила $4 \cdot 10^2$, а от нейтронного потока – $1 \cdot 10^3$ для нейтронов 2,5 МэВ и $1 \cdot 10^2$ для нейтронов 14 МэВ. При этом угловое поле зрения составляет $0,25^\circ$.

Литература

- [1]. V.P. Budaev, Yu.V. Martynenko, S.A. Grashin и др. Tungsten melting and erosion under plasma heat load in tokamak discharges with disruptions // Nuclear Materials and Energy. 2017. № 8. P. 418-422, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2021.112335.
- [2]. А.Е. Шевелев. Развитие методов гамма спектроскопии для диагностики убегающих электронов в компактных токамаках. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН – Санкт-Петербург, 2019 – 158с.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПОДВИЖНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЗОНДЫ НА ТОКАМАКЕ T-15МД

^{1,2}Тепикин В.И., ^{1,2}Саврухин П.В., ¹Шестаков Е.А., ^{1,2}Лисовой П.Д.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²НИУ «Московский энергетический институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.085

Магнитные зонды широко используются в экспериментах с высокотемпературной плазмой в токамаках для изучения МГД-возмущений, анализа нестационарных плазменных потоков и исследования плазменной турбулентности. На токамаке T-15МД оборудован полномасштабный комплекс магнитных диагностик [1]. Магнитные зонды представляют собой индуктивные катушки из кабеля в минеральной изоляции в стальном экране. Зонды закреплены под облицовкой из графита непосредственно на внутренней поверхности вакуумной камеры. Такая конструкция и расположение магнитных зондов не позволяет проводить надежные измерения возмущений магнитных полей в диапазоне частот выше 300 кГц, что ограничивает возможности плазменно-физических исследований. Для идентификации высокочастотных электромагнитных возмущений, локализованных в периферийных областях плазмы, необходимо использовать магнитные зонды, располагаемые непосредственно у границы плазменного шнура и кратковременно вводимые в периферийные области плазмы.

Проведенные в последнее время эксперименты на токамаке T-10 [2] показали возможную связь быстропеременных (0,2 – 1,5 МГц) электромагнитных возмущений в периферийных областях плазмы с появлением дуговых разрядов на внутрикамерных элементах токамака. Измерения пространственной локализации и временной эволюции быстропеременных электромагнитных колебаний подтвердили связь инициирования дуговых разрядов на начальной стадии неустойчивости срыва при высокой плотности с переходом от серии малых (тепловых) срывов к большому срыву тока. Мониторинг дуговых разрядов на периферии плазмы и связанных с ними быстропеременных возмущений магнитных полей может стать важным триггером для систем безопасного гашения разряда в будущих токамаках.

В текущем докладе представлен проект высокочастотных подвижных магнитных зондов и зондов Ленгмюра для регистрации быстропеременных электромагнитных возмущений в периферийных областях плазмы в диапазоне частот до 2 МГц.

Высокочастотный подвижный магнитный зонд на токамаке T-15МД состоит из блоков детектирования электромагнитных полей и токов, системы позиционирования, системы вакуумной откачки, системы питания, управления и сбора данных. Система быстрого позиционирования на базе линейного актуатора позволяет осуществлять кратковременные (до 100 мс) перемещения (до 100 мм) измерительного блока. Магнитные зонды состоят из набора трехкомпонентных катушек (3 – 7 катушек), закрепленных внутри защитного корпуса из высоковакуумной керамики и пластин из графита. Конструкция обеспечивает возможность изменения размера и расположения катушек в зависимости от требований экспериментов. Система из трех зондов Ленгмюра измеряет электрические поля и токи на зонд. Для стимулирования дуговых разрядов используются игольчатые электроды с подачей потенциала до 500 В.

Литература

- [1]. A.V. Sushkov, A.M. Belov, G.B. Igonkina et al. Design of inductive sensors and data acquisition system for diagnostics of magnetohydrodynamic instabilities on the T15MD tokamak // Fusion Engineering and Design. 2019. №12. P. 383–387.
- [2]. P.V. Savrukhin, E.A. Shestakov. Arc discharges during disruptions in the T-10 tokamak // Physics of Plasmas. 2019. № 9. <https://doi.org/10.1063/1.5102112>.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ В ТОКАМАКЕ С ПОМОЩЬЮ ВОЛН ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Теплова Н.В., Трошин Г.А., Гусаков Е.З., Ирзак М.А., Крыжановский А.К., Новиков Д.С.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: natalia.teplova@mail.ioffe.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.086

В данной работе представлен обновленный численный код FRTC-2, созданный на основе разработанного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе численного кода FRTC [1, 2], инкорпорированного в численный код ASTRA [3]. Численный код FRTC-2 создан для решения задачи распространения электромагнитных волн промежуточного частотного диапазона в плазме токамака и расчета величины и профиля генерированного тока.

Численный код FRTC-2 состоит из трех основных частей. В первой части считываются спектр стартовых замедлений антенны, рассчитанный кодом GRILL3D [4], параметры плазмы, рассчитанные кодом EFIT [5] и равновесие плазмы, рассчитанное для конкретного момента времени кодом ASTRA. Во второй части рассчитываются лучевые траектории электромагнитных волн в плазме, поглощенная мощность и коэффициент диффузии. В третьей части решается динамическое одномерное уравнение Фоккера-Планка с учетом рассчитанного во второй части коэффициента диффузии. Величина и профиль тока увлечения передается в код ASTRA для расчета равновесия в следующий момент времени. Расчеты учитывают эволюцию параметров плазмы во времени.

В численном коде FRTC-2 предусмотрена возможность расчетов как с одномерным, так и с двумерным спектром стартовых замедлений антенны, расчеты проводятся с учетом градиентных членов, учитывающих кривизну силовых линий магнитного поля, добавлены тепловые поправки к тензору диэлектрической проницаемости плазмы. Код рассчитывает распространения нижнегибридных волн и геликонов в плазме токамака. Интерфейс и оболочка “ASTRA-Box” для системы кодов FRTC-2 и ASTRA разработана на языке Python и позволяет удобно запускать процесс расчетов, систематизировать входные и выходные файлы, быстро визуализировать результаты расчетов.

Показаны примеры расчетов для токамаков Глобус-М2, ФТ-2 и Т-15МД.

Разработка численного кода выполнена при поддержке Государственного задания № 0034-2021-0003, расчеты для токамаков выполнены при поддержке Государственного задания № 0040-2019-0023.

Литература

- [1]. A.R. Esterkin, A.D. Piliya // Nucl. Fusion, V. 36, P. 1501, 1996.
- [2]. A.N. Saveliev // EPJ Web of Conferences, V. 157, P. 03045, 2017.
- [3]. G.V. Pereverzev, P.N. Yushmanov, Automated System for Transport Analysis IPP-Report IPP 5/98 (2002).
- [4]. M.A. Irzak, O.N. Shcherbinin // Nucl. Fusion, V. 35, P. 1341, 1995.
- [5]. L.L. Lao et. al. // Nucl. Fusion, V. 25, P. 1611, 1985.

АНАЛИЗ УЛУЧШЕНИЯ УДЕРЖАНИЯ ЭНЕРГИИ В ОМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ T-10 ПРИ СНИЖЕНИИ НАПУСКА ГАЗА

Тимченко Н.Н.

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г.Москва, Россия
e-mail: nltimchenko@gmail.com*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.087

Эффект улучшения удержания энергии при снижении напуска газа наблюдался ранее в экспериментах на токамаке T-10. Как показали исследования, в том числе и на других токамаках [1], этот режим улучшенного удержания носит переходный характер, и в стационарном состоянии самостоятельно не поддерживается. Для получения этого эффекта в квазистационарном режиме в работе [2] предлагается использовать периодическую инъекцию пеллет рабочего газа. Как показали эксперименты на стеллараторах LHD и W7-X, после инъекции пеллеты релаксация в плазме происходит с пикированием плотности, последующей самоорганизацией плазмы и переходом в режим улучшенного удержания при снижении плотности плазмы. Для оптимизации предложенного способа получения такого квазистационарного режима улучшенного удержания в работе [2] указывается на необходимость проведения исследований нелинейной динамики профилей основных параметров, которая определяет отклик плазмы после инъекции пеллеты.

В настоящем докладе представляются результаты экспериментов, в которых эффект улучшенного удержания энергии был получен при снижении напуска газа в ОН режимах токамака T-10. После снижения величины газонапуска начинается переход в режим улучшенного удержания, который сопровождается ростом центральных значений плотности $n_e(0)$, температуры $T_e(0)$ и $T_i(0)$, увеличением энергетического времени жизни τ_E и увеличением выхода нейтронов. Как показывает анализ эволюции профилей температуры и плотности, снижение газонапуска вызывает возмущение плотности на периферии и нелинейный отклик плазмы. Согласно измерениям характеристик турбулентности с помощью корреляционного рефлектомера, переход в режим улучшенного удержания сопровождается сменой доминирующей неустойчивости ITG на неустойчивость TEM. Дальнейшая эволюция параметров плазмы продолжается более 50 мсек, в течение которых происходит перестройка профилей температуры и плотности, сопровождающаяся увеличением τ_E . Перестройка профилей заканчивается бифуркацией режима, сменой доминирующей неустойчивости, снижением плотности и потерей эффекта улучшенного удержания. Анализ показывает нелинейный характер динамики профилей $T_e(r)$ и $n_e(r)$ и их самоорганизацию. В докладе приводятся результаты расчетов транспортных потоков и коэффициентов переноса частиц и тепла в ионной и электронной компонентах в рассматриваемом переходном режиме, выполненных с помощью кода ASTRA.

Литература

- [1]. X. Soldner et al., “Improved Confinement in High-Density Ohmic Discharges in ASDEX” // PRL, 61, 9 (1988)
- [2]. A. Dinklage, A. Alonso, J. Baldzuhn, H. Bouvain, J. De La Riva Villen, O. Ford, K. Hammond, G. Motojima, R. Sakamoto, N. Tamura, R.C. Wolf, the W7-X team, the LHD experiment team, «Controlling performance bifurcations in laser stellarator» // in Proceedings of 29th IAEA FEC conference EX/5-3. London, 2023.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕСИНХРОНИЗОВАННЫХ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОД С ПОМОЩЬЮ МНОГОЧАСТОТНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

¹Токарев А.Ю., ^{1,2}Яшин А.Ю., ^{1,2}Жильцов Н.С., ¹Кукушкин К.А., ²Курские Г.С.,
²Минаев В.Б., ¹Петров А.В., ²Петров Ю.В., ¹Пономаренко А.М., ²Сахаров Н.В.

¹*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: tokarev_ayu@spbstu.ru*

²*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.088

Основной режим работы токамаков в настоящее время – режим улучшенного удержания или H-мода – характеризуется большими значениями градиента давления на периферии [1], что является причиной возникновения большого числа неустойчивостей, в частности, периферийных локализованных мод (ELM). ELM считаются развитием пилинг-баллонной неустойчивости и приводят к импульсным выбросам частиц и энергии из области удержания на первую стенку и пластины дивертора, что может привести к повреждению установки [2]. В связи с этим изучение возникновения и развития ELM в настоящее время является важной и актуальной задачей, которой занимаются в том числе на сферическом токамаке Глобус-М2. На данном устройстве наблюдаются разные типы периферийных локализованных мод: синхронизованные появляются только при наличии внешнего триггера в виде какой-либо другой неустойчивости (в случае Глобус-М2 это пилообразные колебания в центре плазменного шнура). Однако наибольший интерес представляют появившиеся относительно недавно после модернизации токамака и, соответственно, улучшения параметров плазмы, десинхронизованные ELM, происходящие самопроизвольно в H-моду [3]. Предположительно, они относятся к типу III или V и полностью аналогичны модам на других токамаках, но для полного понимания их структуры требуется дальнейшее исследование.

Одним из мощных способов, позволяющих изучать ELM, является диагностика доплеровского обратного рассеяния (ДОР), установленная на токамаке Глобус-М2. Она включает 2 многочастотных рефлектометра с наклонными антеннами для зондирования плазмы. Один четырехчастотный позволяет исследовать периферийные области плазмы $0,8 < \rho < 1,1$, другой шестичастотный необходим для исследования более центральных областей $0,4 < \rho < 0,8$ [4]. Данная диагностика позволяет оценивать флуктуации плотности плазмы и измерять скорость ее вращения перпендикулярно магнитному полю, а значит и радиальное электрическое поле E_r . Благодаря применению многочастотного зондирования возможно построение радиальных профилей электрического поля и флуктуаций плотности. В данной работе исследуется влияние десинхронизованных ELM на E_r на радиусах $0,4 < \rho < 1,1$. Оказывается, во время них оно увеличивается на всем интервале измерений. Это показывает, что влияние периферийных мод распространяется и на внутренние области плазмы, что не согласуется с общими представлениями, но подтверждено экспериментально не только на Глобус-М2 [5]. Кроме того, приведено сравнение результатов с синхронизованными ELM и колебаниями предельного цикла (LCO).

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 23-72-00024, <https://rscf.ru/project/23-72-00024> на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях».

Литература

- [1]. Wagner F. // Plasma Phys. Control. Fusion, 2007, 49, B1.
- [2]. Connor J.W. et al. // AIP Conf. Proc., 2008, 1013 (1), 174–190.
- [3]. Solokha V.V. et al. // Plasma Phys. Rep., 2023, 49, 419–427.
- [4]. Yashin A.Y. et al. // JINST, 2022, 17, C01023.
- [5]. Conway G.D. et al. // 15th Intl. Reflectometer Workshop, St Paul Lez Durance Cedex, 2022.

АНОМАЛЬНОЕ РАССЕЯНИЕ ИОНОВ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ В ВИНТОВОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

¹Толкачев М.С., ¹Инжеваткина А.А., ¹Судников А.В., ²Устюжанин В.О.,
¹Черноштанов И.С.

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
email: M.S.Tolkachev@inp.nsk.su

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.089

Для повышения параметров удержания плазмы в открытых ловушках необходимо снизить потери, связанные с потоком частиц вдоль магнитного поля. Одним из подходов является запираение частиц с помощью многопробочных секций, в которых идет обмен импульсом между плазмой и магнитным полем, из-за чего скорость истечения плазмы падает. Теоретически предсказано, что эффективность многопробочного удержания увеличивается при движении максимумов магнитного поля [1]. Такую систему можно создать, поместив вращающуюся плазму в спиральное магнитное поле [2]. Предложенный метод сейчас проходит экспериментальную проверку на установке СМОЛА [3] в ИЯФ СО РАН.

Для эффективного удержания в многопробочных системах необходимо, чтобы длина свободного пробега ионов была равна длине одной ячейки многопробочной секции. Так как в горячей термоядерной плазме длина свободного пробега относительно кулоновских столкновений много больше периода многопробочного магнитного поля, то для эффективной работы многопробочных секций необходимо возникновение альтернативных механизмов рассеяния. Так, развитие баунс-неустойчивости в экспериментах на установке ГОЛ-3 приводило к возникновению аномальной столкновительности и увеличению энергетического времени жизни плазмы [4]. Потоки запертых и истекающих частиц в многопробочной ловушке с движущимися пробками противоположно направлены и имеют относительную скорость, пропорциональную скорости вращения плазмы, что должно приводить в неоднородности функции распределения и, как следствие, возникновению неустойчивостей. Недавние эксперименты на установке СМОЛА не показали резкого ухудшения удержания [5], что может быть связано с развитием колебаний, дополнительно рассеивающих ионы.

В докладе демонстрируются параметры наблюдаемых в плазме установки колебаний, и обсуждается их связь с аномальной столкновительностью. Показано, что колебания плазменного потенциала удовлетворяют условиям для резонанса с запертыми ионами. Регистрируемая амплитуда колебаний совпадает с оценкой для амплитуды, необходимой для эффективного рассеяния. Работа выполнена при поддержке РФФ (№. 22-12-00133).

Литература

- [1]. Budker G.I., Mirnov V.V., Ryutov D.D. // ZhETF Pisma Redaktsiiu. 1971. Т. 14. С. 320.
- [2]. Beklemishev A.D. // Fusion Science and Technology. 2013. Т. 63. №. 1Т. С. 355–357.
- [3]. Sudnikov A.V. et al. // Journal of Plasma Physics. 2022. Т. 88. №. 1. С. 905880102.
- [4]. Koidan V.S. et al. // Fusion Science and Technology. 2005. Т. 47. №. 1Т. С. 35–42.
- [5]. Sudnikov A.V. et al. // Journal of Plasma Physics. 2022. Т. 88. №. 6. С. 905880609.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ГЕНЕРАЦИИ ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НИЖНЕГИБРИДНЫХ ВОЛН НА ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М2 И ФТ-2

Трошин Г.А., Теплова Н.В., Гусаков Е.З., Крыжановский А.К.,
Коновалов А.Н., Дьяченко В.В., Новиков Д., команда ФТ-2, команда Глобус-М2

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: g.troshin@mail.ioffe.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.090

В данной работе представлено сравнение результатов численного моделирования генерации тока увлечения нижегибридными волнами и экспериментальных данных, полученных на токамаках Глобус-М2 и ФТ-2, с помощью обновленного численного кода FRTC [1, 2], инкорпорированного в код ASTRA[3].

Для расчета стартового спектра показателя преломления электромагнитной волны, запущенной в плазму, с учетом геометрии антенны и параметров плазмы в токамаке используется численный код Grill3D [4]. Рассчитанный спектр является двумерным, то есть содержит полоидальные и тороидальные компоненты показателя преломления. В более ранней версии численного кода FRTC двумерный спектр стартовых замедлений был проинтегрирован по направлению, перпендикулярному заданному направлению ориентации антенны в эксперименте в данном разряде. Таким образом лучи запускались только с одной модой, тороидальной или полоидальной. Такое упрощение допустимо в случае классического токамака, где полоидальное поле слабое, и направление полного магнитного поля практически совпадает с тороидальным направлением. В сферическом токамаке, например, Глобус-М2, магнитное поле направлено под углом к тороидальному направлению, и обе компоненты поля, как тороидальная, так и полоидальная, должны учитываться при расчете затухания волны.

В настоящей работе новый двумерный подход к учету спектра стартовых замедлений нижегибридных волн применяется для серийного моделирования генерации тока увлечения на основе экспериментальных данных токамака Глобус-М2. Расчеты проведены для двух групп экспериментов, с тороидальной и полоидальной ориентацией грилла. Также представлены результаты моделирования генерации тока увлечения на основе экспериментальных данных для токамака ФТ-2. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными. Было показано, что модель демонстрирует устойчивый результат для разных параметров плазменного разряда, который хорошо совпадает с измеренными значениями.

Модернизация численного кода выполнена при поддержке Государственного задания № 0034-2021-0002, расчеты для токамаков выполнены при поддержке Государственного задания № 0040-2019-0023.

Литература

- [1]. A.R. Esterkin and A.D. Piliya // Nucl. Fusion, 36, 1501 (1996).
- [2]. A.N. Saveliev // EPJ Web of Conferences, 157, 03045 (2017).
- [3]. G.V.Pereverzev and P.N. Yushmanov, Automated System for TRansport Analysis IPP-Report // IPP 5/98, (2002).
- [4]. M. A. Irzak and O. N. Shcherbinin // Nucl. Fusion, 35, 1341 (1995).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ С ГЕЛИКОИДАЛЬНЫМ ПОЛЕМ СМОЛА

^{1,2}Устюжанин В.О., ¹Иванов И.А., ¹Инжеваткина А.А., ¹Судников А.В.,
¹Толкачев М.С.

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
email: V.O.Ustyuzhanin@inp.nsk.su

²Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.091

Установка СМОЛА (Спиральная Магнитная Открытая Ловушка) – экспериментальный стенд для проверки концепции удержания вращающейся плазмы в магнитном поле с геликоидальной симметрией (винтовое удержание) [1]. Теоретически в концепции винтового удержания плазмы предсказана экспоненциальная зависимость эффективности подавления потерь от длины магнитной системы с винтовым полем, приводящая к существенному повышению эффективного пробочного отношения в открытой ловушке [2]. В 2017 – 2022 гг. на установке СМОЛА экспериментально была продемонстрирована возможность подавления потока плазмы винтовой магнитной системой и соответствие экспериментальных скейлингов теоретическим оценкам [3, 4].

Экспериментальный стенд СМОЛА состоит из 3 частей: источника плазмы с входным расширителем, транспортной секции с винтовой пробкой (12 периодов винтового поля) и выходного расширителя с радиально – сегментированным плазмоприёмником. Плазменный поток в установке формируется аксиально-симметричным плазменным источником с нагреваемым LaV₆ катодом и медным анодом [5]. Катушки магнитного поля в области источника осуществляют магнитную изоляцию анода от катода и формируют магнитную пробку на входе в расширитель. Также катод и анод плазменной пушки совместно с другими электродами установки задают радиальное электрическое поле, необходимое для $E \times B$ вращения плазмы. Формируемая источником плазма имеет следующие параметры: $n = 10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 10 \div 30 \text{ эВ}$ и $T_i = 3 \div 7 \text{ эВ}$ [5].

Для исследования процессов формирования и дальнейшей динамики плазмы используется комплекс зондовых, оптических и вакуумных диагностик. Электронная температура, ионная плотность, электрические потенциалы и электрическое поле в плазме измеряются с помощью системы электрических зондов. Также зонды позволяют исследовать колебания плазмы. Температура ионов вычисляется путём определения доплеровского сдвига собственного излучения плазмы с помощью спектрометров с высоким пространственным разрешением. Газовые измерения проводятся с помощью газоразрядных вакууметров.

В докладе будут представлены результаты изучения формирования плазмы в установке СМОЛА в разных режимах работы плазменного источника.

Литература

- [1]. Beklemishev A.D. // Fusion Science and Technology, 2013, V. 63, N.1T, P.355.
- [2]. Sudnikov A.V. et al. // Fusion Engineering and Design, 2017, vol. 122, p. 86–93.
- [3]. Sudnikov A.V. et al. // Journal of Plasma Physics, 2020, v. 86, Issue 5, 905860515.
- [4]. Sudnikov A.V. et al. // Journal of Plasma Physics, 2022, v. 88, Issue 1, 905880102.
- [5]. Ivanov I.A. et al. // Journal of Plasma Physics, 2021, v. 87, Issue 2, 845870201.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЛИННОФОКУСНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ НА МАКЕТЕ ИНЖЕКТОРА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ТОКАМАКА Т-15МД

¹Вадимов Н.А., ^{1,2}Виницкий Е.А., ¹Елисеев Л.Г., ^{1,3}Харчев Н.К., ^{1,2}Мельников А.В.,
^{1,4}Саранча Г.А., ¹Драбинский М.А.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия,

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия,

³Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия,

⁴Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.092

Зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПТИ) – уникальная диагностика, позволяющая проводить локальные прямые измерения электрического потенциала высокотемпературной плазмы по всему сечению плазменного шнура [1]. В настоящее время разрабатывается проект диагностики для токамака Т-15МД [2].

Для зондирования плазмы токамака Т-15МД ионный пучок должен иметь высокую интенсивность и фокусное расстояние в диапазоне 3 – 5 м. Необходимо точно фокусировать пучок в точке измерения во время эксперимента. Возможность получения пучков с заданным фокусным расстоянием изучается на высоковольтном макете инжектора ЗПТИ токамака Т-15МД [3].

Угловая расходимость и интенсивность пучка определяются параметрами ионно-оптической системы. Интенсивность пучка зависит от мощности нагрева эмиттера P_{fil} и вытягивающего напряжения U_{extr} , а фокусное расстояние – от комбинации вытягивающего, фокусирующего U_{foc} и ускоряющего U_{beam} напряжений. Ускоряющее напряжение определяет также энергию ионов пучка.

Для определения положения точки фокуса на макете инжектора используются четыре проволочных датчика. При отклонении пучка от оси электрическим полем отклоняющих пластин, он попадает на проволочки датчиков, возбуждая в них ток. Зная угол отклонения пучка и расстояние между проволочками, можно определить диаметр пучка. По данным о диаметре пучка в трех и более точках вдоль оси макета однозначно устанавливается диаметр пучка и положение его фокуса. Например, при $U_{\text{beam}} = 75$ кВ, $U_{\text{extr}} = -580$ В, $U_{\text{foc}} = -3$ кВ и $P_{\text{fil}} = 24$ Вт пучок имеет диаметр 2,6 мм в 1,2 м от инжектора и 36,8 мм в 3,6 м от инжектора, т.е. фокус находится на расстоянии 1 – 1,4 м, после чего пучок начинает расходиться.

В работе исследуется зависимость свойств пучка от напряжений на электродах ионно-оптической системы макета инжектора ЗПТИ. Рассматривается возможность управления фокусом пучка во время эксперимента на токамаке Т-15МД. Полученные результаты могут быть использованы на диагностиках ЗПТИ и Beam Emission Spectroscopy (BES).

Литература

- [1]. Jobes F.C., Hickok R.L. // Nuclear Fusion, 1970, 10 (2), с. 195.
- [2]. Драбинский М.А., Мельников А.В., Елисеев Л.Г., Харчев Н.К., Лысенко С.Е., Хабанов Ф.О., Вадимов Н.А., Крохалев О.Д., Горбун М.С., Саранча Г.А., Гуцевич Е.И., Прокофьева Т.Ю., Недбайлов К.О. // Сборник тезисов XIX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», Сочи, 2021, с. 163 – 166.
- [3]. Vadimov N.A., Sarancha G.A., Drabinskiy M.A., Melnikov A.V., Eliseev L.G., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Komarov O.D., // Вопросы атомной науки и техники, 2020, 130 (6), с. 200 – 203.

СТРУКТУРА ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ СПОНТАННЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

^{1,2}Васильков Д.Г., ¹Борзосеков В.Д., ¹Скворцова Н.Н., ^{1,3}Харчев Н.К.

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия,*

e-mail: lhdlhd81@mail.ru

²*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

³*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.093

Представлены результаты экспериментов на классическом квазистационарном стеллараторе Л-2М [1]. Нагрев плазмы осуществлялся в режиме электронно-циклотронного резонансного нагрева при помощи двух гиротронов комплекса МИГ-3 в условиях высокого удельного энерговыклада в диапазоне $0,8 - 2 \text{ МВт/м}^3$ [2]. В данном диапазоне мощностей ЭЦР-нагрева в плазме периодически наблюдаются спонтанные переходные процессы, приводящие к динамическому росту энергии плазмы до 20% [3].

Система управления гиротронным комплексом позволяет задавать временную модуляцию импульсов СВЧ относительно друг друга [4]. В данном режиме получены результаты по увеличению энергетического времени жизни плазмы τ_E . Первый гиротрон на фиксированной мощности служит для ионизации и первичного нагрева плазмы, второй обеспечивает стационарный разряд длительностью 10 мс. Продемонстрировано, что, варьируя мощность второго гиротрона, есть возможность кратного увеличения τ_E [5].

В работе сравниваются режимы со спонтанными переходными процессами при постоянной мощности нагрева и вынужденными переходными процессами, вызванными скачкообразно растущей или убывающей мощностью нагрева. Проводится поиск связи эволюции макропараметров плазмы (в первую очередь τ_E) с параметрами плазменной турбулентности.

Измерение микропараметров производится методами обратного, малоуглового и брэгговского рассеяния гиротронного излучения [6], а также методами зондовых измерений и рефлектометрии. Представлен спектральный и корреляционный анализ флуктуаций плотности плазмы, электрического и магнитного полей. Приводятся гипотезы о явлениях, способствующих динамическому изменению макропараметров. Рассматривается развитие возможных локальных неустойчивостей, а также влияние взаимодействия плазмы со стенками вакуумной камеры.

Литература

- [1]. Abrakov V.V. et al. // Nucl. Fusion, 1997, V. 37, P. 233.
- [2]. Kharchev N.K. et al. // Plasma and Fusion Research, 2011, V. 6, 2402142.
- [3]. Vasilkov D.G. et al. // J. Phys.: Conf. Ser., 2021, V. 2055, 012005.
- [4]. Батанов Г.М. и др. // Физика плазмы, 2017, Т. 43, С. 666.
- [5]. Vasilkov D.G. and Kharchev N.K. // Plasma Physics Reports, 2023, V. 49, P. 1443.
- [6]. Батанов Г.М. и др. // Физика плазмы, 2013, Т. 39, С. 511.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИТИЕВЫХ КАПИЛЛЯРНЫХ СТРУКТУР В ОМИЧЕСКИХ РАЗРЯДАХ ТОКАМАКА T-10

¹Вершков В.А., ¹Сарычев Д.В., ¹Шелухин Д.А., ¹Немец А.Р., ²Мирнов С.В.,
³Люблинский И.Е., ³Вертков А.В., ³Жарков М.Ю.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, округ Троицк, Россия

³Акционерное общество «НИКИЭТ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.094

В данной работе представлены результаты экспериментов на токамаке T-10 с использованием литиевых капиллярно-пористых структур. На первом этапе проводилось напыление лития на камеру в месте расположения кольцевой и рельсовой графитовых диафрагм перед серией экспериментов. Было показано, что напыление лития в условиях графитовых диафрагм позволяет значительно снизить рециклинг дейтерия и уровень примесей в плазме. При этом рециклинг значительно снижается на 5–10 разрядов, но полностью возвращается на прежний уровень через 20–50 разрядов. После литиизации камеры токамака были получены режимы с эффективным зарядом плазмы, близким к единице, при значительном снижении радиационных потерь и напряжения обхода. Эффект снижения уровня примеси сохранялся в течение 1–2 недель.

На втором этапе была использована капиллярно-пористая структура с литиевым наполнением в качестве подвижной рельсовой диафрагмы в конфигурации T-10 с вольфрамовыми основными диафрагмами. Ввод литиевой диафрагмы в область SOL приводит к росту потоков лития и его накоплению в камере. В результате происходит значительное уменьшение уровня примесей и приближение эффективного заряда к единице.

Эксперименты с глубоким вводом в область замкнутых магнитных поверхностей показали надежную работу литиевой капиллярной структуры при продольных тепловых потоках плазмы до 3,6 МВт/м². Показано, что ввод диафрагмы приводит к очищению плазмы от примесей, аналогично экспериментам с распылением лития и вводом диафрагмы в SOL плазмы. Однако в ряде экспериментов наблюдался сильный рост болометрических потерь и напряжения обхода при уменьшении уровня легких примесей. При этом радиационные потери, характерные для вольфрама, максимальны в центральных областях шнура. Эти явления происходят из-за распыления вольфрамовой основы капиллярной структуры при плохой пропитке ее литием.

В условиях хорошей пропитки литием капиллярной структуры при вводе диафрагмы в горячую область плазмы в отдельных экспериментах разряды заканчивались срывами из-за массивных инъекций капель лития из диафрагмы. Показано, что вылет капель связан с выдавливанием лития из-за пондеромоторных сил при протекании тока на диафрагму из плазмы в магнитном поле.

Эксперименты показали сильную зависимость распыления лития от температуры взаимодействующей с диафрагмой плазмы.

Обнаружено, что при больших потоках тепла на литиевую диафрагму происходит эффект термостабилизации диафрагмы испаряющимся литием. Оценки показали, что на T-10 он наблюдался при достижении температуры лития около 500°C. Однако более реальна оценка в 450°C, сделанная в экспериментах на токамаке FTU.

Введение диафрагмы до замкнутых магнитных поверхностей вызывало сильный нагрев и испарение лития. При этом максимальный уровень газонапуска оказывался недостаточным для поддержания плотности в разряде и охлаждения периферии из-за сильного падения рециклинга. В итоге возросшие потоки лития приводили к практически полностью литиевой плазме.

ИНТЕГРАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА МОМЕНТА ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

^{1,2}Зенкова О.А., ^{1,2}Киселев Е.О., ¹Балаченков И.М., ¹Бахарев Н.Н., ¹Варфоломеев В.И.,
¹Гусев В.К., ¹Жильцов Н.С., ¹Курские Г.С., ¹Минаев В.Б., ¹Мирошников И.В.,
¹Патров М. И., ¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В., ¹Скрекель О.М., ¹Солоха В.В.,
¹Тельнова А.Ю., ¹Ткаченко Е. Е., ¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю., ¹Тюхменева Е.А.,
¹Хромов Н.А., ¹Щеголев П.Б.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,

²Политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.095

В экспериментах на сферическом токамаке Глобус-М2 (большой радиус $R = 0,36$ м, малый радиус $a = 0,24$ м, аспектное отношение $R/a \approx 1,5$ и вытянутость $k \approx 1,8 - 2$) при нагреве плазмы с помощью 2 инжекторов высокоэнергичных атомов был получен режим с горячими ионами [3], в котором диагностикой CXRS [1, 2] (активная спектроскопия перезарядки) были зафиксированы скорости тороидального вращения плазмы до 190 км/с.

Исследование переноса момента вращения требует комплексного подхода, включающего решение транспортного уравнения, с заданным коэффициентом переноса момента вращения, правая часть которого содержит внешний крутящий момент от инжекции нейтральных частиц. Для вычисления последнего используется Монте-Карло код NUBEAM [4], который рассчитывает траектории движения быстрых частиц в токамаке.

В процессе моделирования выяснилось, что скорость тороидального вращения и радиальное электрическое поле могут оказать заметное влияние на функцию распределения быстрых частиц, а также на нейтронный поток. В связи с этим потребовалась разработка программы, позволяющей совместно решать транспортные уравнения и рассчитывать процесс замедления быстрых ионов.

Доклад посвящен результатам применения объединенных кодов ASTRA [5] и NUBEAM для исследования переноса момента вращения плазмы на сферическом токамаке Глобус-М2 в 2 разрядах: #42155, характеризуемый низкой скоростью вращения плазмы (до 10 км/с) и одним инжектором, а также разряд в режиме с горячими ионами #41585 с инжекцией 2 пучками и скоростью вращения до 190 км/с.

Получено, что совместное решение 2 кодов сходится, заметное влияние на скорость вращения плазмы оказывает крутящий момент от столкновений с быстрыми частицами, а также от взаимодействия тока быстрых частиц и магнитного поля. Нейтронный поток при неучете скорости вращения плазмы может быть недооценен на 15%.

Эксперименты проведены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях". В рамках выполнения гос. задания осуществлена подготовка нагревных (тема 0034-2021-0001) и диагностических систем (0040-2019-0023) токамака.

Литература

- [1]. Avdeeva G.F. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 666 012002 (2016).
- [2]. Larionova M.M. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 1400 077018 (2019).
- [3]. Курские Г.С., et al. // Физика плазмы. Т. 49. № 4. С. 305-321 (2023).
- [4]. Pankin A., McCune D., Andre R., Bateman G., Kritiz A. // Comput. Phys. Commun T. 159 № 3 С.157-184. (2004).
- [5]. Pereverzev G. and Yushmanov P.N. // Preprint IPP 2/98 (2002).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОБАЛАНСА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 В РЕЖИМАХ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА И НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ

Жильцов Н.С., Курские Г.С., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Киселёв Е.О.,
Минаев В.Б., Мирошников И.В., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Петров Ю.В.,
Сахаров Н.В., Солоха В.В., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е., Толстяков С.Ю.,
Тюхменева Е.А., Щёголев П.Б.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: nisovru@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.096

В докладе представлены результаты моделирования процессов переноса тепла на токамаке Глобус-М2. Основной инструмент исследования – диагностика томсоновского рассеяния, обеспечивающая детальные измерения пространственного распределения температуры T_e и концентрации n_e электронов. Прямое сравнение T_e и n_e даёт качественное представление о термоизоляции электронов в конкретных разрядах токамака. Для более общего анализа термоизоляции и возможности сравнения с другими установками проведён совместный анализ баланса энергии, частиц и полоидального магнитного потока. Решение обратной транспортной задачи кодом ASTRA позволило оценить коэффициенты температуропроводности, диффузии, а также время удержания энергии.

Анализ проведён для выборки разрядов токамака в широком диапазоне концентраций электронов $n_e = (0,5 - 10) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при токе плазмы $I_p = 0,4 \text{ МА}$ и тороидальном магнитном поле $B_T = 0,8 \text{ Тл}$. В работе сравниваются два сценария разряда токамака. Первый – с исключительно омическим нагревом плазмы. Второй – с дополнительным нагревом инжекцией атомов с энергией E_{NBI} до 40 кэВ. В омическом режиме температура электронов снижается с ростом концентрации от 1,2 кэВ при $n_e = 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ до 0,6 кэВ при $n_e = 8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В сценарии с нейтральной инжекцией температура электронов слабо зависит от концентрации в области высоких концентраций и при $n_e = 8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ T_e достигает 1,2 кэВ. Для объяснения отличия поведения температуры электронов в этих сценариях рассчитаны зависимость мощности, передаваемой от электронов к ионам при столкновениях, P_{e-i} от концентрации электронов и зависимость времени удержания энергии τ_E от концентрации электронов. Проведено сравнение с эмпирическими выражениями: времени удержания энергии в классических и сферических токамаках; критической концентрации, при которой происходит переход из режима линейного омического удержания в режим насыщения.

Работа выполнена на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях».

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ПЛАЗМЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ТОКАМАКА T-15МД

^{1,2}Зотов И.В., ¹Андреев В.Ф., ¹Балашов А.Ю., ²Дементьев Н.С., ¹Квасков В.С.,
¹Игонькина Г.Б., ¹Рогозин К.А., ¹Рыжаков Д.В., ¹Соколов М.М., ¹Степин А.В.,
¹Сушков А.В., ¹Хайрутдинов Э.Н.

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
e-mail: iv_zotov@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.097

Для получения требуемых конфигураций плазмы с нужной вытянутостью и в заданном месте необходимо с хорошей точностью уметь определять границу плазменного шнура. Решение этой задачи также необходимо для эффективного управления плазмой в течение всего разряда и прогнозирования следующих импульсов.

Целью данной работы является восстановление границы плазмы из экспериментальных измерений токамака T-15МД на основе решения обратных задач [1], т.е. показать возможность реализации этой задачи на основе имеющейся электромагнитной диагностики и проведенных измерений на токамаке. Для решения обратной задачи использовалась следующая экспериментальная информация, а именно измеренное напряжение датчиками напряжения обхода (ДНО), а также токи в полоидальных обмотках и ток плазмы.

Отметим, что при решении обратной задачи [1] используется информация о потоке и магнитном поле, поэтому необходимо было провести интегрирование измеряемых сигналов, которое было осуществлено численно. Для тестового режима проведено сравнение результатов численного интегрирования и результата, полученного с использованием аналогового интегратора, которое показало их хорошее совпадение. Это позволило использовать численное интегрирование экспериментально измеренного напряжения для всех каналов ДНО.

На следующем этапе было проведено сравнение равновесия, посчитанного кодом ТОКАМЕQ [2] для одного из моментов разряда и полученное из решения обратной задачи [1]. Было показано хорошее согласие восстановленного равновесия, что позволило перейти к обработке экспериментальных сигналов, полученных в ходе последней кампании на токамаке T-15МД.

Обработка экспериментальных данных показала возможность восстановления границы плазменного шнура по экспериментальным сигналам датчиков напряжения обхода для имеющейся конфигурации электромагнитной диагностики. Было восстановлено несколько равновесий плазмы для токамака T-15МД.

Работа проведена в рамках выполнения Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Зотов И.В. и др. // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 4, с. 44 – 54.
- [2]. Сычуглов Д.Ю. и др. // ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 85 – 89.

ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ТОКАМАКА – СИСТЕМ ОТКАЧКИ, ИНЖЕКЦИИ И ОБРАБОТКИ ГАЗА (ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ) НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ

¹Ананьев С.С., ²Савельев Т.А.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, Ananyev_SS@nrcki.ru

²НИУ «МГТУ имени Н.Э. Баумана», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.098

Практически все кандидатные ядерные реакции синтеза предполагают использование изотопов водорода в качестве одного или нескольких компонентов топлива. Тритий будет присутствовать (в качестве компонента топлива и продукта) в реакциях D-T и D-D. Любая перспективная термоядерная установка или реактор, использующий тритий, требует тритиевого топливного цикла (далее – ТЦ) [1, 2], способного перерабатывать весь тритий, который не участвовал в реакции термоядерного синтеза, выделять тритий и дейтерий и удалять примеси, а также обеспечивать разделение дейтерия и трития для выделения компонентов топлива достаточной чистоты и в достаточном качестве для поддержания плазменных операций. Комплекс систем ТЦ также является необходимой составляющей любой установки токамак даже в случае её работы с нерадиоактивными изотопами водорода. В этом случае состав и архитектура ТЦ будут отличаться от случая тритиевого исполнения, однако все ключевые закономерности и принцип организации останутся прежними.

Подходы и решения, используемые в установках TFTR и JET, проектах ИНТОР и ИТЭР, не могут в полной мере быть использованы по причине импульсно-периодического режима работы и экспериментального назначения этих установок. В стационарно работающей установке, использующей тритий в качестве компонента топлива, необходимо непрерывно обрабатывать значительные его количества, не допуская чрезмерного скапливания и потерь в каждой отдельной системе, а также учитывать влияние режимов горения термоядерной плазмы в токамаке и параметров взаимодействия плазма-стенка. Это требует выбора технологических решений (технологий ТЦ) на основании сведений о потоках газа и его изотопном составе, их интеграции и оптимизации для обеспечения целевых параметров плазмы в различных сценариях работы установки.

До настоящего времени авторам не известно ни одной опубликованной методики расчета, которая могла бы связывать параметры плазменного разряда с применяемыми технологиями топливного цикла. В докладе описывается подход, примененный к разрабатываемым в НИЦ «Курчатовский институт» проектам ТИН-СТ и ДЕМО-ТИН. Предложенные решения могут позволить выполнить проектирование инфраструктуры токамака с реакторными технологиями TRT и стационарной установки для управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием (в рамках федерального проекта 3 комплексной программы ГК Росатом РГТН), и согласовывать эти системы со сценариями плазменного разряда и работы самой установки.

Дальнейшее развитие предложенного автором подхода с применением более сложных и точных моделей и кодов – предмет будущих работ (не столько в интересах самих авторов, сколько в интересах развития направления в РФ), требующих привлечения значительного количества специалистов высокого уровня и создания коллектива.

Литература

- [1]. В.Е. Черковец, В.В. Фрунзе, Тритиевые комплексы термоядерных установок с магнитным удержанием, Москва: Тривант, 2019. – 232 с. : ил. - Библиогр.: с. 218 – 232.
- [2]. S.S. Ananyev, B.V. Ivanov, and B.V. Kuteev, Analysis of promising technologies of DEMO-FNS fuel cycle // Fusion Eng. Des., 161, 111940 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111940>.

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ»**

**SECTION
«INERTIAL FUSION»**

ОБРАЗОВАНИЕ НАДТЕПЛООВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В ПИНЧЕВОМ РАЗРЯДЕ

¹Фролов А.Ю., ²Вихрев В.В., ¹Чирков А.Ю.

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, e-mail: alexeyfrolov92@yandex.ru

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: vikhrev@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.099

В газовых Z-пинчах, в момент развития перетяжки, могут формироваться условия, при которых релаксация ионной компоненты плазмы происходит медленнее, чем набор энергии высокоэнергетическими ионами. Этот эффект возникает в результате развития МГД-неустойчивости. Сильно увеличивающееся магнитное поле, совместно с утечкой плазмы через торцы перетяжки, приводят к росту температуры и плотности плазмы.

Время ион-ионных взаимодействий пропорционально температуре плазмы в степени $3/2$ и обратно пропорционально плотности [1]. К моменту наибольшего сжатия плазмы наблюдается уменьшение пролетного времени высокоэнергетических ионов через перетяжку Z-пинча по сравнению с характерным временем взаимодействия с ионами плазмы. Это обстоятельство свидетельствует о наличии механизма формирования надтеплового распределения ионов в пинчевом разряде. Имеющиеся экспериментальные данные также свидетельствуют о возможности формирования распределения ионов, отличающегося от распределения Максвелла [2].

Рассмотрение динамики плазмы Z-пинча исходя из кинетического подхода сопряжено со сложностями. Принципиальная возможность формирования надтеплового распределения продемонстрирована в [3]. Более детальный расчет такой задачи сопряжен, в том числе, с численными сложностями. Поэтому необходимо использовать статистические методы, например, метод Монте-Карло.

Данная работа посвящена исследованию образования надтеплового распределения ионов в пинчевом разряде. Исследование основано на моделировании движения отдельно взятых ионов в перетяжке пинча. Рассматривается вероятностный подход к вопросу взаимодействия иона с плазмой. Учитывается изменение во времени величины магнитного и электрического поля, размеров перетяжки, температуры и плотности ионной компоненты плазмы. Рассматриваются ионы, двигающиеся с разными начальными скоростями и в разных направлениях. Результаты моделирования обобщаются для получения итоговых распределений.

Результаты работы демонстрируют наличие в Z-пинчах двух взаимодополняющих механизмов, отвечающих за формирование надтеплового распределения ионов. Первый механизм – неустойчивость. Она обеспечивает запаздывание релаксации плазмы относительно набора ионами энергии. Второй механизм отвечает за набор ионами энергии. Высокоэнергетические ионы, взаимодействуя с изменяющимся магнитным полем, увеличивают свою энергию подобно тому, как описано в [4]. Наличие надтеплового распределения ионов вероятно связано с наличием нейтронной анизотропии, высокоэнергетическими струями ионов и другими особенностями пинчевых разрядов.

Литература

- [1]. Жданов С.К., Курнаев В.А., Романовский М.К., Цветков И.В. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках. М.: НИЯУ МИФИ. 2007.
- [2]. Вихрев В.В., Королёв В.Д. // Физика плазмы, 2007, Т. 33, № 5, С. 397 – 423.
- [3]. Фролов А.Ю., Дружинина О.В, Чирков А.Ю. // Электромагнитные волны и электронные системы, 2021, Т. 26, № 5, С. 5–14.
- [4]. Шлютер А. Управляемые термоядерные реакции. М.: Атомиздат, 1960.

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ВОГНУТОГО МОНОХРОМАТОРА ИЗ СЛЮДЫ, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

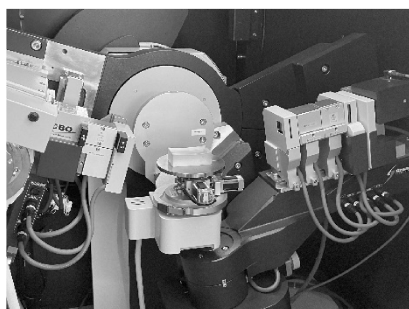
¹Баронова Е.О., ²Ломов А.А.

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, baronova04@mail.ru

²Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.100

Высокотемпературная плазма является источником линейчатого рентгеновского излучения высокоионизованных ионов. Анализ интенсивностей линий ионов – эффективный инструмент оценки электронной плотности, электронной и ионной температуры плазмы. Линейчатый спектр с высоким пространственным и спектральным разрешением регистрируется с помощью фокусирующих рентгеновских спектрографов, важнейшими элементами которых являются вогнутые кристаллы - монохроматоры: кварц, кремний, германий, слюда. Точность определения параметров плазмы зависит от качества этих элементов. Так как энергии диагностических рентгеновских линий близки друг другу, то обычно предполагается равенство их коэффициентов отражения. Однако, во многих экспериментах отражение близко лежащих спектральных линий происходит от различных участков кристалла [1]. Очевидно, что однородность дифракционных свойств кристалло-монохроматоров зависит от технологии их изготовления и требует верификации даже для тонких плоских совершенных образцов [2].



Представленная работа посвящена исследованию однородности отражения двух образцов слюды размерами $25 \times 70 \text{ мм}^2$, толщиной 110 мк, наклеенных на сферические поверхности радиусом 250 мм. Эксперименты проведены на установке SmartLab (Rigaku, Japan). На рисунке исследуемый кристалл-монохроматор в центре, слева – источник излучения, справа-детектор. Измерения выполнялись в третьем порядке отражения K_{α} Cu (угол Брэгга $\theta = 13,36^{\circ}$), в параллельном пучке расходимостью $0,04^{\circ} - 0,05^{\circ}$.

Дифракционная кривая регистрировалась с шагом 2 мм и 4 мм с площади образца $0,2 \text{ мм} \times 15 \text{ мм}$. Такая область кристалла может быть задействована при регистрации спектров точечных источников (лазерная плазма, Z-пинч), а расстояние между областями кристалла, отражающими соседние линии, может составлять 2 – 3 мм.

Зарегистрированные кривые отражения на два порядка шире предсказанных для плоских образцов, в 5 – 6 раз шире приведенных для вогнутых образцов [3]. Полученные результаты свидетельствуют о неоднородности дифракционных свойств вогнутой слюды: локальные коэффициенты отражения могут отличаться на 20%, что сравнимо с точностью аналитических методов рентгеновской спектроскопии. Среди причин неоднородности – мозаичность слюды, внесение дополнительных напряжений, возникающих в результате ее изгиба, а также наличие слоя клея неконтролируемой толщины. Детальная характеристика монохроматоров рентгеновских спектрометров необходима, так как позволяет повысить точность оценки параметров высокотемпературной плазмы.

Литература

- [1]. Е.О. Baronova, ISSN 1063-7788 // Physics of Atomic Nuclei, 2023, V. 86, No. 10, pp. 1–3.
- [2]. N. R. Pereira, A. T. Macrander, E. Kasman, X-R. Huang, and E. O. Baronova, DOI:10.1063/50040584.
- [3]. <https://x-server.gmca.aps.anl.gov/>, <https://www.aps.anl.gov/Science/Scientific-Software/XOP>

ПЕРЕДАЧА ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СЛОИСТУЮ МИШЕНЬ

^{1,2}Бутусов Е.В., ³Гуськов С.Ю., ^{2,3}Кучугов П.А., ³Яхин Р.А.

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.101

В работе представлены результаты расчётно-теоретических исследований распространения лазерно-индуцированной ударной волны через систему плоских слоёв вещества. Основное внимание уделяется воздействию на многослойную мишень мощного лазерного импульса с интенсивностью порядка 10^{13} Вт/см², характерной для экспериментов на лазерной установке ЛУЧ (РФЯЦ ВНИИЭФ) [1]. Представлены результаты двух серий расчётов. В первом случае на пути между лазером и слоем твёрдого вещества находится система твёрдых элементов, разделённых воздушными промежутками, имитирующая пористое вещество. Во втором случае эта система заменяется эквивалентной однородной средой с плотностью, равной средней плотности пористого вещества. Численные расчёты выполнены с помощью одномерной лагранжевой программы ДИАНА [2], осуществляющей численное решение системы уравнений сплошной среды в двухтемпературном приближении с учётом поглощения лазерного излучения, выделения энергии в термоядерных реакциях и переноса собственного излучения плазмы.

В работе исследованы особенности передачи давления при распространения лазерно-индуцированной ударной волны из слоистой системы в среду с твёрдотельной плотностью. Обсуждаются возможности использования пористых сред в мишенях, предназначенных для исследований уравнения состояния вещества и инициирования термоядерной реакции в схемах прямого облучения в лазерном термоядерном синтезе.

Литература

- [1]. Белов И.А., Бельков С.А., Бондаренко С.В. и др., Ударная передача давления твердому веществу в мишени с пористым поглотителем излучения мощного лазерного импульса // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2022. Т. 161. №. 3. С. 403 – 413.
- [2]. Змитренко Н.В., Карпов В.Я., Фадеев А.П. и др. // ВАНТ, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, 1982, 2, 38.

ПРИМЕНЕНИЕ КОДИРУЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ВЗРЫВАЮЩИХСЯ ПРОВОЛОЧЕК

¹Болховитинов Е.А., ¹Кологривов А.А., ¹Рупасов А.А., ¹Пикуз С.А., ¹Тиликин И.Н.,
¹Шелковенко Т.А., ²Иванов О.П., ²Потапов В.Н.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,

²Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.102

Для получения изображения плазменного источника в рентгеновском диапазоне обычно применяется камера-обскура, представляющая собой отверстие малого диаметра в непрозрачном для рентгеновского излучения экране. Важнейшим достоинством камеры-обскуры является простота изготовления и применения. Однако, из-за низкой светосилы камеры-обскуры, энергии излучения, попавшей на детектор, часто оказывается недостаточно для получения качественного изображения. Одним из альтернативных средств такой диагностики является применение кодирующей апертуры (КА), которая представляет собой структуру пересекающихся взаимно-перпендикулярных прозрачных и непрозрачных полос [1]. Такая КА была применена в экспериментах по исследованию изображений плазмы взрывающихся проволочек гибридных X-пинчей в рентгеновском диапазоне на установке «Кинг». Использовалась перекрытая бериллиевым (Be) фильтром КА размером 1×1 мм, которая по структуре и корреляционным свойствам близка к КА типа PnP [2], с регистрацией изображения на флуоресцентную запоминающую пластину без защитного покрытия. Одновременно, для вспомогательной визуализации, изображения плазмы регистрировались на две камеры-обскуры, как открытую, так и перекрытую Be-фильтром для отсечки мягкого рентгеновского излучения, что позволяло точно установить местоположение ярких излучающих точек на пинче.

Излучение, прошедшее сквозь КА, дает сложную картину кодированного изображения, поэтому требуется использование математической процедуры восстановления истинного изображения плазмы. Такая процедура была разработана [1] и представляет собой итерационный метод решения некорректно поставленной задачи – интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Было показано, что использование кодирующей апертуры не только многократно увеличивает светосилу системы регистрации, но и позволяет получить пространственное разрешение даже лучше, чем в случае камеры-обскуры. В частности, тонкая структура расположения ярких точек вдоль пинча, которую не удавалось разрешить при регистрации камерой-обскурой, была обнаружена таким методом.

Литература

- [1]. A. Iltis, Z. Hmissi, A. Kologrivov, A. Rupasov, E. Bolkhovitinov, V. Potapov, O. Ivanov, Recording of X-ray laser plasma radiation with new coded aperture imaging system // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 1049, 2023, 168121.
- [2]. S.R. Gottesman, E.J. Schneid. PnP—A New Class of Coded Aperture Arrays // IEEE Transactions on Nuclear Science, 1986, Vol. 33, No. 1, p. 745.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЯХ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПО КОМПЛЕКСАМ ТИГР-3Т И ОМЕГА-3Т

Дембовский Д.В., Лыков В.А., Соколов Л.В., Химич Д.В., Шушлебин А.Н.

*Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени ак. Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Челябинская область, Россия,
e-mail: dembovskiy.d.v@gmail.com*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.103

В экспериментах с однокаскадными мишенями, проведенными на установке NIF по схеме непрямого облучения, получен выход термоядерной энергии $E_{ТЯ} \approx 1,3$ МДж при энергии лазера $E_L \approx 1,9$ МДж [1]. Возможность термоядерного зажигания мишеней прямого облучения на мегаджоульных лазерных установках еще предстоит выяснить. Основными трудностями на этом пути являются развитие гидродинамических неустойчивостей [2] и вызванные ими процессы турбулентного перемешивания [3]. С использованием двумерных программных комплексов ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т [4] проведено изучение влияния этих процессов на сжатие и термоядерное горение одно- и двухкаскадных мишеней прямого облучения. Согласно проведенным расчетом однокаскадной мишени [5] длинноволновые возмущения с номерами гармоник $l \sim 4 - 12$ и амплитудой $A_l \sim 1\%$ в асимметрии поглощенной лазерной энергии не приводят к сильному снижению $E_{ТЯ}$ в этом случае. Для этой мишени чрезвычайно опасными оказываются коротковолновые возмущения: амплитуды $A_{60} \sim 0,1\%$ или возмущения, заданные в начальный момент времени на границе топлива и аблятора с амплитудой всего $\delta_{60} \sim 10^{-6}$ см, приводят к снижению $E_{ТЯ}$ в 2 – 3 раза. При сжатии двухкаскадных мишеней типа [6] происходит эффективное сглаживание возмущений в процессе их передачи от внешнего каскада на внутренний. В результате для возмущений в асимметрии поглощенной лазерной энергии опасными оказываются длинноволновые возмущения с $A_{12} \sim 1\%$, которые приводят к снижению $E_{ТЯ}$ в 2 – 3 раза. Для таких мишеней важно правильно описывать процессы развития неустойчивостей и перемешивания на границах внутреннего каскада, выполненного из материала с высоким Z . В докладе приведено сравнение результатов расчетов перемешивания с использованием полуэмпирической $k\varepsilon$ -модели турбулентного перемешивания [7], проведенных с целью изучения их влияния на сжатие и горение лазерных мишеней [5, 6].

Литература

- [1]. A.L. Kritcher, A.B. Zylstra, D.A. Callahan, et al. // Phys. Rev. E (2022) 106, 025201.
- [2]. R.S. Craxton, et al. // Phys. Plasmas (2015) 22, 110501.
- [3]. В.А. Лыков, В.А. Мурашкина, В.Е. Неуважаев, Л.И. Шибаршов, В.Г. Яковлев, Влияние турбулентного перемешивания на сжатие оболочечных мишеней // Письма в ЖЭТФ т. 30, в. 6, 1979, с. 339 – 342.
- [4]. А.Н. Шушлебин, Л.В. Соколов и др., «Двумерные расчеты сжатия и горения двухкаскадной мишени для ЛТС с непрямым воздействием по комплексам ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т» // Труды V Забабахинские научные чтения 21 – 25 сентября 1998, Часть 1 (на русском языке), изд. РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, РФ, 1999 г.
- [5]. Е.С. Бакуркина, Н.Г. Карлыханов, В.А. Лыков, Г.Н. Рыкованов, И.А. Химич, В.Е. Черняков // Ядерная физика и инжиниринг, 2019, т. 10, № 3, с. 271 – 284.
- [6]. S.X. Hu, R. Epstein, W. Theobald, et al. // Phys. Rev. E. (2019) 100, 063204.
- [7]. М.И. Авраменко, О $k\varepsilon$ -модели турбулентности, изд. РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, РФ, 2005 г.

АНЕЙТРОННЫЙ СИНТЕЗ ПРОТОН-БОР В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЕ ВАКУУМНОГО РАЗРЯДА

^{1,2}Куриленков Ю.К., ¹Огинов А.В., ¹Гуськов С.Ю., ²Самойлов И.С.,
¹Родионов А.А., ¹Болотов Я.К.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

²Объединённый институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия
e-mail: yu.kurilenkov@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.104

Ранее были представлены эксперименты по анейтронному синтезу протон-бор (pB) $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^8\text{Be}^* \rightarrow 3\alpha + 8.7 \text{ MeV}$ в плазме миниатюрного наносекундного вакуумного разряда (НВР) [1]. В цилиндрической геометрии НВР была реализована известная схема инерциального электростатического удержания (ИЭУ), но с обратной полярностью [1]. В этой схеме PiC моделирование в электромагнитном коде КАРАТ выявило образование в анодном пространстве НВР виртуального катода (ВК) и соответствующей ему потенциальной ямы (ПЯ) глубиной ≈ 100 кВ. Квазистационарная ПЯ размером в несколько миллиметров играет роль микроускорителя протонов и ионов бора до энергий в сотни кэВ, когда выход реакции pB в области энергий частиц вблизи вторичного pB резонанса (≈ 150 кэВ) становится уже заметным [1]. В процессе осцилляций ионов в ПЯ лобовые столкновения части протонов и ионов бора с энергиями $\sim 100 - 500$ кэВ приводят к реакции протон-бор и появлению α частиц [1]. В этой же схеме удержания и осцилляций дейтронов в ПЯ ранее исследовался ядерный DD синтез, где наблюдался как однократный, так и пульсирующий выход 2,45 МэВ нейтронов [2].

В данной работе обсуждаются выход α -частиц в дальнейших экспериментах по синтезу pB, а также особенности осцилляторного удержания в НВР как относительно нового типа инерциального удержания плазмы [1]. PiC моделирование процессов синтеза pB показало, что плазма в НВР, и особенно на оси разряда, находится в состоянии, близком к квазинейтральному, что заметно отличается от условий в известной схеме периодически осциллирующих плазменных сфер (ПОПС) [3, 4]. Эта схема была предложена для термоядерного синтеза в осциллирующей плазме, но, в частности, из-за ограничений на степень сжатия не получила дальнейшего развития [5]. В отличие от когерентных сжатий в оригинальной схеме ПОПС, по-видимому, мелкомасштабные колебания в НВР являются механизмом резонансного нагрева ионов. Тем не менее, благоприятный скейлинг мощности ядерного синтеза с уменьшением радиуса ВК [3, 4] сохраняется и для НВР, но при этом заметно отличается как по степени сжатия, так и по значениям параметра квазинейтральности [6]. Кроме того, в отличие от схемы ПОПС, где плазма считается равновесной, PiC моделирование показывает, что функции распределения протонов и ионов бора в НВР не являются максвелловскими. Таким образом, в исследуемой схеме ИЭУ с обратной полярностью на основе НВР, как DD синтез, так и анейтронный синтез pB имеют место в неравновесной плазме, остающейся “незажженной” на оси разряда [6].

Литература

- [1]. Yu.K. Kurilenkov, A.V. Oginov, V.P. Tarakanov et al. // Phys.Rev. E 103, 043208, 2021.
- [2]. Yu.K. Kurilenkov, V.P. Tarakanov, S.Yu. Gus'kov et al. // Contrib, Plasma Phys. 58, 952, 2018.
- [3] R.A. Nebel and D. C. Barnes // Fusion Technol. 34, 28, 1998.
- [4]. J. Park, R.A. Nebel, S. Stange and S.K. Murali // Phys. Plasmas. 12, 056315, 2005.
- [5]. E. Evstatiev, R. Nebel, L. Chacon et al. // Phys. Plasmas. 14, 042701, 2007.
- [6]. Yu.K. Kurilenkov, V.P. Tarakanov, A.A. Oginov et al. // Laser Part. Beams. 9563197, 2023.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕРАГЕРЦОВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ МОД ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ДВУХЧАСТОТНОГО P-ПОЛЯРИЗОВАННОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Алиев Ю.М., Фролов А.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия, frolova@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.105

Рассмотрено возбуждение терагерцовой (ТГц) поверхностной моды при воздействии двух волн p -поляризованного лазерного излучения с близкими частотами (ω_1, ω_2) на слой плазмы, когда вдоль его границы лазерные поля распространяются навстречу друг другу [1]. Решена граничная задача для двухчастотного p -поляризованного лазерного излучения, и найдено пространственное распределение лазерного поля в слое плазмы. Показано, что при падении лазерного излучения под углом полного отражения, когда выполнено условие $\sin^2 \alpha = \text{Re} \epsilon(\omega_0)$, происходит заметное усиление p -поляризованного лазерного поля в плазменном слое с околорезонансной концентрацией электронов, где $\epsilon(\omega_0)$ – диэлектрическая проницаемость плазмы, $\omega_0 = (\omega_1 + \omega_2)/2$, α – угол падения. Вычислен пондеромоторный потенциал на разностной частоте и показано, что наиболее сильное пондеромоторное воздействие происходит при падении лазерного излучения на слой околорезонансной плазмы под углом полного отражения, величина которого определяется частотой электронно-ионных соударений.

Рассмотрена задача о возбуждении в плазме ТГц полей под действием пондеромоторных сил лазерного излучения на разностной частоте, и показано, что их пространственно-временное распределение в плазменном слое определяется значениями пондеромоторного потенциала на границах слоя. Показано, что при падении лазерного излучения под углом полного отражения возбуждается только симметричная мода плазменного слоя. Установлено, что если разность частот лазерных полей совпадает с собственной частотой симметричной моды плазменного слоя, то происходит ее резонансное возбуждение и как следствие значительное увеличение электромагнитных полей ТГц моды. Вычислен вектор Пойнтинга ТГц моды плазменного слоя и исследована зависимость его абсолютного значения от угла падения лазерного излучения и толщины слоя. Показано, что плотность потока ТГц энергии максимальна при падении двухчастотного p -поляризованного лазерного излучения на слой околорезонансной плазмы с толщиной, сопоставимой с длиной волны лазера (рис. 1) в условиях резонанса, когда разность лазерных частот $\Delta\omega_0 = \omega_1 - \omega_2$ совпадает с собственной частотой моды плазменного слоя. Показано, что плотность потока энергии ТГц моды плазменного слоя в условиях ее резонансного возбуждения может значительно превышать интенсивность лазерного излучения.

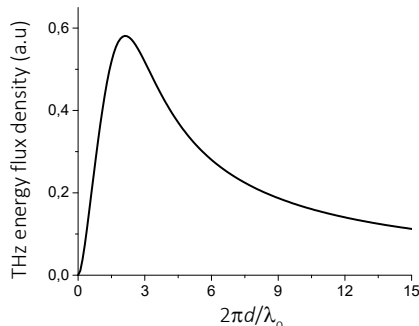


Рис. 1. Зависимость плотности потока энергии ТГц моды от толщины плазменного слоя d , λ_0 – длина волны лазерного излучения.

Литература

- [1]. Aliev Yu. M., Frolov A. A., Phys. Rev. E., 2022, V. 105, P. 045203.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ МИШЕНЕЙ С МАЛОПЛОТНЫМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ ПРИ ДВУХПУЧКОВОМ ЛАЗЕРНОМ ОБЛУЧЕНИИ

¹Бай А.А., ¹Гасилов В.А., ²Гуськов С.Ю., ²Яхин Р.А.

¹*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
e-mail: bay.aa@phystech.edu*

²*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, e-mail: guskovsy@lebedev.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.106

В последние несколько десятилетий активно изучается действие интенсивных лазерных импульсов на мишени, в конструкцию которых входит слой малоплотного вещества – поглотителя со средней плотностью от нескольких единиц до нескольких десятков мг/см³. Интерес к применению таких материалов вызван возможными применениями для создания ярких источников рентгеновского излучения, генерации энергичных электронов и ионов, использованием малоплотных поглотителей для выравнивания температурных полей в мишенях при нагреве несколькими лазерными пучками [1, 2].

В настоящей работе выполнено численное моделирование с применением адаптивных разностных сеток по методике, представленной в [3]. Изучался нагрев плоской составной мишени (поглотитель малой плотности на слое алюминия) двумя лазерными пучками. Предварительные расчеты с параметрами, соответствующими эксперименту [2], показывают, что разработанный численный код может быть использован для предсказательного моделирования динамики плазмы при нагреве мишени несколькими лазерными пучками. Численные эксперименты, относящиеся к основной задаче, выполнены для мишеней, в которых материал поглотителя имеет однородную либо стохастически возмущенную начальную плотность. Расчеты в трехмерной постановке задачи на адаптивных сетках дают, даже при использовании сравнительно простого критерия адаптации по величине градиентов плотности или температуры вещества, существенное (на один – два порядка величины) расширение линейки масштабов воспроизводимых деталей структуры плазменного течения, что позволяет получить уточненные количественные данные по распространению гидродинамических и тепловых волн в материале и гомогенизации лазерной плазмы.

Литература

- [1]. V.N. Derkach, S.V. Bondarenko, S.G. Garanin, A.I. Gromov, S. Yu. Gus'kov et al. Research on the development of a method of spatially temporary smoothing of a high-power laser beam // *Laser and Particle Beams*, 1999, v. 17, no. 4, pp. 603–611.
- [2]. O.S. Jones, G.E. Kemp, S.H. Langer et al. Experimental and calculational investigation of laser-heated additive manufactured foams // *Phys. Plasmas* 28, 022709 (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0032023>.
- [3]. А.А. Бай. Моделирование взаимодействия лазерного излучения с криогенной водородной пленкой на omtree-сетках блочного типа. // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН*. 2023. No. 47. 23 с. <https://doi.org/10.20948/prepr-2023-47>.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО УСКОРЕНИЯ ИОНОВ ИЗ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ СТРУКТУРИРОВАННОЙ СРЕДЫ

¹Гожев Д.А., ^{1,2}Бочкарев С.Г., ^{1,2}Лобок М.Г., ^{1,2}Брантов А.В., ^{1,2}Быченков В.Ю.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: bochkarevsg@lebedev.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, РОСАТОМ, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.107

Взаимодействие мощного ультракороткого лазерного излучения со структурированными мишенями представляет большой интерес как с точки зрения повышения средней энергии заряженных частиц, так и общего заряда лазерно-нагреваемых частиц по сравнению с традиционными плоскими твердотельными мишенями для возможного применения в ядерной физике, физике экстремального состояния вещества, радиографии. Одним из видов структурированных сред являются крупные суб-микро размерные кластерные и/или капельные мишени. Интерес к кластерной среде вызван тем, что с одной стороны, она прозрачна для лазерного излучения, а с другой стороны твердотельная плотность кластеров обеспечивает практически полное поглощение лазерной энергии и большое число лазерно-нагреваемых частиц. С особенностями кластерных мишеней связана и сложность моделирования больших объемов лазерно-кластерного взаимодействия, в том числе и для случая мощных ПВТ лазерных систем (например, проект XCELS [1]). Для выполнения моделирования требуется как высокое пространственное разрешение в связи с твердотельной плотностью кластеров, так и большая область моделирования.

Целью данной работы является оптимизация характеристик лазерно-плазменного взаимодействия на основе численного моделирования методом «частица-в-ячейке» для получения максимального числа энергетичных лазерно-ускоренных дейтронов и DD нейтронов из больших объемов кластерной среды. Проведено обобщение результатов, полученных в [2] для умеренно-релятивистской интенсивности лазера, облучающего среду из суб-микронных D₂O кластеров, на случай высоких интенсивностей (вплоть до 5×10^{19} Вт/см²). Предложенный алгоритм расчета основан на разделении области взаимодействия лазерного излучения с плазмой на последовательные зоны с уменьшающейся интенсивностью на длине истощения излучения. Подход адаптирован для произвольного значения амплитуды лазера из диапазона рассматриваемых интенсивностей, что позволяет существенно снизить количество расчетов, необходимых для восстановления полного спектра дейтронов по всей области лазерно-плазменного взаимодействия, по сравнению с прямым численным моделированием для полной области взаимодействия. Применение алгоритма показало, что выход нейтронов превосходит 107 шт. на Дж лазерной энергии.

Работа выполнена при поддержке Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019-2027 годы от 29.09.2021 № 2021-951-ФП5-3, соглашение №075-15-2021-1361 от 07.10.2021 г. с Минобрнауки России.

Литература

- [1]. Хазанов Е.А., Шайкин А.А., Костюков И.Ю. Квантовая электроника, 53 (2), 95 – 122 (2023).
- [2]. Гожев Д.А., Бочкарев С.Г., Лобок М.Г., Брантов А.В., Быченков В.Ю. Квантовая электроника, 53 (3), 217 – 223 (2023).

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ, СОЗДАННОЙ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧА

¹Грицук А.Н., ¹Александров В.В., ¹Браницкий А.В., ¹Грабовский Е.В.,
¹Митрофанов К.Н., ¹Олейник Г.М., ¹Фролов И.Н., ²Баско М.М., ¹Рыжаков В.В.

¹АО ГНЦ РФ “ТРИНИТИ”, г. Москва, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.108

Двумя основными инструментами для облучения мишеней интенсивными потоками рентгеновского излучения, которые объемно нагревают материалы до значительных температур для измерения их непрозрачности, являются мощные лазеры и Z-пинчи [1, 2]. Токовая импlosion в генераторах сверхвысокой электрической мощности позволяет получать высокотемпературную плотную плазму Z-пинчей, которая является источником мощного теплового излучения и широко применяется в экспериментах по физике высокой плотности энергии [3]. Эти эксперименты требуют создания макроскопических количеств вещества, которое однородно нагрето до экстремальных условий. На установке сверхвысокой электрической мощности Ангара-5-1 поток рентгеновского излучения с энергией до 150 кДж позволяет этого достичь. Была выполнена серия работ по исследованию спектрального коэффициента пропускания плазмы разных веществ в диапазоне экстремального вакуумного ультрафиолета. При выполнении этих работ была разработана оригинальная схема одновременного облучения мощным потоком рентгеновских фотонов Z-пинча двух образцов тонкой мишени из исследуемого вещества, которая обеспечивает равномерное пространственное распределение энергии облучения при плотности на мишени до 10 кДж/см². Одновременно в одном выстреле установки на одном спектрографе были получены изображения спектра рентгеновской эмиссии вольфрамового Z-пинча, спектра прошедшего плазму мишени излучения и собственного излучения плазмы мишени в кадровом режиме со временем экспозиции кадра 1,5 нс. Разработанная схема позволяет получить экспериментальные данные о скорости движения плазмы на облучаемой и тыльной сторонах мишени, которая достигала 100 км/с. Были исследованы мишени из тонких фольг Al и слоев Ni, Sn, In, Au, Bi и Gd на майларовой пленке [4 – 8]. Наблюдалось индуцированное облучением многократное увеличение коэффициента пропускания мишени в ВУФ-диапазоне по сравнению с пропусканием мишени в твердом состоянии. С помощью двумерного радиационного газодинамического кода RALEF2D было выполнено численное моделирование нагрева и расширения мишени, получены данные о спектральном коэффициенте пропускания плазмы мишени и о спектре ее собственного излучения. Проведено сравнение выполненных расчетов с экспериментом.

Литература

- [1]. Remington B.A., Drake R.P., Ryutov D.D. // Rev. Mod. Phys. 87, 755 (2006).
- [2]. Фортов В.Е. // УФН, 179, 653 (2009).
- [3]. Sinars D.B. et al. // Phys. Plasmas 27, 070501 (2020).
- [4]. Грабовский Е.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 5. С. 394 – 401.
- [5]. Grabovski E.V. et al. // Matter and Radiation at Extremes. 2017. V. 2. № 3. P. 129–138.
- [6]. Митрофанов К.Н. и др. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 4. С. 367 – 382.
- [7]. Александров В.В. и др. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 7. С. 613 – 650.
- [8]. Александров В.В. и др. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 9. С. 847 – 870.

АНАЛИЗ ВОПРОСОВ, СВЯЗАННЫХ С МАЛОПЛОТНЫМИ СЛОЯМИ ИЗ НАНОЧАСТИЦ МЕТАЛЛА, В ТОМ ЧИСЛЕ С ХИТОЗАНОМ, ДЛЯ МИШЕНЕЙ ИТС

Громов А.И., Акунец А.А., Борисенко Н.Г., Кувшинов И.Р., Пастухов А.В.,
Перваков К.С.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: gromovai@lebedev.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.109

Анализируется ряд вопросов и предложений по разработке мишеней для целей прямого и непрямого лазерного ИТС и методам их изготовления и мониторинга. Интерес к таким работам определяется важностью подобных конструкций мишеней для современных лазерных установок. Использование мишеней с дополнительными слоями из наночастиц металла позволяет решить существенное количество задач в установках ИТС: таких как увеличение конверсии лазерного излучения в рентгеновское, повышение рентгеновского выхода и устойчивости сжатия, а также в целях диагностики. Данные слои используются и в виде конструкционных слоёв в мишенях [1, 2]. Проблема изготовления и измерений малоплотных нанометаллических слоёв с плотностью в несколько раз и даже на порядки меньше плотности сплошных материалов того же состава стала необходимой. Сюда же относятся и термическое упрочнение слоёв из наночастиц металла для более удобной транспортировки и для работы в камере взаимодействия с лазерным излучением.

Хитозан, являющийся природным материалом, использовался в виде полимерной матрицы при получении низкоплотных композитных материалов с включением наночастиц Ag, содержание металла 8 – 20 массовых %%. Наночастицы Ag получались путём химического осаждения и вводились в раствор хитозана в виде дисперсии. При этом раствор для получения композитного гидрогеля сшивали диальдегидом, удалось решить проблемы связанные с сублимационным высушиванием криогидрогелей сшитого хитозана [3].

Для правильной интерпретации результатов экспериментов разработан комплексный прецизионный мониторинг подобных слоёв, поскольку точность изготовления и контроля таких слоёв в мишенях прямо влияет на конечные результаты экспериментов ИТС. Для контроля тонких слоёв с дисперсиями металла применён метод рентгеновской томографии образцов [4]. Калибровочные методы контроля плотности и толщины, а также флуктуации плотности мишеней, развиты с применением методов электронной микроскопии, оптического обычного и лазерного излучения, микрорадиографии в широком диапазоне рентгеновского излучения.

Литература

- [1]. A.S. Orechov, A.A. Akunets, L.A. Borisenko, N.G. Borisenko, A.I. Gromov, Yu.A. Merkuliev, V.G. Pimenov, E.E. Sheveleva, V.G. Vasiliev. Modern trends in low-density materials for fusion // Journal of physics: Conference Series, 2016, 688 (1), 012080.
- [2]. Chanprint Kaur, S. Chaurasia, N.G. Borisenko, A.I. Gromov, A.A. Akunets, G.V. Sklizkov, G.A. Vergunova and S.Y. Gus'kov. Demonstration of gold plasma as bright x-ray source and slow ion emitters // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2019, V. 61, No. 8, 084001.
- [3]. Y.A. Azarova, A.V. Pestov, S.Y. Bratskaya. Application of chitosan and its derivatives for solid-phase extraction of metal and metalloid ions // Cellulose, 2016, 23 (4), p. 2273.
- [4]. Н.Г. Борисенко, И.А. Артюков, А.А. Ерискин, А.А. Акунец, А.И. Громов, И.Р. Кувшинов, А.В. Пастухов. Об опыте микротомографии наноструктурированных объектов. 7с. // Сборник докладов VI Всероссийской научной конференции “Практическая томография” Москва. 26 – 27 Сентября 2023.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНОГО СЖАТИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК В ПРОБЛЕМЕ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА.

Лебо И.Г., Федянин А.О.

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия,
e-mail: lebo@mirea.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.110

Для получения полезной энергии предполагается использовать гибридный ядерно-термоядерный реактор с лазером (драйвером) для управления процессом и инициирования реакций синтеза [1]. В таком реакторе достаточно достижения «параметра зажигания» $G = E_f/E_l > 3$, E_f – выделившаяся термоядерная энергия, E_l – поглощенная энергия лазера [2].

Расчеты были выполнены с помощью двумерной программы “Atlant_Sp” [3]. При фиксированной энергии и временной форме импульса варьировались параметры мишени (R_1 , R_2). Временная форма и энергия лазерного импульса были фиксированы, $t_1 = 8$, $t_2 = 10$, $t_3 = 11$ нс, $E_{\text{лаз}} = 1$ МДж, но варьировались длины волн излучения 1) $\lambda = 0,351$ мкм – третья гармоника стеклянного Nd лазера, и 2) $\lambda = 0,25$ мкм – первая гармоника газового эксимерного KrF лазера.

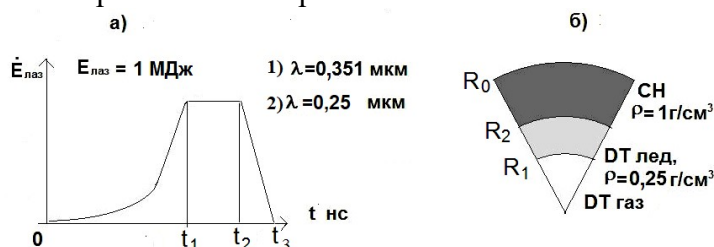


Рис. 1 Временная форма лазерного импульса (а). Конструкция криогенной оболочечной мишени (б).

Оболочка из полимера СН имела начальный радиус R_0 и толщину ($R_0 - R_2$), с начальной плотностью 1 г/см^3 , и слоем DT-льда ($R_2 - R_1$) с плотностью $0,25 \text{ г/см}^3$. Внутри – DT-пар с начальной плотностью $0,07 \text{ мг/см}^3$. Параметры мишени для $\lambda = 0,351$ мкм взяты из [4] и подобраны так, чтобы момент коллапса мишени приходился на интервал времени $[t_2, t_3]$. $R_0 = 0,2$, $R_2 = 0,1965$ см.

В численных расчетах сравнивался выход термоядерной энергии в мишенях описанной выше конструкции в двух случаях: 1) $\lambda = 0,351$ мкм и 2) $\lambda = 0,25$ мкм.

В случае 1) $G = 1,5$ и $t_c = 100$ нс (время коллапса мишени), а в случае 2) $G \approx 2$. Имеется возможность увеличить G за счет усложнения конструкции мишени и увеличения аспектного отношения оболочки.

Работа выполнена в рамках программы Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Газодинамика и физика взрыва». Тема «Гидродинамическая неустойчивость и турбулентность».

Литература

- [1]. Басов Н.Г., Субботин В.И., Феокистов Л.П. // Вестник Российской академии наук, 1993, 63 (10).
- [2]. Лебо И.Г. // Российский технологический журнал. 2023, 11 (3).
- [3]. Кузенов В.В., Лебо А.И., Лебо И.Г., Рыжков С.В. Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных импульсов на конденсированные и газовые среды. М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015.
- [4]. Долголева Г.В., Лебо А.И., Лебо И.Г. // Математическое моделирование. 2016. 28 (1), 23.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО И ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ СПЛОШНЫХ МИШЕНЕЙ ИЗ МЕДИ НА УСТАНОВКЕ «КАНАЛ-2»

¹Вергунова Г.А., ¹Гуськов С.Ю., ¹Кологривов А.А., ¹Пузырёв В.Н., ¹Саакян А.Т.,
¹Стародуб А.Н., ¹Безверхняя Д.М., ²Вичев И.Ю., ²Грушин А.С., ²Ким Д.А.,
²Соломянная А.Д.

¹Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.111

Исследования проводились на установке «Канал-2» [1], основные параметры которой имели следующие значения: длина волны – 1,06 мкм; длительность импульса – 2,5 нс; ширина спектра – 26 Å; число поперечных мод в резонаторе ≈ 1000 ; расходимость излучения – $1,4 \times 10^{-3}$ рад; диаметр пучка на выходе – 60 мм. Энергия излучения лазерного импульса варьировалась в диапазоне 12 – 30 Дж, и при диаметре пятна фокусировки ≈ 170 мкм плотность мощности на мишени составляла $2 \times 10^{13} - 4.2 \times 10^{13}$ Вт/см². Регистрация спектров излучения образующейся плазмы проводилась в диапазоне длин волн от 25 до 450 Å в интегральном по времени режиме с использованием спектрографа скользящего падения GIS-S.

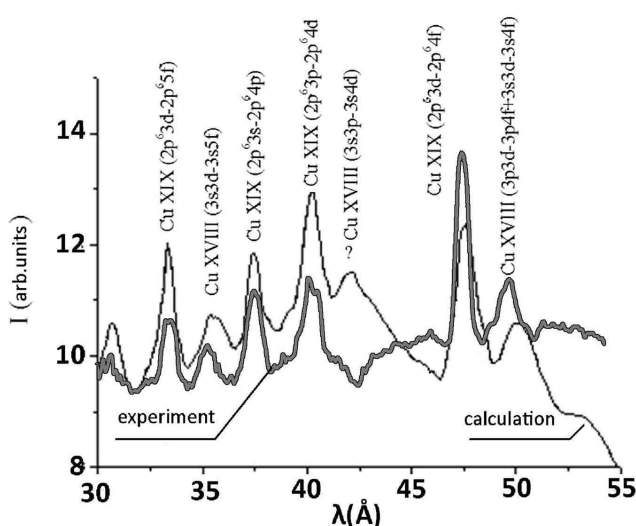


Рис. 1. Экспериментальный и расчетный спектры.

базы данных THERMOS [3].

На рис. 1 интегральный по времени расчетный спектр сравнивается с экспериментальным, полученным на установке «Канал-2» при облучении плоской медной мишени в диапазоне 30–55 Å. Видно, что положение спектральных линий одинаковое.

Литература

- [1]. Fedotov S.I., Feoktistov L.P., Osipov M.V. and Starodub A.N. // J. Rus. Las. Res., 2004, 25, 79 – 92.
- [2]. Vergunova G.A. and Rozanov V.B. // Laser Part. Beams, 1999, 17, 579.
- [3]. Ким Д.А., Вичев И.Ю., Соломянная А.Д., Грушин А.С., Препринт ИПМ 58, Москва, 2020.

ОБ УСКОРЕНИИ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО НОСИТЕЛЯ КРИОГЕННОЙ ТОПЛИВНОЙ МИШЕНИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ СОЛЕНОИДОВ С ТОКОМ

Корешева Е.Р., Александрова И.В., Агапов М.Н., Акунец А.А.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: koreshevaer@lebedev.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.112

В Физическом институте им. П.Н.Лебедева (ФИАН) интенсивно развиваются инновационные технологии по созданию ВТСП-МАГЛЕВ ускорителя, предназначенного для доставки криогенной топливной мишени с помощью левитирующего ВТСП-носителя в камеру ИТС для взаимодействия с лазерным излучением [1, 2].

В основе подхода ФИАН лежит явление квантовой левитации ВТСП в градиентном магнитном поле. Ускорение обеспечивается последовательностью соленоидов с током, а левитация ВТСП-носителя происходит за счет использования магнитного рельса, вдоль которого размещены соленоиды.

В работе создан прототип элементарного блока ускорения ВТСП-носителя и исследованы процессы управления его движением [3]. С этой целью разработана и протестирована система оперативного контроля и управления работой прототипа. Продемонстрировано ускорение ВТСП-носителя до 1 м/с на длине разгона $L_a = 20$ см при использовании одной пары согласованно работающих соленоидов.

Полученные результаты имеют большое практическое значение в области разработки систем бесконтактной доставки КТМ при построении линейного магнитного трека за счет соединения одного элементарного блока ускорения со многими другими для достижения требуемой скорости инжекции мишени от 20 до 200 м/с и более.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФИАН, а также в рамках проекта МАГАТЭ №24154.

Литература

- [1]. Александрова И.В., Акунец А.А., Гаврилкин С.Ю. и др. Кольцевая ВТСП-МАГЛЕВ система для бесконтактного ускорения и инжекции криогенных топливных мишеней в лазерный фокус установки ЛТС // Квантовая Электроника, 53 (1), 34 – 42, 2023.
- [2]. Александрова И.В., Акунец А.А., Корешева Е.Р., Кошелев Е.Л. Способ и система доставки криогенной топливной мишени для управляемого инерциального термоядерного синтеза. Патент РФ №2769777 от 06.04.2022, Бюллетень № 10.
- [3]. Александрова И.В., Агапов М.Н., Акунец А.А., Корешева Е.Р. Об ускорении сверхпроводящего носителя криогенной топливной мишени последовательностью соленоидов с током // Краткие Сообщения по Физике ФИАН, 50 (8), 16 – 23, 2023.

РЕФРАКЦИОННОЕ КАНАЛИРОВАНИЕ ВОЛНЫ ИОНИЗАЦИИ, ОБРАЗОВАННОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА С ПЛАЗМОЙ ДОКРИТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ

¹Гуськов С.Ю., ¹Демченко Н.Н., ^{1,2}Кучугов П.А.

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,*

²*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.113

В работе рассматривается классическая задача о распространении лазерно-индуцированной волны ионизации в плазме с плотностью меньшей критической плотности [1] для случая конечного радиуса лазерного пучка. В этом случае следует ожидать, что характер распространения волны ионизации будет в значительной мере усложнён из-за влияния ряда эффектов и, в первую очередь, эффектов, связанных с распространением и поглощением лазерного излучения. На основании расчётно-теоретических исследований обнаружены эффект каналирования распространения волны ионизации в центральной приосевой области плазмы и эффект рефракционной самофокусировки лазерного пучка за счёт направления градиента плотности, обусловленного гидродинамическим движением плазмы. Показано, что продольная скорость волны ионизации в области каналирования превышает скорость волны в периферийной области плазмы, расположенной на расстояниях сравнимых с радиусом лазерного пучка, за счёт нагрева плазмы в приосевой области рефрагирующим излучением пучка.

Полученные результаты имеют практическое значение для задач, связанных с исследованиями распространения лазерного излучения в газовых средах, а также с использованием малоплотных сред в современных схемах облучения лазерных термоядерных мишеней.

Литература

[1]. Denavit J. and Phillion D.W. // Phys. Plasmas, 1, 6, 1971, 1994.

ИМПЛОЗИЯ ВЛОЖЕННЫХ СБОРОК СМЕШАННОГО СОСТАВА НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1

Митрофанов К.Н., Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н.,
Олейник Г.М., Рыжаков В.В.

*Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, округ
Троицк, Россия, e-mail: mitrofan@triniti.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.114

Представлены результаты экспериментов по исследованию генерации мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения (МРИ, $h\nu > 100$ эВ) при сжатии плазмы двухкаскадных вложенныхборок смешанного состава с различным отношением радиусов каскадов, проведенных на мощной электрофизической установке Ангара-5-1 при уровне разрядного тока до 3,5 МА. Внешний каскад состоял из волокон вещества с малым атомным номером (пластик), внутренний каскад – из вещества с высоким атомным номером (вольфрам). Ранее было показано, что в случае вложенныхборок данной конструкции возможно получить существенное повышение пиковой мощности МРИ по сравнению с одиночными W-борокми с теми же параметрами, что и у W-борокми во внутреннем каскаде [1 – 3]. Путем оптимизации линейной массы внешнего каскада и его радиуса получены мощные импульсы МРИ.

Литература

- [1]. Митрофанов К.Н., Александров В.В., Браницкий А.В. и др. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 10. С. 887 – 920.
- [2]. Mitrofanov K.N., Aleksandrov V.V., Branitski A.V. et. al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2022. V. 64., N. 4. P. 045007-1-045007-24.
- [3]. Митрофанов К.Н., Грицук А.Н., Александров В.В. и др. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 7. С. 647 – 670.

БУДУЩИЙ УСПЕХ В УТС - ЗА КОЛЛАЙДЕРАМИ КОМПАКТНЫХ ТОРОВ (FRC) (ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ И КОМПАНИЙ)

Мозговой А., Болотов Я., Ерискин А., Никулин В., Огинов А., Шпаков К.,
Тиликин И., Родионов А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.115

Осесимметричная конфигурация замкнутого витка с током в плазме получила название **компактный тор** или **FRC -- Field Reversed Configuration**. Торы можно ускорять и сжимать магнитными полями. В настоящее время в Национальной Лаборатории США в Лос Аламосе создается новая экспериментальная платформа для исследований **FRC**. Известны частные американские компании - **Tri Alpha Energy** (освоено более \$ 1,2 млрд., из них 50 млн. от Роснано) и **Helion Energy** - последняя даже анонсировала в 2024 году выдачу энергии в сеть со своего нового термоядерного коллайдера **Polaris** (инвестировано в 2021 г. \$ 570 млн., с обязательством еще \$ 1,2 млрд, главный инвестор - **Sam Altman**, компаньон **Elon Musk** по Open AI, заключен контракт с **Майкрософт** на поставку первого реактора в 2028 г).

Крупнейшая сталелитейная компания Америки **Nucor** также заключила контракт с **Helion Energy** на \$ 35 млн. Частными компаниями в мире, занятыми термоядерными исследованиями, уже привлечено более \$ 6 млрд. Китай, Япония, Англия, Германия также ведут исследования в этой области. Российская программа Росатома РТТН "Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации" (33, 375 млрд. руб.) предусматривает строительство второго плазменного ускорителя в ТРИНИТИ для создания коллайдера двух плазмоидов.

Работы проводятся и в Физическом институте им. П.Н. Лебедева совместно с ООО «Знаю как». Был предложен и запатентован новый способ формирования компактных торов в **индуктивных накопителях** энергии [1]. Данный метод показал высокую эффективность преобразования магнитной энергии накопителя – до 70 процентов запасенной энергии передается в плазмоид, ток достигал несколько десятков килоампер при диаметре плазмоида 30 см, а его скорость составила 40 км/сек. Два плазмоида, ускоренных навстречу друг друга, дали в месте столкновения температуру плазмы более 1 кэВ и длительность мягкого рентгеновского излучения около одной микросекунды, что на **три порядка** превышает длительность такого излучения на установках с Z, X-пинчем и плазменным фокусом [2]. Это показывает реальную возможность осуществления инерциального термоядерного синтеза.

Многokратное ускорение тороидов – это и новый вид электроракетных двигателей для космоса.

Предлагаем создать коллаборацию для осуществления исследований по этой теме с привлечением ведущих научных организаций России и дружественных стран, а также инвестиционных компаний для подачи совместной заявки в ВЭБ РФ на 3 млрд. р. и на срок до 30 лет, и в Фонд Прямых Инвестиций.

Быстрая модернизация установок может быть реализована во ВНИИЭФ, НИЦ «Курчатовский институт», новосибирском ИЯФ СО РАН, ГНЦ ТРИНИТИ, НИИП, ФИАН, томском ИСЭ СО РАН, где уже есть экспериментальные установки с квази-мегаджоульной энергетикой.

Литература

- [1]. Патент РФ № RU 2523427. Способ формирования компактного плазмоида.
- [2]. <https://efre2022.hcei.tsc.ru/publication/proceedings.html> (S2-O-043801- FRC collider).

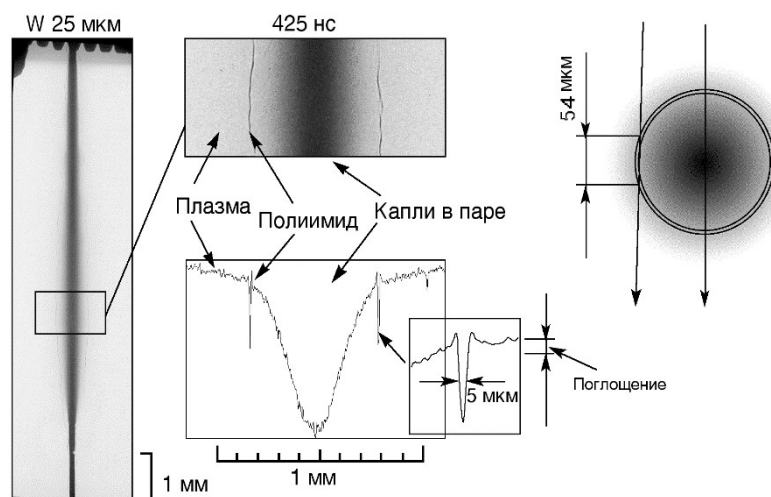
X-ПИНЧ КАК ИСТОЧНИК ПРОСТРАНСТВЕННО-КОГЕРЕНТНОГО МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Пикуз С.А., Савинов С.Ю., Тиликин И.Н., Шелковенко Т.А.

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.116

В рамках работ по УТС в лаборатории Проблем новых ускорителей ФИАН была предложена оригинальная схема Z-пинча, позволяющая эффективно передавать энергию электрического накопителя в плазму в заданной точке пространства и получать вещество с экстремальными параметрами в заданный момент времени [1, 2]. Первоначально конфигурация представляла собой два тонких проводника, перекрещенных в виде буквы X в вакуумной диоде, на который подавался высоковольтный импульс от низкоимпедансного сильноточного генератора. Из результатов экспериментов с X-пинчем стало ясно, что размер области плазмы, излучающей мягкое рентгеновское излучение с энергией фотонов больше 1 кэВ может достигать очень малых размеров. Было показано, что так называемая горячая точка X-пинча может иметь размеры микронного диапазона [2], что определило к нему интерес как к источнику излучения для проекционной рентгенографии быстропротекающих явлений в веществе с высокой плотностью энергии [3]. В частности, были проведены уникальные исследования наносекундного взрыва проволочек и проволочных сборок, которые позволили получить достоверную информацию о процессах во время и после взрыва, недоступную ранее. В ряде случаев контраст изображений в зоне резких перепадов плотности был значительно выше ожидаемого в предположении геометрической оптики. Это свидетельствует о том, что в формировании изображения начинают играть факторы, связанные с когерентными свойствами зондирующего излучения. На рисунке, в качестве примера, приведено изображение взорванной 25 мкм вольфрамовой проволочки, которая в исходном состоянии была покрыта тонким слоем (5 мкм) полиимидной изоляции. Расчет поглощения излучения в веществе расширенной оболочки дает изменение плотности почернения фотопленки существенно меньшее, чем наблюдается в эксперименте, то есть имеет место так называемый фазовый контраст, связанный с интерференцией зондирующего излучения.



Работа поддержана грантом РФФ 19-79-30086-Р.

Литература

- [1]. Пикуз С.А., Шелковенко Т.А., Хаммер Д.А. // Физика плазмы, 2015, 41, 319.
- [2]. Пикуз С.А., Шелковенко Т.А., Хаммер Д.А. // Физика плазмы, 2015, 41, 483.
- [3]. Шелковенко Т.А., Пикуз С.А., Хаммер Д.А. // Физика плазмы, 2016, 42, 234.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

Лебо И.Г., Пономарев И.В.

*МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия,
e-mail: lebo@mirea.ru, wingof17@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.117

В исследованиях по лазерному термоядерному синтезу (например, [1, 2]), и изучению астрофизических явлений важная роль отводится численному моделированию сверхзвуковых вихревых течений и развитию гидродинамических неустойчивостей (в частности, неустойчивости Рихтмайера-Мешкова [3, 4]). Гиперзвуковые скорости течения газа (с числами Маха более 10) могут быть достигнуты в лабораторных условиях, в частности, с помощью лазерной ударной трубы (ЛУТ) [5].

С помощью программы “NUTCY” [6] численно решаются двумерные уравнения газовой динамики в эйлеровых цилиндрических координатах (r, z, t , t – время). В расчетах задавалось число Маха (Mx), а параметры за фронтом ударной волны (УВ) рассчитывались с помощью соотношений Гюгонио [7].

Представлены результаты расчетов двух задач: 1) взаимодействие фронта ударной волны (УВ) с шероховатостями боковой стенки ЛУТ; 2) взаимодействие фронта УВ с пленкой внутри канала.

В работе показаны результаты расчета взаимодействия фронта УВ с шероховатостями. Цилиндрическая область заполнена аргоном (Ar) с начальным давлением 0,5 атм. УВ движется сверху вниз и имеет $Mx = 10$. К моменту $t = 1600$ нс УВ достигла дна и отразилась. На правой боковой стенке заданы «шероховатости» в виде 3-х «выступов» толщиной 25 мкм и длиной 250 мкм.

Работа выполнена в рамках программы Национального центра физики и математики (НЦФМ) «Газодинамика и физика взрыва». Тема «Гидродинамическая неустойчивость и турбулентность».

Литература

- [1]. Басов Н.Г., Лебо И.Г., Розанов В.Б. Физика лазерного термоядерного синтеза. М: – Знание, 1988.
- [2]. Lindl J. // Phys. Plasmas, 1995, V. 2, 3933.
- [3]. Richtmyer R.D. Taylor instability in a shock acceleration of compressible fluids // Comm. Pure and Appl. Math.,(1960), V. 13, N 2, 297.
- [4]. Мешков Е.Е. // Известия АН СССР. Сер. Механика жидкости и газа. 1969, т. 5, 151.
- [5]. Зворыкин В.Д., Лебо И.Г. // Квантовая электроника. 2000, т. 30, 540.
- [6]. Лебо И.Г., Тишкин В.Ф. Исследование гидродинамической неустойчивости в задачах лазерного термоядерного синтеза. М: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
- [7]. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М: Наука, ФИЗМАТЛИТ, 1966.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ВЗРЫВ ТОНКИХ ПРОВОДНИКОВ (СМЕНА ПАРАДИГМЫ)

Романова В.М.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: romanovavm@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.118

Исследование электрического взрыва тонких металлических проволок (ЭВП) в вакууме и в различных средах имеет весьма длительную историю и стимулируется как большим количеством практических приложений, так и фундаментальным интересом к веществу с экстремальными теплофизическими параметрами. Возможность получения опытных данных далеко за пределами «нормальных условий» совершенно бесценна при построении соответствующих уравнений состояния. Использование всё более мощных диагностических средств – лазерного зондирования, в том числе на разных длинах волн, рентгенографии высокого разрешения, высокоскоростного фотографирования и т.д. позволило установить ряд важнейших закономерностей и особенностей ЭВП, таких как образование *структуры керн–корона, трубчатое* или *пенообразное* (в зависимости от энерговклада) строение керна, а также наличие в продуктах взрыва *заметного количества рассеивающих микрочастиц* [1 – 3].

Изучаемые процессы чрезвычайно сложны, и до построения полноценной теории, которая бы адекватно описывала фазовые преобразования металла при его нагреве электрическим током большой мощности, всё ещё очень далеко. При этом многие ранние концепции прочно укоренились среди исследователей и, несмотря на свою недоказанность, а иногда и на прямые противоречия с результатами современных экспериментов, продолжают некритично использоваться для описания и интерпретации опытных данных. Так, идея о *полном испарении* материала проводника, якобы достижимом при достаточно большом энерговкладе, очевидным образом опровергается данными *по рассеянию зондирующего лазерного излучения* в продуктах взрыва. Вообще сама возможность оптической тенеграфии взорванной проволоки (а это одна из основных диагностик при ЭВП) исключает нахождение расширяющегося керна в газовом состоянии. Представление *об однородном распределении* параметров вещества по сечению керна тонкой проволоки, лежащее в основе практически всех МГД-симуляций процесса взрыва, не согласуется с данными радиографии о *трубчатом* строении керна. Требуется пересмотра и концепт *страт* (областей повышенной плотности) как *плоских дисков* — новые данные свидетельствуют, скорее, об их *развитии на поверхности* керна и кольцевой (торообразной) форме.

Относительно поздние теории «фазового» и «кавитационного» взрывов, наоборот, вполне неплохо согласуются не только с экспериментом, но и с результатами соответствующих молекулярно-динамических расчётов. Однако высказанные там идеи, по-видимому, слишком непривычны и пока не сумели заменить у исследователей ЭВП традиционные, сильно упрощённые представления о фазовой трансформации вещества как о простой последовательности процессов *нагрев–плавление–испарение*, протекающих во всём объёме проводника.

Работа частично поддержана грантом РФФ No. 19-79-30086-Р.

Литература

- [1]. В.М. Романова, Г.В. Иваненков, А.Р. Мингалеев и др. // Физика плазмы, т. 41 (8), с. 671 (2015).
- [2]. S.A. Pikuz, T.A. Shelkovenko, C.L. Hoyt, et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 43, 2520 (2015).
- [3]. В.М. Романова, И.Н. Тиликин, А.Р. Мингалеев и др. // Физика плазмы, 48, № 2 (2022).

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ X-ПИНЧЕЙ НА МАЛОГАБАРИТНЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ ГЕНЕРАТОРАХ.

Шелковенко Т.А., Тиликин И.Н., Мингалеев А.Р., Романова В.М., Пикуз С.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.119

X-пинчи различной конфигурации за многие годы зарекомендовали себя лучшими точечными источниками МРИ для проекционной рентгенографии. Проекционная рентгенография является весьма полезным инструментом для исследования взрываемых объектов таких как: X-пинчи, проволочки, лайнеры, фольги, то есть там, где невозможен контакт источника излучения и объекта [1]. В последнее десятилетие в разных странах более или менее успешно создаются и испытываются малогабаритные сильноточные импульсные генераторы для работы с X-пинчами и другими нагрузками. Для того, чтобы генератор можно было применять для питания X-пинчей, он должен обеспечивать значение производной тока выше 1 кА/нс на нагрузку и ток не менее 50 кА [1, 2]. В таких условиях в X-пинчах возможно образование ярких и горячих точек [2]. Имеющийся в нашем распоряжении генератор КИНГ (200 кА, 200 нс, 45 кВ) представляет собой сборку из четырех быстрых конденсаторов, совмещенных с газовыми разрядниками и пограничные параметры для питания X-пинчей [3]. Для уменьшения общей индуктивности цепи разряда обратный токопровод генератора был выполнен в виде сплошного стакана с небольшими отверстиями для доступа диагностик и выхода излучения. Для некоторых экспериментов, в частности для исследований генерации УФ излучения при взрыве тонких фольг, такая конструкция оказалась крайне неудобной: установка фольг была затруднена, а поле зрения ограничено. Поэтому сплошной токопровод был заменен отдельными стержневыми токопроводами, которые существенно облегчили доступ к диоду, в котором устанавливалась нагрузка, и позволили менять катод-анодный промежуток в широких пределах. Это изменение привело к увеличению индуктивности и, соответственно, к увеличению длительности фронта от 200 нс до 230 – 260 нс и уменьшению производной тока.

В новых условиях были произведены эксперименты как со стандартными 4-х проволочными, так и гибридными X-пинчами (90 выстрелов) с Al, Cu и Mo проволочками, в которых было показано не ухудшение, а улучшение работы X-пинчей и проанализирована природа источников излучения. Полученные результаты говорят о том, что в большинстве экспериментов на конденсаторных установках образуется именно яркая точка и её параметры в большинстве случаев вполне достаточны для получения качественных изображений методом проекционной рентгенографии. При этом скорость нарастания тока в пределах 0,6 – 0,9 кА/нс является удовлетворительной для практических применений. Для получения экстремальных параметров источника излучения использование генераторов с формирующими линиями и скоростями нарастания тока больше 1 кА/нс является более предпочтительным. В данных экспериментах горячая точка с размерами меньше 3 мкм образовывалась только в каждом восьмом X-пинче, а одна или две ярких точки в 80% X-пинчей.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-79-30086-Р.

Литература

- [1]. Шелковенко Т.А., Пикуз С.А., Хаммер Д.А. // Физика плазмы, 2016, 42, 234.
- [2]. Пикуз С.А., Шелковенко Т.А., Хаммер Д.А. // Физика плазмы, 2015, 41, 319.
- [3]. Месяц Г.А., Шелковенко Т.А., Иваненков Г.В. и др. // ЖЭТФ, 2010, 138, 411.

ШИРОКОДИАПАЗОННАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ДИАГНОСТИКА РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

¹Сивко А.И., ^{1,2}Иванов К.А., ²Кологривов А.А., ^{1,3}Цымбалов И.Н.,
²Болховитинов Е.А., ²Рупасов А.А., ¹Волков Р.В., ^{1,2}Савельев-Трофимов А.Б.

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

³Институт ядерных исследований РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.120

Точное измерение и оценка ключевых свойств плазмы (механизмов поглощения энергии, процессов теплопередачи, расширения плазмы и других явлений) имеет большое значение при изучении взаимодействия лазерного импульса и плазмы. В данной работе экспериментально изучены спектры рентгеновской плазмы в диапазоне от сотен эВ до сотен кэВ с использованием широкодиапазонной диагностики в зависимости от параметров лазерного излучения (интенсивность, контрастность и т.д.).

В наших экспериментах импульс длительностью 50 фс от системы TiSa фокусируется до интенсивности $10^{16} - 10^{18}$ Вт/см² на поверхность молибденовой мишени. Контраст импульса по пикосекундному пьедесталу варьировался и составлял 5×10^7 и 10^9 . Данный параметр определяет длину преплазменного слоя к моменту прихода пика импульса и определяет главным образом поглощение излучения, а также эффективность генерации горячих электронов.

Исследуя температуру горячих электронов при умеренном контрасте (5×10^7) наиболее энергичной компоненты плазмы, было обнаружено, что с ростом интенсивности лазера от $\sim 2 \times 10^{16}$ до 3×10^{18} Вт/см² измеряемое значение увеличивается с ~ 30 кэВ до более чем 200 кэВ и может быть связано с резонансным поглощением. Однако при большей интенсивности наблюдается переход к пондеромоторному ускорению. Тем не менее длинная преплазма препятствует эффективной передаче энергии к электронам в плотной области. Этот эффект оказывается подавлен для импульса с высоким контрастом (10^9). Так температура горячих электронов значительно возрастает в области релятивистской интенсивности воздействия и достигает 300 кэВ.

При этом в области низких энергий (тепловая компонента электронного спектра) зависимость от интенсивности не столь значительная. Температуры находятся на уровне сотни эВ и, по всей видимости, определяется обратнотормозным поглощением и нагревом обратными токами. Также отмечено возрастание температуры при более высоком контрасте, что может быть связано с более плотной плазмой вблизи границы мишени.

Помимо электронных компонент плазмы экспериментально исследована эффективность генерации K_α излучения. Показана связь потока квантов с температурой горячих электронов. Максимальный поток линейчатых квантов достигает 4×10^9 фотонов за выстрел.

Данная работа была выполнена при поддержке гранта РФФИ №22-79-10087 с использованием оборудования, приобретенного в рамках национального проекта “Наука и университеты”.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННЫХ СПЕКТРОГРАФОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Скобляков А.В., Колесников Д.С., Канцырев А.В., Голубев А.А.

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, e-mail: dinAlt220@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.121

В представленной работе разработаны уникальные полномасштабные Монте-Карло модели дифракционных спектрографов скользящего падения GIS, GIS-3D, VUV-QFF и кристаллического спектрографа JA-1, позволяющие на принципиально новом уровне проводить численное моделирование работы спектрографов с отражательной дифракционной решеткой (ДР) и кристаллом слюды. На основе моделей спектрографов разработаны методы восстановления исходных спектров экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ) и мягкого рентгеновского излучения (МР) [1, 2] плазмы.

Основными проблемами, препятствующими достоверному качественному и количественному восстановлению ЭУФ и МР спектров излучения плазмы Z-пинча, является наложение сигналов от разных порядков дифракции и зависимость распределения интенсивности излучения в различные порядки дифракции от длины волны после взаимодействия излучения с ДР и кристаллом слюды. В разработанных моделях спектрографов для учета процессов взаимодействия ЭУФ с ДР и МР с кристаллом спектрографа используются дифференциальный метод и динамическая теория дифракции.

Разработаны два оригинальных метода восстановления исходного спектра излучения плазмы мега-амперного Z-пинча установки Ангара-5-1:

1) Быстрый однопроходный метод восстановления исходных спектров ЭУФ излучения плазмы, учитывающий вклад различных порядков дифракции в сигнал спектрограмм [2].

2) Метод восстановления исходных МР спектров излучения плазмы с использованием рассчитанной аппаратной функции спектрографа, учитывающий уширение спектральных линий [1] в плоскости регистрации спектрографа.

С использованием разработанных методов выполнено восстановление спектров Z-пинч плазмы на установке Ангара-5-1:

1) Восстановлены исходные спектры ЭУФ излучения плазмы, полученные в экспериментах с нагрузкой в виде вольфрамового многопроволочного цилиндрического лайнера. Показано, что максимум излучения лежит в диапазоне 5 – 6 нм, что соответствует массиву не разрешаемых переходов $4d - 4f$ в ионах вольфрама W [1,2].

2) Измерены значения коэффициентов пропускания алюминия (Al) и индия (In) в диапазоне 2 – 30 нм. Полученные результаты совпадают с базой данных Henke [2].

3) Показано существенное влияние формы профиля штриха дифракционной решетки на результаты восстановления исходных спектров. С использованием априорной информации определены формы профилей штрихов ДР для спектрографов GIS-3D и VUV-QFF [2].

4) Восстановлен спектр МР излучения плазмы Z-пинча, полученного с помощью спектрографа JA-1 в экспериментах с нагрузкой, состоящей из Al проводников с вложенными W проводниками.

Литература

- [1]. A.V. Skobliakov, D.S. Kolesnikov, A.V. Kantsyrev, A.A. Golubev, I.V. Rudskoi, A.N. Gritsuk, E.V. Grabovskii, K.N. Mitrofanov, G.M. Oleinik, 2023 // Plasma Phys. Rep. 49 (6), 700 – 717.
- [2]. A.V. Skobliakov, D.S. Kolesnikov, A.V. Kantsyrev, A.A. Golubev, M.V. Ilyicheva, A.N. Gritsuk, E.V. Grabovskii // Review of Scientific Instruments, 2023, 94 (11), 113102.

ОБРАЗОВАНИЕ НАДТЕПЛООВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В Z-ПИНЧАХ

¹Фролов А.Ю., ²Вихрев В.В., ¹Чирков А.Ю.

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия,
e-mail: frolov@bmstu.ru

²Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва,
Россия, e-mail: vikhrev@mail.

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.122

Максвелловское (т.е. тепловое) распределение ионов не является наилучшим для генерации ядерных реакций синтеза. Оказывается, существуют распределения ионов по энергии, которые обладают более высокой эффективностью по сравнению с эффективностью тепловой (т.е. максвелловской) плазмы. Например, для плазмы, состоящей из дейтерия, в которой основная часть ионов холодная, а небольшая часть ионов этой плазмы ускорена до 10 кэВ, то такая плазма для генерации ядерной $d-d$ реакции является более эффективной по сравнению с той, у которой плазма имеет тепловое распределение ионов.

В обзоре Л.А. Арцимовича [1] (на с. 9) при описании нейтронного выхода $d-d$ реакции для двух разных законов распределения ионов по энергии; сравнивались: 1) распределение ионов, соответствующее максвелловскому распределению и 2) распределение, в котором энергии у всех ионов равны между собой. Нейтронные выходы сравнивались из одинаковых количеств частиц и одинаковой суммарной энергии в ионах. Из сравнения был сделан вывод о том, что максвелловское распределение ионов является наилучшим для генерации ядерной $d-d$ реакции. Однако это не так. Существуют распределения, в которых основная часть ионов холодная, а энергия небольшого числа (ускоренных) ионов составляет около 10 кэВ. Такая плазма при одинаковой затрате на нагрев оказывается более эффективной для генерации ядерной реакции по сравнению с той, которая имеется при тепловом распределении частиц. Такое желаемое надтепловое распределение ионов в плазме возникает при очень быстром нагреве ее, и когда ионы не успеют максвеллизироваться в результате столкновений.

Один из способов создания надтеплого распределения ионов в плазме заключается в получении ионами энергии непосредственно от источников энергии, а не от столкновений с более нагретыми электронами. Причем нагрев ионов для создания надтеплого распределения ионов должен происходить достаточно быстро – быстрее, чем за время ион-ионных столкновений.

В работе дан теоретический анализ быстрого нагрева плазмы до термоядерных значений в Z-пинче за счет быстрого роста магнитного поля. К этому методу относится нагрев в результате ускорения ионов в электрическом поле, вызванного ростом величины тока в плазме пинча [2–3]. Рост величины магнитного поля в плазме Z-пинча вызван как повышением величины тока в системе, так и сжатием замагниченной плазмы вместе с магнитным полем. Электрическое поле, возникающее из-за увеличения напряженности магнитного поля, ускоряет ионы в направлении вдоль их движения по ларморовской окружности. В результате роста величины магнитного поля в плазме пинча происходит увеличение энергии ионов пропорционально уже имеющейся у них энергии. Это приводит к генерации ионов в плазме с надтепловым распределением.

На заключительной стадии ускорения ионов в результате этого механизма появляются частицы, вылетающие из пинча, энергия которых превышает как тепловую энергию, так и энергию частиц, приобретающих ее при полном прохождении напряжения, используемого для генерации тока в Z-пинчевых разрядах.

Литература

- [1]. Арцимович Л.А. Управляемые термоядерные реакции, 1961.
- [2]. Будкер Г.И. // Физика плазмы и проблема УТР, т. 1, с. 122 (1958).
- [3]. Schluter A. // Zeitschrift fur Naturforschung, 1957, 12a, 822.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЧАСТИЧНО-ГОМОГЕНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ МАЛОПЛОТНОГО ПОРИСТОГО ВЕЩЕСТВА

Гуськов С.Ю., Яхин Р.А.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: yakhin.rafael@gmail.com*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.123

Предложено уравнение состояния (УРС) плазмы пористого вещества в виде УРС сплошной среды, содержащего в качестве регулирующего параметра давления степень гомогенизации (выравнивания плотности) плазмы, которая является функцией параметров структуры пористого вещества, а также текущих значений плотности и температуры. Негомогенизованная часть плазмы, электроны и ионы которой вовлечены в турбулентное движение плазменных потоков стенок пор, не дают вклад в давление. Скорость диффузионной гомогенизации определяется отношением длины ион-ионных столкновений ко времени прохождения плазменных потоков через пору. Для задачи о тепловом разлёте слоя вещества особенность УРС пористого вещества проявляется в противоположной по отношению к случаю сплошного вещества направленности временной эволюции давления. УРС частично-гомогенизированной плазмы объясняет данные экспериментов по замедленному распространению ударной волны в пористом веществе и по аномально длительному сохранению квазиоднородного состояния нагретой плазмы пористого вещества [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант №21-11-00102).

Литература

- [1]. Gus'kov S.Yu., Yakhin R.A. Equation of state of a partially homogenized plasma of low-dense porous matter // *Physics of Plasmas*. 2023. V. 30. №. 6. P. 062709.

УДАРНАЯ ТРУБА С KrF ЛАЗЕРНЫМ ДРАЙВЕРОМ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Зворыкин В.Д., Велиев П.В., Козин И.А., Паркевич Е.В., Смазнова Х.Т.,
Устиновский Н.Н., Шутов А.В.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: zvorykin@sci.lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.124

В докладе сообщается о создании лазерной ударной трубы (ЛУТ) для генерации сильных ударных волн (УВ) и высокоскоростных газовых потоков. Принцип действия ЛУТ (рис. 1) основан на ускорении тонкой СН-пленки абляционным давлением плазмы, которая создается при воздействии высокоэнергетичных УФ импульсов KrF лазера ГАРПУН (100 Дж & 100 нс) [1, 2]. Пленка служит поршнем, возбуждающим УВ в газе, заполняющем ЛУТ, которая имеет поперечное сечение 5×5 мм и длину 50 мм. Оптическая система на основе многоэлементного призмного растра и линзы обеспечивает фокусировку KrF лазерного излучения в квадратное пятно 7×7 мм с плотностью энергии до 100 Дж/см^2 (интенсивностью до 1 ГВт/см^2) и неоднородностью облучения пленки менее нескольких процентов. Стенки ЛУТ из кварцевого стекла ограничивают боковую разгрузку и обеспечивают плоскую геометрию распространения УВ; одновременно они служат окнами для зондирующего излучения 2-й гармоники Nd: YAG лазера, 10-нс импульсы которого используются для покадрового теневого и шпирен-фотографирования гидродинамических процессов в ЛУТ.

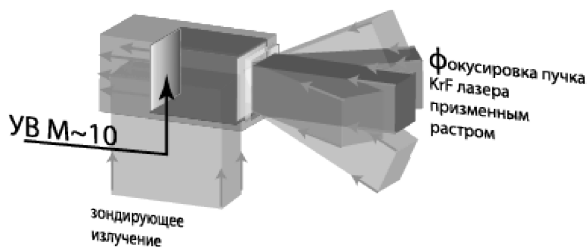


Рис.1

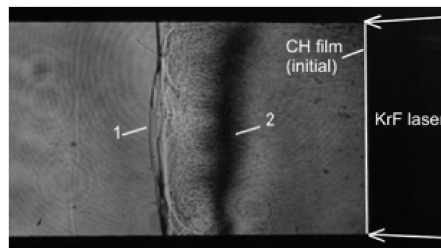


Рис.2

Для СН-пленок с толщинами от 0,9 до 20 мкм измерены скорости УВ в атмосферном воздухе (см. 1 на рис. 2), максимальная величина которых 4,6 км/с – в несколько раз превышает скорости в ударных трубах с взрывным инициированием. За фронтом УВ наблюдалась турбулизация сверхзвукового потока газа с характерным масштабом неоднородностей ~ 100 мкм. Одновременно происходило быстрое расширение и дефрагментация пленки (2), обусловленное взрывным характером испарения и гидродинамическими неустойчивостями Релея – Тейлора и Рихтмайера – Мешкова при многократном прохождении УВ по толщине пленки на стадии её ускорения. Исследовано влияние шероховатости стенок ЛУТ на гидродинамику сверхзвукового потока газа: шероховатости в пределах 6 мкм не оказывали существенного влияния на УВ; неоднородности с высотой ~ 200 мкм создавали пристеночные турбулентности, обусловленные неустойчивостью Кельвина – Гельмгольца, область которых постепенно расширялась к оси ЛУТ.

Эксперименты показали, что ЛУТ с KrF лазерным драйвером является эффективным инструментом для изучения ряда гидродинамических явлений, таких как гидродинамические неустойчивости и переход к турбулентности, обтекание тел гиперзвуковым потоком газа с числами Маха $M > 10$, отражение и кумуляция сильных УВ.

Данная работа выполнялась по научной программе Национального центра физики и математики «Исследование физических процессов при УТС и в звездных системах».

Литература

[1]. Зворыкин В.Д., Лебо И.Г. || Квантовая электроника, 2000, 39, 540.

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ»**

**SECTION
«PHYSICAL PROCESSES
IN LOW-TEMPERATURE PLASMAS»**

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО РАЗРЯДА В ПОТОКЕ ГАЗА ЗА СЧЕТ ЭКСТРЕМАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Абрамов И.С., Голубев С.В., Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия, abramov@ipfran.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.125

Спектры многозарядных ионов тяжелых газов характеризуются наличием узких пиков экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения [1]. Локализация пиков позволяет использовать для фокусировки сгенерированного излучения системы многослойных брэгговских зеркал, что открывает возможность практического применения этого излучения для литографии в экстремальном ультрафиолете [2]. Так, в частности, спектр $\text{Xe}^{8+} - \text{Xe}^{17+}$ имеет выделенный максимум в районе 11 нм, что соответствует пиковым коэффициентам отражения зеркал на основе бериллия и стронция [3, 4].

Одним из вариантов создания плазмы многозарядных ионов является импульсный лазерный разряд в газовой струе [5 – 7]. Излучение лазера остро фокусируют в плотном газе, обеспечивая в фокальной области развитие пробоя, существенный нагрев электронов излучением лазера и, как следствие, эффективную последовательную многократную ионизацию электронным ударом. Тем самым получают точечный источник экстремального ультрафиолетового излучения с эффективностью генерации свыше 1%.

В настоящей работе представлены результаты моделирования лазерного разряда в струях тяжелых газов [8]. Показано, что разряд распространяется за пределы фокальной области вследствие фотоионизации окружающего газа ЭУФ излучением многозарядных ионов и последующего нагрева электронов фотоионизированной плазмы потоком тепла из фокальной области в результате электронной теплопроводности [9]. Построена модель, обеспечивающая согласованное описание распространения разряда за счет указанного механизма с основными аспектами динамики разряда, включая пробой газа, нагрев электронов на упругих столкновениях с ионами, элементарные процессы ионизации и возбуждения многозарядных ионов электронным ударом, перенос линейчатого излучения ионов в объеме разряда и окружающем разряд нейтральном газе. Продемонстрировано согласие результатов моделирования с доступными экспериментальными данными, подтверждающими теоретическую концепцию об определяющем влиянии эффекта распространения разряда за пределы фокальной области на спектральный состав излучения разряда. Найдены режимы горения разряда, оптимальные для генерации излучения ЭУФ диапазона.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-22-00270).

Литература

- [1]. Nechai A.N. et al. // *Opt. Spectrosc.*, 2021, 129, 363–368.
- [2]. Bakshi V. (ed.), *EUV Sources for lithography*, Bellingham, WA: SPIE Press, 2006, 1057 p.
- [3]. Chkhalo N.I. and Salashchenko N.N. // *AIP Adv.* 2012, 3, 082130.
- [4]. Shaposhnikov R.A. et al. // *Opt. Lett.*, 2022, 47(17), 4351–4354.
- [5]. Kalmykov S.G. et al. // *J. Appl. Phys.*, 2019, 126, 103301.
- [6]. Guseva V.E. et al. // *Appl. Phys. B*, 2023, 129, 155.
- [7]. Kalmykov S.G. et al. // *J. Phys. D*, 2022 55, 105203.
- [8]. Abramov I.S. et al. // *Appl. Phys. Lett.*, 2023, 123, 193502.
- [9]. Господчиков Е.Д., Абрамов И.С., Голубев С.В., Шалашов А.Г., О структуре фронта разряда высокого давления, распространяющегося за счет фотоионизации собственным экстремальным ультрафиолетовым излучением // 51 Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 18 – 22 марта 2024 г.

РАСЧЁТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ИНДИЯ

Апфельбаум Е.М.

*Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
apfel_e@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.126

Теплофизические свойства различных веществ, такие как термодинамические (давление, внутренняя энергия) и электронные коэффициенты переноса (электропроводность, теплопроводность и термоэдс) играют важную роль в фундаментальных и прикладных задачах ряда областей физики, включая физику плазмы [1]. Поэтому их изучение различными теоретическими и экспериментальными методами продолжается уже на протяжении более века, и к настоящему моменту времени есть необходимые данные для многих веществ в самых различных областях фазовой диаграммы [2]. Тем не менее, остаются ещё вещества, для которых такие данные отсутствуют. К ним в частности, относится и индий, причём именно в области низкотемпературной плазмы.

Индий обладает сравнительно низкой температурой плавления, 422,55 К. Поэтому рассматриваемые свойства для него хорошо известны из измерений в области жидкости до приблизительно температуры кипения 2345 К. Есть и надёжные данные расчётов, что, например, позволяет построить достаточно точное аналитическое уравнение состояния для практических применений [3]. Но при повышении температуры соответствующих данных становится существенно меньше, в частности, есть результаты ударно-волновых измерений при плотностях порядка нормальной, т.е., $7,31 \text{ г/см}^3$ [4], данные спектроскопических измерений [5]. Но неизвестно, например, положение фазовых границ, а для критической точки есть только отдельные оценки в диапазонах температуры 4–7 кК и плотности $0,33 - 2 \text{ г/см}^3$ [6]. И, наконец, в диапазоне температур 10–100 кК и плотностей меньше или порядка критической нет никаких опубликованных данных как измерений, так и расчётов. А именно при этих параметрах и находится низкотемпературная плазма большинства металлов.

Ранее для описания рассматриваемых теплофизических свойств веществ в этой области нами была разработана модель, которая успешно применялась к целому ряду металлов и полупроводников. В данной работе мы модифицировали параметры этой модели для применения её именно к плазме индия. Подробные детали этой модели можно найти в [7]. Здесь же отметим, что она строится на химическом подходе для описания термодинамики и приближении времени релаксации для расчёта коэффициентов переноса. Так как других данных для сравнения в этой области нет, то был проведён также и расчёт давления на изохорах по полуэмпирическому состоянию [8], и было получено неплохое согласие между двумя моделями.

Литература

- [1]. Фортов В.Е., Якубов И.Т., Храпак А.Г. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2010.
- [2]. Grabowski P.E. et. al. // High Energy Density Physics. 2020, V. 37,100905.
- [3]. Li H., Sun Y., Li M. // AIP Adv. 2015, V. 5, 097163.
- [4]. Al'tshuler L.V. // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1981, V. 122. P. 145.
- [5]. Shuaibov A.K., Dashchenko A.I., Shevera I.V. // High Temp. 2001, V. 39. P. 333.
- [6]. Pottlacher G., Kaschnit E., Jager H. // J. Non-Cryst. Solids. 1993, V. 156-158, P. 374.
- [7]. Apfelbaum E.M. // Phys. Plasmas. 2023, V. 30, 042709.
- [8]. Khishenko K.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019, V. 1385, 012002.

ВЛИЯНИЕ БАРБОТАЖА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА В ЖИДКОМ УГЛЕВОДОРОДЕ

¹Батукаев Т.С., ¹Билера И.В., ^{1,2}Крашевская Г.В., ¹Лебедев Ю.А.

¹*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва, Россия, e-mail: batukaevtimur95@gmail.com*

²*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.127

В последнее время растет интерес к производству водорода и водородосодержащих газов. Ожидается, что водород станет безопасным и доступным источником энергии для устойчивого развития с точки зрения загрязнения воздуха, энергетической безопасности и изменения климата. Большое внимание уделяется проблеме получения водорода с использованием низкотемпературной плазмы в газовых средах, содержащих углеводороды или пары спирта. Особое место среди плазменных методов занимает СВЧ-разряд в жидких углеводородах и спиртовых растворах из-за своей нестационарной природы и тем, что плазмохимические процессы происходят в газовом пузыре, расположенном внутри жидкости на конце СВЧ-антенны.

Экспериментальная установка, используемая для генерации и исследования СВЧ-разряда в жидких углеводородах, подробно описана в [1, 2]. Разряд инициировался на конце центрального проводника коаксиальной линии (диаметром 2 мм), сделанного из стальной трубки для барботажа дополнительными газами. Зажигание разряда регистрировалось с помощью девятикадровой электронно-оптической камеры K011, спектрометра Avaspec-3648x14-USB2 и фотодиода, сигнал с которого выводился на осциллограф АКИП-4126/3А-Х. Для отделения продуктов плазмохимических реакций от паров жидкости использовался водяной охладитель. На выходе из реактора определяли скорость образования продуктов с помощью расходомера и состав основных газовых продуктов хроматографическим анализом. Критерием изменения химической активности являлось изменение выхода различных компонентов газовой смеси на выходе из реактора. Использование газовых добавок даёт дополнительную информацию и позволяет лучше понять физику процессов в СВЧ разряде в жидкости. Основной целью работы было определение возможностей управления химической активностью получения водорода с помощью микроволнового разряда в жидких углеводородах, на примере нефтяного растворителя Нефрас С2 80/120, с использованием различных барботирующих газов (Ar, He, CO₂).

Впервые была получена динамика вращательной и колебательной электронно-возбужденных температур частиц в плазме. Установлено влияние дополнительных газов на выход различных компонент газových продуктов. Максимальные значения выхода водорода, как основного газового продукта, составили 791 мл/мин и 811 мл/мин, максимально достигнутая энергоэффективность 135,6 Нл/кВтч и 162,2 Нл/кВтч в Нефрасе с барботажем Ar и He, соответственно.

Полученные результаты по физическим и химическим свойствам СВЧ-разряда в жидких углеводородах могут быть полезны при определении перспектив использования этого типа разряда в различных прикладных задачах.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИНХС РАН.

Литература

- [1]. Lebedev Yu.A., Krashevskaya G.V., Batukaev T.S., Epstein I.L. // Plasma Processes and Polymers, 2021, V. 18, No. 10, P. 2100051.
- [2]. Batukaev T.S., Bilera I.V., Krashevskaya G.V., Lebedev Yu.A. // Processes, 2023, V. 11, No. 8, P. 2292.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРАКЦИИ СВЧ РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ В ВОДОРОД-МЕТАНОВОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

Богданов С.А., Вихарев А.Л., Горбачёв А.М., Радищев Д.Б., Лобаев М.А.

Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, г. Нижний Новгород, Россия, e-mail: bogser@ipfran.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.128

В настоящее время активно исследуется химическое осаждение алмаза из газовой фазы при высоких давлениях (выше 300 Торр) с целью увеличения скорости роста. Однако синтез CVD алмаза при высоких давлениях всё ещё не столь детально исследован по сравнению со случаем более низких давлений (20-200 Торр). Одним из малоизученных явлений является контракция разряда высокого давления в микроволновом плазмохимическом реакторе в водород-метановой газовой смеси, в которой наблюдается скачкообразный переход разряда из однородной формы в контрагированную с ярким тонким филаментом в центре разряда [1].

В настоящем докладе представлены результаты исследования явления контракции микроволнового разряда в водород-метановой газовой смеси в диапазоне давлений 250–500 Торр. Приведены результаты изучения области параметров (давление газовой смеси, СВЧ мощность, содержание метана), при котором возникает и стабильно поддерживается контрагированный режим, в различных CVD реакторах, также приведены результаты измерения концентрации электронов в контрагированном режиме. Фотографии разряда до и после контракции приведены на рис. 1.

Проведенные эксперименты показали, что контракция разряда в CVD реакторе для синтеза алмаза не является эффектом, специфическим для какого-то конкретного реактора, а наблюдается в различных CVD реакторах. Существование контрагированного режима было продемонстрировано в трёх различных CVD реакторах. Проведенные измерения показали значительное увеличение электронной концентрации ($[Ne] > 10^{14} \text{ см}^{-3}$) и потока водорода на подложку при контракции. При этом такой режим стабилен и может поддерживаться сколь угодно долго. Измерения электронной концентрации и оценки толщины скин-слоя позволяют заключить, что радиальный размер филамента соответствует толщине скин-слоя.

Контракция может представлять интерес для проверки численных моделей разряда. Контракция чувствительна к соотношению метана к водороду в газовой смеси и имеет четкие пороги по давлению, что должно воспроизводиться в численной модели, претендующей на детальное описание плазмы СВЧ разряда в реакторах для синтеза алмаза.

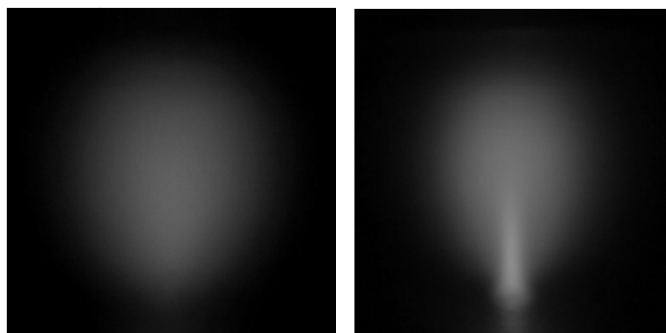


Рис. 1. Контракция разряда при увеличении давления от 345 до 355 Торр.

Литература.

- [1]. S.A. Bogdanov, A.L. Vikharev, A.M. Gorbachev, D.B. Radishev, M.A. Lobaev // Plasma Processes Polym. 20, e2300073, (2023)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗЛОЖЕНИЯ МЕТАНА В ЭЛЕКТРОДУГОВОМ ПЛАЗМОТРОНЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

¹Дудник Ю.Д., ¹Кузнецов В.Е., ¹Сафронов А.А., ¹Ширяев В.Н., ¹Васильева О.Б.,
^{1,2}Субботин Д.И., ^{1,2}Гаврилова Д.А., ^{1,2}Гаврилова М.А.

¹Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: rc@iperas.nw.ru, julia_dudnik-s@mail.ru

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.129

Актуальность вопросов переработки метана обусловлена необходимостью поиска эффективных технологий переработки сырья и подготовки их для промышленного внедрения. Метод разложения метана в дуговом разряде при температуре около 2000 К является перспективным, с точки зрения химических превращений в этом процессе, так как в результате образуется водород и углерод.

Водород может в дальнейшем использоваться, например, в качестве экологически чистого энергоносителя или химического сырья, а углеродный остаток применяться в качестве самостоятельного продукта для большого числа технологических процессов во многих отраслях промышленности, в том числе связанных с плазменным получением материалов [1, 2].

В работе проведено экспериментальное исследование процесса разложения метана в бескислородной атмосфере в электродуговом плазмотроне переменного тока мощностью около 5 кВт. Эксперименты выполнялись на установке в составе плазмотрона переменного тока [3, 4], источника питания, системы пробоотбора, устройств подачи охлаждающей жидкости и плазмообразующих газов. Особенностью эксперимента было использование балластного газа (аргон) только для запуска плазмотрона, а в качестве плазмообразующего газа - смеси водорода и метана, при этом ее расход составлял величину до 0,03 г/с.

Состав получаемого газа исследован методом масс-спектрометрии. Установлено возникновение возвратного течения в холодной нереакционной зоне электродуговой камеры плазмотрона, выполняющей функцию плазмохимического реактора. Несмотря на это, значительная часть метана разложилась с образованием газообразного водорода. Степень конверсии метана составила до 89%.

Литература

- [1]. Kuchina Yu.A., Subbotin D.I., Kumkova I.I., Dudnik Y.D., Kuznetsov V.E., Popov V.E., Shiryayev V.N., Cherepkova I.A., Pavlova E.A., Popkov V.I., Obratsov N.V., Metal ferrites synthesis by ac plasma torch // J. Phys.: Conf. Ser. 1135 (1). 012095. (2018).
- [2]. Dudnik Y.D., Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Shiryayev V.N., Vasilieva O.B., Subbotin D.I., Popkov V.I., Plasma ways to obtain ultrafine oxides // J. Phys.: Conf. Ser. 1147. 012127. (2019).
- [3]. Сафронов А.А., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Кузнецов В.Е., Ширяев В.Н., Исследование работы высоковольтных плазмотронов со стержневыми электродами // ТВТ. 2018. Т. 56. № 6. С. 926-931.
- [4]. Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Васильева О.Б., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н., Плазмотроны переменного тока. Системы инициирования дуги. Особенности конструкции и применения // ПТЭ. 2019. № 2. С. 58 – 66.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ АЦЕТИЛЕНА И ВОДОРОДА ПРИ ПЛАЗМОСТРУЙНОМ ПИРОЛИЗЕ МЕТАНА

Билера И.В., Лебедев Ю.А., Титов А.Ю., Эпштейн И.Л.

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва, Россия

E-mail: epstein@ips.ac.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.130

Целью данной работы является проведение численного моделирования реакции конверсии метана в ацетилен в условиях плазмоструйного пиролиза и сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными [1, 2]. В плазмотроне, работающем на метане или водороде, достигается температура в интервале 3000 – 8000 К. Затем струя высокоэнтальпийного газа попадает во вторую камеру (реактор), где встречается с потоками «холодного» метана. Состав горячего газа, выходящего из плазмотрона, определялся из термодинамического расчета для давления $p = 1$ атм. Смешение газовых потоков из плазмотрона и подаваемого в реактор происходит в начале реактора и считается мгновенным. Для определения параметров полученной смеси использовалась система уравнений сохранения массы и энергии. Закалка продуктов реакции эффективно охлаждает реакционную смесь до температур, при которых химическими реакциями можно пренебречь. При расчете использовалась модель реактора идеального вытеснения, включающая в себя уравнения баланса массы для всех компонент и уравнение баланса энергии. За основу кинетической схемы нами были взят механизм пиролиза ацетилена Ванга и Френклаха [3]. Наряду с процессами с нейтральными частицами в кинетическую схему были включены процессы с заряженными частицами. Учитывались процессы ионизации и диссоциации прямым электронным ударом и реакции ионного обмена. Кроме того, на основе модели, разработанной в [4], учитывалось образование сажи. Эта модель включает в себя процессы зародышеобразования, поверхностный рост твердых частиц и их коагуляцию. Для образования и поверхностного роста зародышей использовалась полиароматическая модель.

В расчетах варьировались величины весовых потоков холодного и горячего газа. Результаты расчетов основных продуктов разложения метана (водорода и ацетилена) хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для продуктов диссоциации метана, количество которых незначительно, и самого метана наблюдается расхождение между расчётными и экспериментальными результатами при небольшой величине расхода холодного метана. Наши оценки показывают, что это различие может быть связано с предположением о мгновенном смешении потока плазмы и холодного метана. Проведен анализ основных процессов разложения метана и образования ацетилена в тех случаях, когда в качестве плазмообразующего газа использовался либо водород, либо метан. Кроме газовых продуктов проводился расчет выхода сажи. Наименьший выход сажи получается при соотношении величины весовых потоков холодного и горячего газа равном единице. Максимальный выход ацетилена наблюдался при соотношении величины весовых потоков холодного и горячего газа равном 1.2 на временах около 10^{-3} с.

Работа выполнена в рамках государственной программы ИНХС РАН.

Литература

- [1]. Козлов Г.И., Худяков Г.Н., Кобзев Ю.Н. // Нефтехимия, 1967, 7, 224.
- [2]. Кобзев Ю.Н., Козлов Г.И., Худяков Г.Н. // Химия высоких энергий, 1970, 4. 519.
- [3]. Wang H., Frenklach M. // Combust. Flame, 1997, 110, 173.
- [4]. Epstein I.L., Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V. Bilera I.V. // A J. Phys. D: Appl. Phys., 2018, 51. 214007.

КОЛЛЕКТИВНАЯ ДИНАМИКА ИОНОВ СИЛЬНО НЕИДЕАЛЬНОЙ ОДНОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ. САМОСОГЛАСОВАННАЯ РЕЛАКСАЦИОННАЯ ТЕОРИЯ

Файрушин И.И., Мокшин А.В.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия
e-mail: fairushin_ilmaz@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.131

Сильно неидеальная плазма представляет собой электронейтральную систему заряженных частиц, энергия взаимодействия которых превышает энергию их теплового движения [1]. Свойства сильно неидеальной плазмы во многом сходны со свойствами жидкого состояния вещества [2 – 4]. Особенно ярко это проявляется при рассмотрении коллективной динамики частиц системы. Поэтому методы теории жидкости практически без изменения могут быть применены для описания термодинамических и транспортных свойств неидеальной плазмы. Исследования свойств сильно неидеальной плазмы представляет интерес не только с точки зрения фундаментальных вопросов физики жидкого вещества, но и имеет замечательные приложения в различных физических ситуациях, включая недра нейтронных звезд и белых карликов, пылевой плазмы, ультрахолодной плазмы и коллоидных суспензий [1]. В данной работе развивается теоретический формализм, описывающий коллективную динамику ионов сильно неидеальной однокомпонентной плазмы на основе самосогласованной релаксационной теории [3 – 5]. Данный формализм опирается на корреляционные соотношения, связывающие частотные релаксационные параметры, которые характеризуют трех- и четырехчастичную динамику с параметрами, соотносящимися с двухчастичной динамикой. Расчет спектров динамического структурного фактора и дисперсионных характеристик на широком диапазоне волновых чисел обнаруживает их согласие с данными моделирования и результатами, полученными с использованием теории в рамках метода частотных моментов [6]. Предложенный формализм воспроизводит все особенности, присущие однокомпонентной плазме, и требует знания лишь параметров неидеальности и экранировки, а также соответствующей информации о структуре.

Литература

- [1]. В.Е. Фортов, Г.Е. Морфилл (ред.). Комплексная и пылевая плазмы. Из лаборатории в космос, ФИЗМАТЛИТ, Москва (2012).
- [2]. J.-P. Hansen, I. R. McDonald, Theory of Simple Liquids, Academic Press, London, (2006).
- [3]. A.V. Mokshin, I.I. Fairushin, I.M. Tkachenko // Phys. Rev. E 105, 025204 (2022).
- [4]. A.V. Mokshin, B.N. Galimzyanov // J. Phys.: Condens. Matter 30, 085102 (2018).
- [5]. I.I. Fairushin, A.V. Mokshin // Phys. Rev. E 108, 015206 (2022).
- [6]. Yu.V. Arkhipov, A. Askaruly, A.E. Davletov, D.Yu. Dubovtsev, Z. Donko, P. Hartmann, I. Korolov, L. Conde and I.M. Tkachenko // Phys. Rev. Lett. 119, 045001 (2017).

1D ГИРОКИНЕТИЧЕСКИЙ КОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА В ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ

^{1,2}Глинский В.В., ^{1,2}Тимофеев И.В.

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: v.v.glinskiy@yandex.ru*

²*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.132

Работа термоядерной магнитной ловушки открытого типа невозможна без создания начальной плазмы с плотностью, достаточной для захвата инжектируемых нейтральных пучков. Одним из наиболее перспективных способов зажигания плазменного разряда в таких системах является ионизация нейтрального газа электронным пучком. В отличие от прямой инъекции плазмы в ловушку с помощью плазменной пушки, инъекция электронного пучка не создаёт проблем с частичным отражением плазмы от магнитных пробок. Плазма в этом случае успешно генерируется по всей длине установки.

Ранее в ИЯФ СО РАН на установке ГДЛ были проведены эксперименты по инъекции электронного пучка с характерной энергией 20–30 кэВ и током 5–8 А в нейтральный газ [1]. Было показано, что пучок, имеющий диаметр 1 см в центральной секции установки, способен создавать плазму во всём объёме ловушки (диаметром 50 см). Последние попытки объяснить это явление быстрым радиальным расширением области плазменной турбулентности, сильно локализованной вблизи входной магнитной пробки, с последующей передачей энергии из области релаксации пучка холодным электронам в остальных частях ловушки в результате классической электронной теплопроводности, не увенчались успехом главным образом из-за того, что быстрый сток энергии на холодную стенку сильно занижал температуру электронов в ловушке по сравнению с экспериментальным значением (20 эВ) [2,3]. В действительности потери энергии на стенку в пробочной ловушке оказываются гораздо ниже из-за формирования в расширителях скачка амбиполярного потенциала. Однако чтобы правильно описать влияние этого эффекта, а также учесть то, что длина свободного пробега электронов при измеренных температурах сопоставима с размером пробки, нужно выйти за рамки применимости гидродинамического подхода и исследовать кинетику электронов хотя бы в рамках упрощённой gyrokinetic модели. Для воспроизведения классических процессов переноса при наличии скачка амбиполярного потенциала и без ограничений на температуру плазмы была начата разработка 1D gyrokinetic Particle-In-Cell (PIC) кода.

В данной работе представлено описание сохраняющего энергию 1D gyrokinetic кода. Для продольного движения частиц под действием зеркальной и электрической силы в этом коде используется полуявная PIC модель [4], а поперечная скорость изменяется в соответствии с законом сохранения магнитного момента. Представленные физические тесты подтверждают корректную работу кода.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-22-00514)

Литература

- [1]. Soldatkina E.I. et al. // Nuclear Fusion. 2022. V. 62. № 6. P. 066034.
- [2]. Глинский В.В., Волчок Е.П., Анненков В.В., Тимофеев И.В. // СФЖ. 2023. Т. 18, № 3.
- [3]. Глинский В.В. и др. // ICRAF-2023. 2023. С. 217.
- [4]. Lapenta G. // Journal of Computational Physics. 2017. V. 334. P. 349–366.

О СТРУКТУРЕ ФРОНТА РАЗРЯДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ, РАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ЗА СЧЕТ ФОТОИОНИЗАЦИИ СОБСТВЕННЫМ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Господчиков Е.Д., Абрамов И.С., Голубев С.В., Шалашов А.Г.

*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия,
e-mail: egos@ipfran.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.133

В серии экспериментов по разработке концепции источника экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения на основе лазерного разряда с многозарядными ионами в потоке ксенона высокой плотности было экспериментально продемонстрировано, что при фокусировке излучения Nd:YAG лазера с энергией 0,8 Дж и длительностью импульса 7 нс на сверхзвуковую струю ксенона можно получить ЭУФ излучение в диапазоне длин волн $11,16 \pm 0,13$ нм с энергией до 10 мДж, что отвечает эффективности конверсии $>1\%$ [1]. Для объяснения такой высокой эффективности был предложен новый механизм распространения разряда за пределы фокальной области, связанный с фотоионизацией окружающего газа ультрафиолетовым излучением и последующим нагревом образующейся плазмы потоком тепла из фокальной области за счет электронной теплопроводности [2]. Предложенный механизм позволил объяснить полученные в экспериментах данные и указать пути увеличения эффективности конверсии лазерного излучения в источниках ЭУФ излучения для проекционной литографии высокого разрешения [3].

В данном докладе обсуждается структура фронта комбинированной волны, формируемой совместным влиянием процессов излучения, фотоионизации и нелинейной электронной теплопроводности. Исследуются распределения концентрации и температуры плазмы в этом фронте и зависимости скорости распространения волны ионизации от параметров лазерного разряда.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-22-00270).

Литература

- [1]. V.E. Guseva, A.N. Nechay, A.A. Perekalov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkalo, Investigation of emission spectra of plasma generated by laser pulses on Xe gas-jet targets // Appl. Phys. B 129, 155 (2023).
- [2]. I.S. Abramov, S.V. Golubev, E.D. Gospodchikov, and A.G. Shalashov, Expansion of laser discharge in xenon jet improves EUV-light emission // Appl. Phys. Lett. 123, 19350 (2023).
- [3]. И.С. Абрамов, С.В. Голубев, Е.Д. Господчиков, А.Г. Шалашов, Распространение лазерного разряда в потоке газа за счет экстремального ультрафиолетового излучения многозарядных ионов // 51 Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 18 – 22 марта 2024 г.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В СИЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ В РАЗЛИЧНЫХ ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ

Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Новиков Л.А., Яницын Д.В., Гасилов М.А.,
Голубев М.С., Павлов С.И.

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: v.karasev@spbu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.134

Пылевая плазма [1] в сильном магнитном поле является сложным для создания объектом, но обнаруживает ряд уникальных свойств [2 – 5]. Основные ее исследования проведены в монослойных пылевых образованиях в аргоне [2 – 3]. В работе [5] изучена динамика вращения в объемной пылевой структуре в тлеющем разряде в неоне. Полученные результаты в области слабых магнитных полей повторили предыдущие данные [6], однако в сильных полях выше 0,1 Тл результаты несколько различались в разных разрядных камерах, сортах газа и давлениях.

В настоящем сообщении обсуждаются несколько серий экспериментов с пылевой плазмой в сильном магнитном поле до 2,5 Тл, проведенных в разряде постоянного тока в пылевой ловушке в области резкого короткого сужения канала тока, представленных ранее в [5 – 6]. Эксперименты выполнены с тремя инертными газами – неоном, аргоном и гелием. Для каждого газа подобраны условия разряда (ток, давление, геометрия ловушки). При подобранных условиях получены закономерности динамики вращения пылевой плазмы, которые проанализированы и сопоставлены между собой.

Качественно закономерность тренда скорости вращения представляется следующим. После формирования пылевой плазмы в поле от 0,015 Тл развивается вращение с угловой скоростью, вектор которой противоположно направлен к вектору магнитной индукции. В поле около 0,1 Тл имеется локальный максимум скорости, интерпретация которого дана в [5]. Поведенные эксперименты показывают, что в зависимости от условий (сорт газа, ток разряда) дальнейшее повышение магнитного поля приводит либо к выходу зависимости скорости на постоянное значение, либо к слабому ее росту. Но при достижении замагничности ионов разряда быстрота изменения скорости вращения от магнитного поля существенно возрастает во всех исследуемых газах разряда.

Работа поддержана РФФ, грант № 22-12-00002.

Литература

- [1]. Fortov V.E., Morfill G.E., Complex and dusty plasmas: from laboratory to space (New York: Taylor & Francis Group) 2010, p 418.
- [2]. Schwabe M., Konopka U., Morfill G.E. et al. // Phys. Rev. Lett., 2011, 106, 215004.
- [3]. Melzer A., Kruger H., Schutt S., and Mulsow M. // Physics of Plasmas., 2019, 26, 093702.
- [4]. Nedospasov A.V., Phys. Rev. E., 2009, 79, 036401.
- [5]. Dзлиева E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I. and Karasev V. Yu. // Plasma Sources Science and Technology, 2019, 28, 085020.
- [6]. Dзлиева E.S., Karasev V.Y., Pavlov S.I. // Plasma Physics Reports, 2016, 42, 147.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО НА ОСОБЕННОСТИ АБЛЯЦИИ СИНТАКТНЫХ ПЕН ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С НАНОСЕКУНДНЫМ ФРОНТОМ ИМПУЛЬСА

^{1,3,5}Казаков Е.Д., ¹Орлов М.Ю., ²Садовничий Д.Н., ^{1,5}Смирнова А.Р.,
¹Стрижаков М.Г., ^{1,4}Сунчугашев К.А., ²Шереметьев К.Ю.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, kazakov_ed@nrcki.ru

²ФГУП «ФЦДТ «Союз», г. Дзержинский, Московская область, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

⁴Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

⁵Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Московская область, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.135

В связи с активным внедрением композитных материалов в различных областях науки и техники в последние годы активно исследуется поведение таких материалов и их отдельных компонентов при экстремальных импульсных нагрузках и, в частности, при облучении сильноточными пучками релятивистских электронов [1–3]. Интенсивность облучения, глубина проникновения электронов, величина откольной прочности и ударная адиабаты во многом определяют формирование в композиционных материалах различные типы разрушений: абляцию облучаемой поверхности, образование откола с тыльной стороны образца, а также образование сквозных или радиально ориентированных трещин. Способность к большим объемным изменениям при экстремальных воздействиях на такой класс полимерных композиционных материалов как синтактные пены позволяет детально изучать особенности их абляции и влияние химических свойств компонентов, составляющих синтактную пену. В настоящей работе в качестве объекта исследования выбраны синтактные пены на основе фенилсилсесквиоксановых и бутадиеннитрильных эластомеров, отличающихся энергией межмолекулярного взаимодействия макромолекул.

Эксперименты проводились на сильноточном ускорителе электронов «Кальмар» при напряжениях в диодном зазоре 240–300 кВ, токах 20–45 кА и длительностях импульсов 100–150 нс [4]. Динамика плазмы, возникающей при абляции поверхности мишени исследовалась методом лазерного теневого фотографирования. В качестве источника зондирующего излучения использовался импульсный лазер на ортоалюминате иттрия с неодимом ($\lambda_1 = 1079$ нм), изготовленный в НТИЦ УП РАН. Лазер работал в режиме свободной генерации с внутриврезонаторным преобразованием излучения λ_1 во вторую гармонику ($\lambda_2 = 540$ нм). Выходные параметры импульсов излучения (540 нм, 90 мДж, 300 мкс, 7 мрад). В качестве регистратора применялась электронно-оптическая камера СФЭР-6, работающая в хронографическом режиме [5].

Было продемонстрировано, что характер абляции мишени в заметной степени обусловлен химическими особенностями облучаемого материала, но в немалой степени связан и со степенью фокусировки электронного пучка на мишени.

Эксперименты на установке «Кальмар» проводились в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Милёхин Ю.М., Садовничий Д.Н. и др. // Доклады Академии наук. 2019. Т. 487. № 2. С. 159–163.
- [2]. Садовничий Д.Н., Милехин Ю.М. и др. // Журнал прикладной химии. 2022. Т. 95. № 1. С. 87-99.
- [3]. Садовничий Д.Н., Милехин Ю.М. и др. // Известия Академии наук. Серия химическая. 2023. Т. 72. № 9. С. 2048–2059.
- [4]. Демидов Б.А., Ивкин М.В. и др. // Атомная энергия. 1979. Т. 46. Вып. 2. С. 101.
- [5]. Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 8. С. 716–727.

ГЕНЕРАЦИЯ ПЛАЗМЫ ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА В КВАЗИСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

^{1,2}Маслаков И.Д., ¹Кузьмин Е.И., ¹Чесноков А.В., ^{1,2}Шиховцев И.В.

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

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия,

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.136

Для развития термоядерной энергетики необходимы материаловедческие исследования по взаимодействию плазмы с материалами стенок термоядерного реактора. Проблема первой стенки требует проведения симуляции плазменных нагрузок в линейных материаловедческих установках. Источник плазмы для таких установок должен отвечать критериям эффективности вкладываемой энергии по отношению к создаваемому плазменному потоку, стационарности режима генерации плазмы, а также чистоте плазмы. Данные критерии обозначили перспективность использования высокочастотных безэлектродных систем генерации плазмы, как наиболее эффективных источников плазмы с возможностью создания плазмы с ионным потоком в диапазоне $10^{22} - 10^{23} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В частности, геликонные источники плазмы все чаще используются на материаловедческих установках с высоким [1] и средним потоком мощности на мишень [2, 3].

Геликонный источник, как правило, состоит из магнитной системы, системы ВЧ возбуждения, состоящей из генератора, согласующей системы и ВЧ антенны, и разрядной диэлектрической камеры. Одной из основных проблем, препятствующих выходу геликонного источника на стационарный режим, является нагрев диэлектрической разрядной камеры при генерации плазмы, что приводит к ее эрозии и распылению материала стенок. Данная работа посвящена исследованию взаимодействия плазмы с разрядной камерой, а также методам увеличения длительности генерации плазмы.

Исследования проведены на геликонной установке, разработанной в ИЯФ СО РАН [4, 5]. Изучена зависимость нагрева камеры от различных параметров разряда, — подводимой мощности (5 – 25 кВт), магнитного поля (170 – 600 Гс) и длительности генерации в десятки секунд. Обнаружен рост температуры нагрева камеры с увеличением напряжения на ВЧ антенне, которое пропорционально вводимой мощности, обнаружены максимумы температуры, расположенные в местах наибольшей напряженности электрического поля антенны. В результате экспериментов не обнаружено влияния формы силовых линий и плотности плазмы на нагрев камеры. Исследованы различные способы уменьшения перегрева камеры (фарадеевский внутренний экран, дополнительный изолятор между антенной и камерой). Предложена конструкция двойной стенки с водяным охлаждением.

Литература

- [1]. J. Rapp // Journal Fusion Science and Technology (2019), Vol. 75, Iss. 7, <https://doi.org/10.1080/15361055.2019.1610315>.
- [2]. B.D. Blackwell et al. // Plasma Sources Sci. Technol. (2012), Vol. 21, P. 055033, DOI:10.1088/0963-0252/21/5/055033.
- [3]. D. Cherkez // Problems of Atomic Science and Technology Ser. Thermonuclear Fusion (2020), Vol. 43, Iss. 3, pp. 101—110, DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-101-110
- [4]. A. Ivanov et al. // Fusion Sci. Technol. (2013), Vol. 63, P. 217–221.
- [5]. E.I. Kuzmin, I.V. Shikhovtsev // Plasma Phys. Rep. (2021), Vol. 47(6), p. 526–535, DOI:10.1134/S1063780X21060118.

ДИНАМИКА ИСКУССТВЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

^{1,2}Лосева Т.В., ^{1,2}Урвачев Е.М., ^{1,2}Гончаров Е.С., ^{1,2}Ляхов А.Н., ¹Зецер Ю.И.

¹Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, Россия, losseva@idg.chph.ras.ru

²Центр фундаментальных и прикладных исследований ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.137

Эксперименты по созданию искусственных плазменных образований в ионосфере Земли проводятся, в первую очередь, с целью верификации теоретических моделей свободной плазмы, что невозможно в условиях лабораторного эксперимента из-за краевых условий и для исследования *in situ* электродинамических процессов магнитосферно-ионосферного взаимодействия. В экспериментах "Флакрус" (высота 140 км) и "Северная звезда I(II)" (350 и 270 км, соответственно) для инъекции струй алюминиевой плазмы использовались созданные в ИДГ РАН взрывные плазменные генераторы ВГПС с максимальной энергией плазмы 6 МДж.

Результаты численного моделирования начальной стадии динамики плазмы в экспериментах "Флакрус" и "Северная звезда-II" приведены в работах [1, 2]. В отличие от этих экспериментов, в эксперименте "Северная звезда-I" непосредственно перед инъекцией алюминиевой плазмы перед генератором плазменной струи был выпущен сухой воздух для исследования влияния нейтральной атмосферы на ионизацию струи и сопоставления с результатами экспериментов на более низких высотах ("Флакрус").

В работе представлены результаты трехмерного численного моделирования взаимодействия алюминиевой плазменной струи с воздушным облаком, расширяющимся в ионосферу на высоте 350 км. Расчеты выполнены с использованием радиационно-газодинамического кода FRONT [3], основанного на явной схеме годуновского типа на фиксированной эйлеровой сетке (XYZ геометрия). Зависимость от времени газодинамических параметров плазмы при ее инъекции из сопла генератора ВГПС-400 (сценарий инъекции) определена в [2], и показала хорошее согласие данных расчетов с имеющимися данными измерений в лабораторных экспериментах.

Представлено сравнение результатов расчетов с результатами измерений газодинамических и оптических характеристик плазменного образования. Исследовано влияние искусственной атмосферы, представленной воздушным облаком, на параметры плазменного образования.

Литература

- [1]. Лосева Т.В., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Урвачев Е.М. Численное моделирование начальной стадии динамики высокоскоростной плазменной струи в активных геофизических ракетных экспериментах "Флакрус" и "Северная звезда" // Физика плазмы, 2022, том 48, с. 956 – 961, DOI: 10.31857/S0367292122600583
- [2]. Лосева Т.В., Голубь А.П., Косарев И.Б., Поклад Ю.В., Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. Характеристики плазменной струи взрывного генератора в экспериментах «Флакрус»: измерения и численное моделирование // Динамические процессы в геосферах / М.: ИДГ РАН, 2021. № 13. С. 175-186. https://doi.org/10.26006/22228535_2021_1_175
- [3]. Глазырин С.И. Исследование горения в сверхновых типа Ia // Письма в Астрономический журнал. 2013. Т. 39. С. 249-254. DOI: 10.1134/S1063773713040026.

ДАВЛЕНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРИБЛИЖЕНИИ СРЕДНЕЙ ЯЧЕЙКИ ВИГНЕРА-ЗЕЙТЦА С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА НЕЛИНЕЙНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Мартынова И.А., Иосилевский И.Л.

*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия,
martina1204@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.138

Авторы рассматривают двухкомпонентную равновесную электронейтральную систему классических макроионов конечных размеров с зарядами $Z \gg 1$ и точечных противоположно заряженных микроионов с единичными зарядами. С учетом эффекта нелинейного экранирования макроионов микроионами в рамках приближения Пуассона–Больцмана в модели средней сферической ячейки Вигнера–Зейтца двумя способами рассчитано давление [1]. Первый способ является общим. Согласно ему, давление рассчитывается посредством вычисления неидеальной части энергии взаимодействия всех частиц и неидеальной части свободной энергии Гельмгольца. Второй способ может быть применен для систем, рассматриваемых в приближении средней сферической ячейки Вигнера–Зейтца. В работе приводятся аналитические зависимости, аппроксимирующие полученные кривые для давления в зависимости от концентрации макроионов, заряда макроиона Z и температуры системы [1]. Показано, что давление и изотермическая сжимаемость плазмы являются положительными во всем диапазоне концентраций макроионов [1] в отличие от работ [2, 3], где эффект нелинейного экранирования не учитывался.

Литература

- [1]. Martynova I., Iosilevskiy I. // *Contrib. Plasma Phys.*, 2023, P. e202300097.
- [2]. Khrapak S.A., Khrapak A.G., Ivlev A.V. and Morfill G.E. // *Phys. Rev. E*, 2014, V. 89, P. 023102.
- [3]. Farouki R.T., Hamaguchi S. J. // *Chem. Phys.*, 1994, V. 101, P. 9885–9883.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ ЛИНИЙ ГЕЛИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕЛИКОННОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Нагель Н.Н., Лисица В.С., Шуровский Д.О., Брагин Е.Ю.

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва,
Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.139

Оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС) является пассивной диагностикой геликонного источника плазмы, в котором в магнитном поле плазма создается с помощью радиочастотного излучения. Такой источник генерирует плазму высокой плотности ($\sim 10^{18} \text{ м}^{-3}$) и работает в широком диапазоне энергетических и геометрических параметров [1]. ОЭС установки ПН-3 позволяет исследовать параметры потока плазмы в трудно доступных для других диагностик областях – в прозрачной кварцевой трубе под геликонной и ИЦР антеннами.

Для определения плазменных характеристик с помощью ОЭС основным вопросом является выбор атомной системы. Наиболее удобными атомными системами для измерения электронной температуры являются нейтральный гелий и гелиеподобные ионы. Отношение зависимостей сечений синглетных и триплетных переходов сильно зависит от энергии налетающего электрона:

$$R^{int/dip} = \frac{1}{2f_{ji}} \cdot \frac{1}{\frac{E}{\Delta E_{ji}} \cdot \ln \frac{E}{\Delta E_{ji}}} \text{ для } \frac{E}{\Delta E_{ji}} > 1 \quad (1)$$

Определение электронной температуры производится по измеренным значениям отношения интенсивностей [2].

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\nu_1 \cdot \langle \sigma_1 \cdot \nu \rangle_1 \cdot A_1 \cdot \sum A_k^{(2)}}{\nu_2 \cdot \langle \sigma_1 \cdot \nu \rangle_2 \cdot A_2 \cdot \sum A_k^{(1)}} \quad (2)$$

ν_1, ν_2 – частота перехода, $\langle \sigma_1 \cdot \nu \rangle_1, \langle \sigma_1 \cdot \nu \rangle_2$ – усредненные по максвелловскому распределению эффективные сечения возбуждения, A_1, A_2, A_k – вероятности переходов.

Для определения T_e применена зависимость отношения сечений синглетного перехода $3s \ 1S$ и $2p \ 1P$ (728,14 нм) к триплетному $3s \ 3S$ и $2p \ 3P$ (706,57 нм) для He I [3, 4].

На установке ПН-3 этот метод был применен для определения радиального распределения температуры для гелиевой и аргоновой плазмы (с помощью инжекции атомов гелия в плазму в небольших количествах). Профили электронных температур, определенные с помощью ОЭС, хорошо согласуются с результатами обработки результатов зондовых измерений.

Полученные профили T_e дают возможность определения радиального распределения нейтральных атомов и степени их ионизации.

Литература

- [1]. Шуровский Д.О., Кутузов Д.С., Бунин Е.А., Сухов А.Е., Брагин Е.Ю., Оптические методы диагностики для измерения параметров плазмы в геликонном разряде // ВАНТ, Термоядерный синтез, т. 45, вып. 2, 2022.
- [2]. Подгорный И.М. Лекции по диагностике плазмы. М.: Атомиздат, 1968.
- [3]. Development of laser-induced fluorescence system for diagnosis of ITER divertor plasmas. Moskalenko I.V., Vetrov S.I., Molodtsov N.A., Shuvaev, D. A., Shcheglov, D. A. // Plasma Devices and Operations. 2004. V. 12. P. 247.
- [4]. Диагностика инертных газов методом эмиссионной спектроскопии на установке ПН-3. Ветров С.И., Спицын А.В., Шуваев Д.А., Янченков С.В. // Физика плазмы, т. 32, № 5, 2006.

ОТБОР ПОЛИДИСПЕРСНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ВЧИ-РАЗРЯДЕ

Новиков Л.А., Дзлиева Е.С., Голубев М.С., Морозова М.Б.,
Павлов С.И., Карасев В.Ю.

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: leontynovikov@gmail.com*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.140

При экспериментальном исследовании пылевой плазмы [1], в частности, при внешних воздействиях, важно иметь устойчивую пылевую ловушку. Особенностью пылевых ловушек является возможность формировать объемную пылевую структуру [2]. Например, при воздействии магнитного поля объемная ловушка представляет большую проблему [3].

В условиях тлеющего разряда [4] проблемой исследования оказались неустойчивости самого разряда в сильном магнитном поле [5]. Обсуждаемая проблема не появляется в ВЧ разряде, но для объемной пылевой структуры необходим разряд индукционного типа (ВЧИ).

В настоящем сообщении представляются первые результаты по созданию объемных пылевых структур из полидисперсных пылевых частиц в условиях, близких к работам [6, 7]. Описываются эксперименты по отбору пылевых частиц с помощью методики, аналогичной [8]. Также представляются первые эксперименты по созданию пылевой плазмы в ВЧИ-разряде в магнитном поле до 100 Гс.

Работа поддержана РФФ, грант № 22-72-10004.

Литература

- [1]. Fortov V.E., Mofill G.E. Complex and dusty plasmas: from laboratory to space (New York: Taylor & Francis Group) 2010 p 418.
- [2]. Sato N. // AIP Conf. Proc. 2002, 649, p. 66.
- [3]. Karasev V.Yu., Dзлиева E.S., Ivanov A.Yu., Eikhvald A.I. // Phys. Rev. E., 2006, V. 74, P. 066403.
- [4]. Dзлиева E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I., Karasev V.Yu. // Plasma Sources Sci. Technol., 2020, V. 29, P. 085020.
- [5]. Герасимов Ю.В., Нефедов А.Н., Синельщиков В.А., Фортов В.Е. // ПЖТФ, 1998, Т. 24, В. 19, С. 62.
- [6]. Fortov V.E., Petrov O.F., Usachev A.D., Zobnin A.V. // Physical Review E, 2004, 70, 046415.
- [7]. Дзлиева Е.С., Майоров С.А., Новиков Л.А., Павлов С.И., Балабас М.В., Крылов И.Р., Карасев В.Ю. // Физика плазмы, 2022, т. 48, № 10, с. 914.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ БЫСТРОЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩИХ ПЛАЗМЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР

Паркевич Е.В., Хирьянова А.И.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: parkevich@phystech.edu*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.141

В работе обсуждаются фундаментальные проблемы визуализации неоднородных плазменных микроструктур в поле когерентного лазерного излучения, регистрируемого оптической линзовой системой. Детально рассматривается задача описания дифракции лазерного излучения на плазменных формированиях с целью выявления ключевых закономерностей в изменениях интенсивности и сдвига фазы зондирующего излучения. Для этого решается скалярное волновое уравнение Гельмгольца в первом Рытовском приближении. Смоделировано распространение углового спектра дифрагированной волны в свободном пространстве позади плазменных объектов. Получены основополагающие данные об изменениях характеристик излучения в выходной плоскости объектов и в их ближнем волновом поле в терминах расширенных дифракционных картин. Дополнительно рассмотрена задача регистрации дифракционных картин плазменных объектов оптической линзовой системой при наличии положительного и отрицательного дефокуса. Показано, что даже в самых простых приближениях прохождение лазерного излучения сквозь неоднородную плазму сопровождается сложными дифракционными эффектами. Данные эффекты усиливаются в ближней волновой зоне объекта и существенно искажают яркостные и фазовые картины плазменных микроструктур, которые в свою очередь претерпевают изменения при их регистрации оптической линзовой системой. Благодаря численному анализу удалось точнее описать визуализацию плазменных образований в поле когерентного лазерного пучка, регистрируемого оптической линзовой системой. Результаты численного анализа были верифицированы в эксперименте и находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными. Результаты работы могут найти широкое применение при обработке лазерных тенеграм и интерферограмм микроструктур плазмы, зарегистрированных при наличии сильных дифракционных эффектов.

Работа проведена при поддержке гранта Российского научного фонда, грант № 19-79-30086.

Литература

- [1]. E.V. Parkevich, A.I. Khirianova, T.F. Khirianov, K.T. Smaznova, D.V. Tolbukhin, V.M. Romanova, and S.A. Ambrozevich. Strong diffraction effects accompany the transmission of a laser beam through inhomogeneous plasma microstructures // *Physical Review E*. 2023 (In print).

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В РАЗЛИЧНЫХ ФАЗАХ СТОЯЧИХ СТРАТ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Павлов С.И., Дзлиева Е.С., Голубев М.С., Морозова М.Б., Новиков Л.А.,
Гасилов М.А., Карасев В.Ю.

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: s.i.pavlov@spbu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.142

В работе исследуется воздействие вариация ионного потока (силы ионного увлечения [1,2]) на механическое состояние пылевой плазмы в продольном магнитном поле. Изучается динамика вращательного движения и межчастичные расстояния в объемной пылевой структуре в том диапазоне магнитной индукции, когда электроны замагничены, но ионы не замагничены.

В используемой пылевой ловушке в стоячей страте, в её фазе, близкой к максимуму концентрации ионов и электронов, ионные потоки наиболее интенсивны. Рассматривается результат действия амбиполярного ионного потока в аксиальном магнитном поле на горизонтальные пылевые сечения. Экспериментальные условия соответствуют работе [3], в которой в объемной ловушке удерживаются два сорта частиц 5 мкм и 8 мкм. Данные условия подходят для удержания пылевых гранул размером 5 мкм в двух инертных газах, неоне и аргоне, при одинаковых параметрах разряда (давлении и токе). Замена рабочего газа приводит к изменению как силы ионного увлечения (из-за изменения массы ионов), так и плотности ионного потока и заряда пылевой частицы.

Полученные экспериментальные данные о скорости вращения и межчастичном расстоянии проанализированы с учетом изменения параметров плазмы в разных газах [4] и в разных фазах страты [5].

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-72-10004.

Литература

- [1]. Fortov V.E., Morfill G.E. Complex and dusty plasmas: from laboratory to space (New York: Taylor & Francis Group) 2010 418 pp.
- [2]. Khrapak S.A., Ivlev A.V., Morfill G.E., Thomas H.M. // Phys. Rev. E. 2002. V. 66. P. 046414.1.
- [3]. Павлов С.И., Дзлиева Е.С., Дьячков Л.Г., Новиков Л.А., Балабас М.В., Карасев В.Ю. // Физика плазмы, 2023, т. 49, № 10, с. 995.
- [4]. Дзлиева Е.С., Карасев В.Ю., Новиков Л.А., Павлов С.И., Голубев М.С., Машек И.Ч. // ЖТФ, 2023, т. 93, вып. 10, стр. 1429.
- [5]. Golubovskii Yu.V., Kozakov R.V., Maiorov V.A., Behnke J., and Behnke J.F. // Phys. Rev. E., 2000, V. 62, P. 2707.

СКВОЗНАЯ МОДЕЛЬ СТРУЙНОГО ВЧИ-РАЗРЯДА ПОНИЖЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

Шемахин А.Ю.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия,
shemakhin@gmail.com.*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.143

Актуальной задачей инновационного развития промышленности и проведения качественных изменений в современном индустриальном цикле является повышение надежности, долговечности изделий из материалов органической и неорганической природы и придание им качественно новых свойств. Одним из эффективных способов усовершенствования характеристик материалов является их обработка в струе плазмы высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления [1].

Плазма ВЧ-разрядов с продувом газа при давлении $p = 13,3 - 133$ Па применяется для модификации поверхностей различных материалов, таких как сталь, титан, полиэтилен, кожа, мех и др. [2].

Плазма, создаваемая данным видом разряда, обладает следующими свойствами: степень ионизации $10^{-4} - 10^{-5}$, концентрация электронов $10^{15} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$, электронная температура $1 - 4$ эВ, температура атомов и ионов в плазменном сгустке $0,2 - 0,3$ эВ, в плазменной струе $0,03 - 0,07$ эВ.

Полученные экспериментальные данные [1] показывают, что исследуемый вид разряда не относится ни к одному из существующих, так как в струе ВЧ-плазмы в вакуумной камере найдена как азимутальные H_ϕ , так и аксиальные компоненты E_z напряженностей электрического и магнитного полей, что для Н-формы разряда является нетипичным. Стоит заметить, что в разрядной камере обнаруживается только H_z и E_ϕ , то есть в разрядной камере разряд находится в Н-форме, как показывают результаты экспериментальных исследований [1]. К тому же рождение заряженных частиц происходит по всей длине вакуумной камеры, а не является потоком распадающейся плазмы. То есть струя является самостоятельным новым видом разряда, который можно называть «струйным разрядом».

Для описания струйного ВЧИ-разряда пониженного давления разработана математическая модель, включающая уравнение Больцмана для несущей компоненты плазмы, уравнение сохранения энергии для электронной температуры, телеграфные уравнения для ВЧ-компоненты плазмы, уравнение Пуассона в калибровке Лоренца для амбиполярной компоненты электромагнитного поля, уравнения неразрывности для электронов, ионов и метастабилей. Коэффициенты подвижности и диффузии определяются из функции распределения электронов по энергиям, записанной с учетом присутствия ВЧ-поля.

Таким образом, построена математическая модель, позволяющая рассчитывать основные характеристики разряда и струи, определять параметры слоя положительного заряда. В результате установлено, что при вышеуказанных режимах энергия ионов может варьироваться от 30 до 100 эВ, а плотность ионного тока от 0,5 до $15 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2}$.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-10055).

Литература

- [1]. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. Казань: Изд-во Казанского государственного университета, 2000.
- [2]. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления. Монография. Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2007

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ АТОМНОГО НОМЕРА Z УСЛОВИЙ ПРИМЕНИМОСТИ КВАЗИКЛАССИЧЕСКОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ И ИОНОВ

Шпатаковская Г.В.

*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: shpagalya@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.144

В работах [1–3] на основе предложенного в [4] метода проведен квазиклассический анализ экспериментальных и расчетных данных, представленных в таблицах NIST [5], по потенциалам ионизации $I_N^{(Z)}$ (эВ) в основном состоянии многозарядных ионов средних ($18 \leq Z \leq 54$) [1], тяжелых ($55 \leq Z \leq 95$) [2] и сверхтяжелых элементов ($85 \leq Z \leq 110$) [3].

Показано, что в специальных координатах потенциалы ионизации в изоэлектронных последовательностях ложатся на очень гладкие кривые, которые с хорошей точностью аппроксимируются простыми полиномами и отражают их основную зависимость от атомного номера Z . Последующая полиномиальная аппроксимация кусочно-непрерывной зависимости коэффициентов этих полиномов от числа электронов N_e воспроизводит данные таблиц NIST с точностью 1–2%.

Сравнение результатов для сверхвысоких атомных номеров с результатами для высоких и средних Z показывает, что общая картина с ростом Z становится более простой и прозрачной. Во-первых, уменьшается степень интерполяционных полиномов в изоэлектронных сериях с 3-2 до 2-1, во-вторых, становится более явной водородоподобное заполнение внешней электронной оболочки, в-третьих, сокращается число таблиц полиномиальных коэффициентов с пяти для средних до двух для сверхвысоких, хотя число электронов увеличивается.

Еще один пример использования квазиклассического приближения – аппроксимация потенциалов ионизации атомов лантанидов и актининов [6]. Здесь так же для актининов, более тяжелых гомологов, существенно упрощается зависимость потенциалов ионизации от атомного номера в случае последовательного заполнения внешних оболочек.

Тем самым подтверждается предсказываемое теорией улучшение условий применимости квазиклассического приближения с ростом Z в силу уменьшения параметра квазиклассичности $\sim Z^{-1/3}$.

Литература

- [1]. Шпатаковская Г.В. // ЖЭТФ, 2022, 162, 205-214.
- [2]. Шпатаковская Г.В. // Письма в ЖЭТФ, 2021, 114, 798 – 801.
- [3]. Шпатаковская Г.В. // Физика плазмы, 2023, 49, 1016 – 1023.
- [4]. Шпатаковская Г.В. // УФН, 2019, 189, 195.
- [5]. Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J. and NIST ASD Team (2022). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.10). [Online] Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2023, October 28].
- [6]. Шпатаковская Г.В. // Письма в ЖЭТФ, 2020, 111, 526 – 530.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕЛИКОННОЙ ПЛАЗМЫ МЕТОДАМИ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Шуровский Д.О., Кутузов Д.С., Нагель Н.Н., Москаленко И.В.

Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: Shurovskiy_DO@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.145

Создание плазмы с помощью геликонных волн получило широкое распространение – от использования геликонной плазмы для решения материаловедческих задач при производстве микросхем до плазменных космических двигателей [1]. В Курчатовском институте созданы установки ПС-1 и ПН-3 [2], предназначенные для экспериментального исследования плазменных процессов в геликонном разряде в рамках программы отработки прототипов плазменных ракетных двигателей. В докладе приведены результаты применения методов оптической эмиссионной спектроскопии для определения параметров плазмы упомянутых установок. Рабочими газами служили аргон, гелий и водород.

Проведены измерения доплеровских профилей линий атомов и ионов гелия и аргона в зависимости от таких макропараметров, как величина магнитного поля, расход рабочего газа и вкладываемая мощность.

Измерения проводились при помощи спектрографа-монокроматора SolarLS M-522. Использовались решетки 2400 и 1200 штр/мм, входная щель монокроматора работала при раскрытии от 10 до 50 мкм, что обуславливало аппаратную функцию прибора с шириной на полувысоте в диапазоне от 10 до 25 пм в интересующих нас областях видимого спектра. Аппаратная функция определялась по излучению линий металлов (Cu I и Ag I), а также гелий-неонового лазера для красной области спектра.

Измеренные температуры атомов и ионов [3] находятся в пределе до 4 эВ для иона гелия He II и до 5 эВ для атома аргона Ar I.

Литература

- [1]. Charles C. // J. Phys. D: Appl. Phys., V. 42, 2009, p. 163001.
- [2]. Шуровский Д.О. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 2, с. 97.
- [3]. Хаддлстоун Р., Леонард С., Диагностика плазмы, Москва, Мир, 1967, 516 с.

СИНТЕЗ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕДИ И ЦИНКА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

Смирнова К.В., Батукаев Т.С., Лебедев Ю.А.

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва, Россия,
smirnovakv1@gmail.com.*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.146

Наночастицы металлов и оксидов в последнее время привлекают большое внимание как одни из наиболее важных материалов из-за их улучшенных свойств, и эти материалы широко применяются в различных областях, например, в электронных устройствах [1] и катализе [2]. Существует множество подходов в реализации получения таких материалов, основанных на различных химических и физических методах [3]. В последние годы наблюдается тенденция к использованию газоразрядной плазмы для синтеза. При этом для реализации процесса при атмосферном давлении в основном используют дуговые разряды. Из-за сложности процесса реализации часто возникают сложности с контролем размера и состава получаемых частиц.

Мы предлагаем новый подход в получении ультрадисперсных материалов, основанный на использовании низкотемпературной газоразрядной плазмы тлеющего разряда. Установка представляла собой кварцевую трубку (высота 8 см) дно которой было выполнено из нержавеющей стали с отверстиями порядка 0,5 мм, через которые подавался воздух со скоростью 5 л/мин. Дно ячейки служило катодом. Сверху трубка закрывалась крышкой из фторопласта с отверстием под титановый анод. Межэлектродное расстояние составляло 5 мм. Ток разряда 50 мА. Время горения разряда 5 минут. На катод насыпали кристаллогидраты нитратов меди и цинка. Полученные частицы смывали со всех элементов ячейки дистиллированной водой в химический стакан, после чего сушили при температуре 50°C до полного испарения воды.

Внешний вид частиц и их элементный состав определяли с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM, Tescan Vega 3SBH, Чехия) с системой энергодисперсионного рентгеновского спектрального анализа (Aztec EDS, Oxford Instruments Ltd., Англия). Анализ показал, что полученные вещества являются оксидами с сложной и хорошо развитой морфологией поверхности. В случае использования нитрата меди мы получаем оксид меди CuO, используя нитрат цинка на выходе мы получаем оксид цинка ZnO. Так же проводились опыты при использовании смеси 1 моля нитрата цинка и 1 моля нитрата меди. В результате получался двойной оксид CuOZnO.

В заключение, с помощью тлеющего разряда воздуха получены частицы оксидов меди, оксидов цинка и двойные оксиды CuOZnO из нитратов меди и цинка, соответственно. Частицы обладают хорошо развитой поверхностью, что делает их потенциально используемыми в качестве катализаторов.

Литература

- [1]. Y. Lee, J. Choi, K.J. Lee, N.E. Stott, D. Kim, Large-scale synthesis of copper nanoparticles by chemically controlled reduction for applications of inkjetprinted electronics // *Nanotechnology* 19 (2008) 415604.
- [2]. L. Gao, Q. Zhang, Effects of amorphous contents and particle size on the photocatalytic properties of TiO₂ nanoparticles // *Scr. Mater.* 44 (2001) 1195e1198.
- [3]. D. Vollath, Plasma synthesis of nanopowders // *J. Nanopart. Res.* 10 (2008) 39e57.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В ПОЛИМЕРНЫХ МИШЕНЯХ С УЧЁТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАТОДНОЙ И АНОДНОЙ ПЛАЗМ В ДИОДНОМ ЗАЗОРЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ «КАЛЬМАР»

^{1,2,3}Смирнова А.Р., ³Бойков Д.С., ^{1,2}Казаков Е.Д., ³Ольховская О.Г., ^{1,2,3}Ткаченко С.И.

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), г. Долгопрудный, Россия, e-mail: anya4113@gmail.com

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

³Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.147

Для исследования прочностных характеристик различных материалов проводятся эксперименты по взаимодействию высокоэнергетичных пучков электронов с мишенями из этих материалов [1]. В результате эксперимента можно оценить степень разрушения поверхности, наличие отколов на тыльной стороне, измерить давление, оказываемое на мишень. Моделирование подобных экспериментов зачастую не учитывает некоторые особенности установок и дополнительных внешних факторов. В данной работе было проведено моделирование взаимодействия пучка электронов с мишенью, последующего появления анодной и катодной плазм, взаимодействия этих плазм в диодном зазоре и влияния данного взаимодействия на распространение ударных волн внутри мишени.

Эксперименты проводились на сильноточном ускорителе электронов «Кальмар» (ток до 40 кА, напряжение до 350 кВ, длительность импульса порядка 100 нс, энергия электронов в пучке порядка 0,35 МэВ). С помощью измерений полного падения напряжения рассчитывался ток пучка электронов, который в дальнейшем использовался при моделировании. Были получены хронограммы распространения ударных волн внутри мишени.

Моделирование воздействия РЭП на исследуемый образец проводилось с помощью разработанного в ИПМ им. М.В.Келдыша РАН кода MARPLE [2], дополненного моделью катода [3]. Вычисления производились в приближении однотемпературной 3-х мерной гидродинамической модели с учетом теплопроводности и объемных потерь энергии на тормозное излучение. Расчеты выполнены с использованием широкодиапазонных уравнений состояния вещества.

Получены и проанализированы результаты математического моделирования процессов, происходящих в диодном промежутке генератора сильноточных пучков релятивистских электронов «Кальмар». Исследовано влияние взаимодействия потоков плазмы с анода и катода на характер и скорость распространения ударных волн внутри полимерной мишени. Результаты моделирования совпадают с экспериментальными данными.

Экспериментальное исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Математическое моделирование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-21-00248).

Литература

- [1]. Садовничий Д.Н., Милёхин Ю.М. и др. // Физика горения и взрыва. 2022. Т. 58. № 2. С. 88-99.
- [2]. Пакет прикладных программ высокопроизводительных магнитоускоренной плазмы / Гасилов В.А. и др. // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011 No 20 36 с.
- [3]. Смирнова А.Р., Бойков Д.С. и др. // Сборник тезисов I Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, 20 – 24 марта 2023, ICRAF-2023. С. 211.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Степанов Н.О., Черкез Д.И., Спицын А.В.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва,
Россия, e-mail: Stepanov_NO@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.147

Одной из приоритетных задач при проектировании термоядерных реакторов (ТЯР) следующих поколений является изучение взаимодействия плазмы с обращенными к ней материалами (ОПМ). Так, ОПМ во время эксплуатации реактора будут взаимодействовать с большими стационарными тепловыми и корпускулярными потоками, которые будут приводить к эрозии поверхности, смещению атомов из узлов кристаллической решетки и активации. Помимо этого, будут происходить процессы захвата с последующей диффузией в теплоноситель тяжелого изотопа водорода – трития, влияющие на рециклинг топлива и накладывающие дополнительные ограничения, связанные с радиационной безопасностью, а совместное влияние всех перечисленных факторов способно провоцировать новые негативные эффекты [1]. Несмотря на важность изучения взаимодействия плазмы с ОПМ, эксплуатирующиеся сегодня ТЯР не в состоянии обеспечить нужные параметры плазменного потока и длительности импульса, на уровне ожидаемом в ИТЭР и ДЕМО. Поэтому, для проведения материаловедческих исследований, целесообразно создание высокопоточных источников плазмы. Безэлектродные источники на основе ВЧ-генераторов, в том числе геликонного типа способны создавать плазму с высокой плотностью и однородностью, чувствительную к внешним параметрам, таким как давление газа и величина магнитного поля [2], а также имеют ряд преимуществ, среди которых: возможность варьирования плотности и потока плазмы в широком диапазоне, отсутствие эродирующих электродов и высокая плотность плазмы $\sim 10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Для проведения исследований по взаимодействию дейтериевой плазмы с перспективными материалами ТЯР в НИЦ «Курчатовский институт» был собран экспериментальный стенд ГПИ-2, созданный на основе ВЧ-генератора мощностью 2 кВт и работающего на частоте 13,56 МГц [3]. Ранее, с помощью зондовой диагностики, были определены некоторые параметры плазмы: плотность ($n_e = 2,5 \times 10^9 \div 1 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$) и температура электронов ($T_e = 2,3 \div 7 \text{ эВ}$), в зависимости от величины вводимой мощности ($W = 300 \div 5000 \text{ Вт}$), давления дейтерия ($0,6 \div 6 \text{ Па}$) и магнитного поля в области геликонной антенны ($0 \div 90 \text{ мТл}$). На сегодняшний день завершен первый этап модернизации экспериментального стенда, включающий в себя: установку внутривакуумной катушки магнитного поля (до 0,4 Т) для возможности варьирования линейного профиля, оптимизацию геометрии геликонной антенны [4], создание зондов Ленгмюра с возможностью линейного перемещения, для определения радиального профиля плотности, автоматизацию сбора экспериментальных данных.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 8 «Физика изотопов водорода».

Литература

- [1]. M.J. Baldwin, D. Nishijima, M.I. Patino, et al. // Nuclear Materials and Energy, V. 36, 2023.
- [2]. Е.И. Кузьмин, И.В. Шиховцев // Физика плазмы. 2021. № 6. С. 507 – 517.
- [3]. Д.И. Черкез, Н.П. Бобырь, А.В. Спицын, С.С. Ананьев // Вопросы атомной науки и техники. 2020. № 3. С. 101 – 110.
- [4]. F.F. Chen // Plasma Phys. Control. Fusion, 1991, 33, 339.

ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ НАГРЕВ АРГОН-ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА СТЕНДЕ ПН-3

Бунин Е.А., Ишков Т.А., Казеев М.Н., Камин Д.В., Козлов В.Ф., Сухов А.Е.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Sukhov_AE@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.148

На стенде ПН-3 проводятся исследования по вкладыванию высокочастотной (ВЧ) мощности в плазменный поток с целью нагрева ионов в рамках работ по отработке второй ступени безэлектродного плазменного ракетного двигателя. В качестве метода нагрева выбран ионный циклотронный резонанс (ИЦР) [1].

Система ИЦР нагрева состоит из генератора ВЧ мощности с номинальной мощностью до $P_{ICR} = 10$ кВт на частоте $f_{ICR} = 1,8$ МГц. Данная частота вместе с имеющейся магнитной системой стенда ПН-3 позволяет выполнить резонансное условие $\omega = \omega_{ci}$ только для ионов водорода.

Источником плазмы служит геликонный плазменный разряд, работающий на частоте $f_{HEL} = 10$ МГц с мощностью до $P_{HEL} = 15$ кВт. Магнитная система стенда позволяет либо обеспечить эффективный геликонный разряд в водородной плазме в первой секции разрядной камеры, либо обеспечить резонансное условие ИЦР нагрева во второй секции. И в первом, и во втором случае так же наблюдается недостаток концентрации свободных заряженных частиц $n_e = 10^{11}$ см³ для ввода электромагнитных волн на частоте генератора системы ИЦР нагрева [2].

Для разрешения данной проблемы было предложено в качестве рабочего тела использовать смесь аргона и водорода. Эмпирически были определены оптимальные значения расходов газов и конфигурация магнитного поля стенда для ввода ВЧ мощности системы ИЦР нагрева.

Критерием эффективности ввода мощности ИЦР нагрева служили измерения таких параметров плазменного потока, как электронная концентрация, тяга, средняя энергия ионов посредством диагностического комплекса стенда ПН-3. Также эффективность подтверждалась калориметрическими измерениями потока в магнитном сопле.

В работе представлены условия экспериментов и результаты измерений зависимости перечисленных параметров от конфигурации внешнего магнитного поля и вкладываемой ВЧ мощности. Для энергии ионов наблюдается резонансная зависимость энергии ионов от значения внешнего магнитного поля, и близкая к линейной зависимость от вкладываемой мощности. Полученные результаты свидетельствуют о вводе высокочастотной мощности на частоте ионного-циклотронного резонанса в линейной плазменной установке в плазменный поток смеси газов.

Литература

- [1]. Тимофеев А.В. О ВЧ-нагреве неоднородной столкновительной плазмы в условиях ИЦР // Физика плазмы. 2015. Т. 41. №. 11. С. 946 – 954.
- [2]. Swanson D.G. Plasma waves. CRC Press, 2020.

РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕЛИКОННОГО ИСТОЧНИКА ПЛАЗМЫ И СИСТЕМЫ НАГРЕВА ИОНОВ В СОСТАВЕ МАКЕТА МОЩНОГО БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА СТЕНДЕ Е-1

Бунин Е.А., Ишков Т.А., Камин Д.В., Сухов А.Е., Жильцов В.А., Коробцев С.В.

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия,
e-mail: Sukhov_AE@nrcki.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.149

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» проводятся плазменные эксперименты на макете безэлектродного плазменного ракетного двигателя (БПРД) [1, 2], которым является стенд Е-1.

Целью работы является рассмотрение основных технических систем, реализованных на стенде Е-1, а также получение параметрических зависимостей выходных параметров истекающего плазменного потока, с последующей оптимизацией этих параметров.

Концепция БПРД предусматривает сочетание мощного геликонного источника плазмы (ГИП) с последующим ионно-циклотронным резонансным нагревом (ИЦРН). Обе эти системы подразумевают наличие магнитного поля, служащего как для магнитного удержания плазмы, так и для создания направленного плазменного потока. На стенде Е-1 для создания магнитного поля необходимой конфигурации и амплитуды предполагается использование катушек из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) второго поколения с охлаждением криокулерами в вакуумном криостате.

ГИП состоит из высокочастотного (ВЧ) генератора мощностью 50 кВт, работающего на частоте 13,56 МГц, согласующего Г-контура и полуволновой левовинтовой антенны. Данная система позволяет холодную плотную плазму в источнике с плотностью электронов $n_e > 10^{19} \text{ м}^3$ [3].

Использование системы ИЦРН является основным механизмом передачи ВЧ мощности рабочему телу. Данная система представляет собой ВЧ генератор мощностью 150 кВт, работающий на частоте 0,5 МГц, согласующий Т-контур и полуволновую правовинтовую антенну. Для преобразования энергии электромагнитной волны во вращательную энергию частицы, выполняется следующее условие $\omega_{ci} \approx \omega_0$, где ω_{ci} – циклотронная частота ионов, а ω_0 – рабочая частота генератора.

Для диагностики выходных параметров БПРД используется диагностический комплекс, включающий в себя корпускулярные диагностики и микроволновую интерферометрию.

В работе приводится описание основных технических систем стенда Е-1. Представлены результаты обработки и анализа данных, полученных при помощи диагностического комплекса. В результате данной работы был проведен поиск оптимальных параметров создания и последующего нагрева плазмы.

Литература

- [1]. Zhil'tsov V.A., Kulygin V.M. Fusion and Space // Physics of Atomic Nuclei. 2019. Т. 82. №. 7. С. 963 – 976.
- [2]. Takahashi K. Helicon-type radiofrequency plasma thrusters and magnetic plasma nozzles // Reviews of Modern Plasma Physics. 2019. Т. 3. №. 1. С. 1 – 61.
- [3]. Rapp J. et al. Performance of the plasma source and heating concept for the Prototype-Material Plasma Exposure eXperiment (Proto-MPEX). MPEX Team, 2018. №. IAEA-CN-258.

СТОЛКНОВЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ДИФFUЗНЫХ СТРУЙ И СТРИМЕРОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ И АЗОТЕ

Тарасенко В.Ф., Виноградов Н.П., Бакшт Е.Х., Панченко А.Н.

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия, VFT@loi.hcei.tsc.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.150

Последние годы возрос интерес к изучению столкновений лидеров и стримеров при импульсных разрядах в воздухе и других газах различного давления. Исследовались стримеры в промежутках остриё – остриё [1] и лезвие – лезвие [2]. Столкновение лидеров наблюдалось при распространении отрицательной молнии по направлению к Земле [3], а также в воздухе атмосферного давления при метровых промежутках [4]. В работах [5, 6] изучалось взаимодействие диффузных струй в длинных трубках из диэлектрика, заполненных газами низкого давления.

Цель настоящей работы – исследовать столкновение плазменных диффузных струй и стримеров с различной и одинаковой полярностью фронта и определить в области взаимодействия спектры излучения, параметры разряда, цвет и форму плазменных образований.

При проведении экспериментов применялись две установки. В первой, стримеры формировались в режиме однократных импульсов между двумя параллельными электродами в виде лезвий длиной 30 см [2]. Длина промежутка, который заполнялся азотом при давлении от 10 до 2280 Торр составляла 1,2 или 2 см. Импульсы напряжения амплитудой ~200 кВ и длительностью на полувывоте при согласованной нагрузке ≈ 3 нс подавались на электроды от генератора РАДАН-220. Во второй установке плазменные диффузные струи (ПДС), которые состояли из стримеров [6], инициировались в кварцевой трубке длиной 215 см от плазмы ёмкостного разряда, которая создавалась в импульсно-периодическом режиме от двух генераторов. Амплитуда импульсов напряжения составляла 7 кВ, а их частота 21 кГц. Использовались генераторы как одинаковой полярности, так противоположной. Трубка заполнялась атмосферным воздухом до давлений 0,4, 1, 1,5 и 2 Торр.

Эксперименты на первой установке показали, что при высоких давлениях в месте встречи стримеров с разной полярностью фронта светимость разряда в видимой области спектра уменьшается, а приведённое электрическое поле (E/p) увеличивается. Увеличение E/p позволяло достигать порог генерации в азоте на длине волны 337,1 нм при высоком давлении азота. На второй установке были получены данные об излучении и форме ПДС при их столкновении. При разной полярности фронта стримеров в ПДС светимость разряда в месте их встречи увеличивалась, а при одинаковой уменьшалась. ПДС, которые формировались в трубке, имели цвет, спектры излучения и скорость распространения фронта свечения подобные наблюдаемым для стримеров в «столбчатых» спрайтах [7].

Литература

- [1]. Shi W., Zhang Q. // IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46 (2), 358–362.
- [2]. Panchenko A.N., Sorokin D.A., Tarasenko V.F. // Prog. Quantum Electron. 2021, 76, 100314.
- [3]. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001.
- [4]. Kochkin P.O., van Deursen A.P.J., Ebert U. // J. of Physics D: Appl. Phys. 2015, 48, 025205.
- [5]. Shishpanov A.I., Ivanov D.O., Kalinin S.A. // Plasma Research Express, 2019, 1 (2), 025004.
- [6]. Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Panarin V.A., Vinogradov N.P. // Plasma Physics Reports, 2023, 49 (6), 786–794.
- [7]. Stenbaek-Nielsen H.C., Kanmae T, McHarg M.G., Haaland R. // Surveys in Geophysics, 2013, 34, 769–795.

КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДЕ МЕТАНА В ВОДЕ С УЧЕТОМ РОСТА ПЛАЗМЕННОГО ПУЗЫРЯ

Лебедев Ю.А., Татаринов А.В., Эпштейн И.Л., Титов А.Ю.

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия,
e-mail: lebedev@ips.ac.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.151

Неравновесные разряды в различных жидкостях являются объектом интенсивного исследования в последние десятилетия [1, 2]. СВЧ разряд является эффективным средством проведения плазмохимических реакций в жидких средах. В настоящей работе приведены результаты моделирования и экспериментов в СВЧ-разряде в метане, поток которого подавался в воду через трубку центрального электрода-антенны. Разряд представляет собой последовательность растущих на торце электрода-антенны пузырей, которые достигнув определенного размера, отрываются от электрода, всплывают и схлопываются на поверхности воды. После отрыва от электрода разряд в пузыре прекращается, и пузырь с продуктами, образовавшимися в результате плазмо-химических процессов, поднимается вверх. Проводился хроматографический анализ состава продуктов реакций.

При моделировании исследуется кинетика процессов в пузыре, объем которого вычисляется на каждом шаге по времени. Для частиц каждого сорта решается уравнение баланса числа частиц. Расширение пузыря с плазмой происходит за счет следующих процессов: наличие постоянного потока метана через подводящую трубку; испарения окружающей воды внутрь пузыря с плазмой; изменения суммарного числа частиц за счет плазмо-химических процессов; изменение температуры плазмы за счет химических реакций и омического нагрева. Для вычисления газовой температуры плазмы используется уравнение теплопроводности. Предполагается также, что вся СВЧ мощность расходуется исключительно на нагрев электронов плазмы.

Проведенное моделирование позволяет определить характерное время роста пузыря до момента его полного отрыва от электрода. Характерное приведенное поле в момент отрыва пузыря достигает значений 30–40 Тд при поглощенной плазмой мощности в 200 Вт. Основными ионами плазмы являются $C_2H_2^+$ и OH^- . Основными продуктами разложения являются водород и монооксид углерода. Согласие результатов моделирования и эксперимента удовлетворительное.

Работа выполнена в рамках государственной программы ИНХС РАН.

Литература

- [1]. Bruggeman P. et al. // Plasma Sources Science & Techn., 2016, V. 25, 053002.
- [2]. Лебедев Ю.А., Физика плазмы, 2017, Т. 43, С. 577 – 588.

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРЯДОВ ПОНИЖЕННОГО И АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ТЕЛА ВИБРАТОРНОЙ АНТЕННЫ

¹Усачёнок М.С., ¹Симончик Л.В., ²Богачев Н.Н., ²Андреев С.Е.

¹*Институт физики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,
e-mail: m.usachonak@dragon.bas-net.by*

²*ИОФ РАН, г. Москва, Россия, e-mail: bgniknik@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.152

В настоящее время активно разрабатываются адаптивные («умные») системы беспроводной передачи данных различного назначения, такие как программноопределяемые радиосистемы, системы связи поколения 6G, системы радиолокации, навигации и радиоэлектронной борьбы [1]. Для таких систем необходимы антенны с возможностью программируемого электронного управления их параметрами и характеристиками, например, плазменные антенны. Плазменные антенны можно условно разделить на два класса: первый – плазма является частью излучающего элемента антенны (вибраторные, рамочные антенны) и второй – плазма служит для управления прохождением и экранированием радиоволн (например, антенна барабанного типа) [2]. В работе [3] подробно рассмотрена плазменная антенна вибраторного типа, использующая разряд низкого давления в качестве излучающего тела. Данная же работа посвящена определению параметров разрядов при пониженном и атмосферном давлениях, необходимых для их эффективного применения в качестве излучающего тела подобной антенны.

Плазменная антенна представляла собой газоразрядную трубку, частично помещенную в коаксиальный резонатор с экраном. Диаметр экрана 10 см, длина выступающей части разрядной трубки 12,5 см. Расстояние от плоскости экрана до центральной жилы СВЧ разъема, служащего для подачи СВЧ сигнала в резонатор с разрядной трубкой, 3,5 см. В эксперименте использовалась газоразрядная лампа ГШ-5 (неон, 70 Торр). Определены ее максимальный реализуемый коэффициент усиления, азимутальная диаграмма направленности и диаграмма направленности по углу места. Показано, что антенна имеет круговую азимутальную диаграмму направленности с одним главным лепестком в направлении 60° по углу места (отсчет от плоскости экрана). При плотности электронов более 10^{15} см^{-3} максимальный коэффициент усиления (КУ) плазменной антенны составляет более –6 дБ. Полученные характеристики сравнивались с характеристиками подобной антенны, в которой плазменный столб был заменен медным стержнем, и показано, что КУ плазменной антенны близко к КУ подобной металлической антенны с излучающим телом меньшего диаметра. Возникшее различие, вероятно, обусловлено явлением контракции разряда. Полученные экспериментальные данные сопоставлены с результатами моделирования, выполненного в среде программы COMSOL Multiphysics. Созданная численная модель позволила оценить возможность реализации плазменной антенны с газовым разрядом при атмосферном давлении в качестве излучающего тела. Показано, что определяющей характеристикой применения плазмы является ее проводимость. Для разряда при атмосферном давлении максимальный КУ реализуется при плотности электронов более 10^{16} см^{-3} и проводимости более 1000 Сим/м.

Полученные результаты важны для развития быстродействующих адаптивных систем радиоэлектроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов БРФФИ № T21PM-120 и РЦНИ № 20-58-04019 Бел_мол_a.

Литература

- [1]. Liu Y. et al. // Sensors. 2022. Т. 22. №. 24. С. 9930.
- [2]. Borg G.G. et al. // Physics of Plasmas. 2000. Т. 7. №. 5. С. 2198–2202.
- [3]. Богачев Н.Н. и др. // Физика плазмы. 2015. Т. 41. №. 10. С. 860 – 866.

ГАЗОКИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ПЛАЗМЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА В ПОРОШКАХ СМЕСИ $\text{TiO}_2 + \text{Cu}$

Логвиненко В.П., Вафин И.Ю., Воронова Е.В., Нугаев И.Р., Борзосеков В.Д.,
Соколов А.С., Летунов А.А., Князев А.В., Степахин В.Д.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва,
Россия; ildar@fpl.gpi.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.153

Плазмохимический синтез материалов с использованием СВЧ-излучения находит в последнее время широкое применение [1, 2]. В основе синтеза лежит способность микроволнового излучения инициировать цепные, многократно повторяющиеся реакции между реагентами. Состав образующихся частиц и их распределение по размерам определяются условиями эксперимента, что придает актуальность измерениям температуры. Реакции синтеза катализаторов на основе меди проводились с использованием СВЧ-излучения мощностью 300 кВт, импульс длился 8 мс. Концентрация меди менялась в пределах от 0,1% до 20% по весу. Излучение детектировалось спектрометром AvaSpec-3648-USB2, имеющим следующие характеристики: диапазон длин волн 367–909 нм, спектральное разрешение 0,45 нм, размер пикселей 0,15 нм. Пробой в смесях порошков обеспечивался применением инициатора двух типов: 1) хаотически сплетенные плоские отрезки нержавеющей стали и 2) упорядоченная решетка из серебряной или никелевой проволоки. В реакциях с медью использовался инициатор первого типа. Температура измерялась по спектру излучения γ -системы молекулы TiO в начале импульса гиротрона, через 4 мс после начала импульса и в конце свечения молекулы – через 8 мс после начала импульса. Для вычисления газокинетической температуры использовалось отношение амплитуды канта R-ветви, детектируемого на 705,42 нм и значение интенсивности подложки в непосредственной близости от него [3]. В таблице представлены значения вычисленной температуры в разные моменты времени для порошков с содержанием меди различной концентрации.

| Состав порошка | Т, К | | |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| | начало импульса | середина импульса | конец импульса |
| $\text{TiO}_2 + 0,1\% \text{ Cu}$ | 6100 ± 500 | 5600 ± 500 | 6000 ± 500 |
| $\text{TiO}_2 + 1\% \text{ Cu}$ | 5400 ± 500 | 5500 ± 500 | 5300 ± 500 |
| $\text{TiO}_2 + 2\% \text{ Cu}$ | 5200 ± 500 | 5600 ± 500 | 6400 ± 500 |
| $\text{TiO}_2 + 5\% \text{ Cu}$ | 5400 ± 500 | 5700 ± 500 | 5100 ± 500 |
| $\text{TiO}_2 + 10\% \text{ Cu}$ | 5600 ± 500 | 5600 ± 500 | 6000 ± 500 |
| $\text{TiO}_2 + 20\% \text{ Cu}$ | 5000 ± 500 | 5600 ± 500 | 5800 ± 500 |

Таблица демонстрирует неизменность температур в течение импульса для всех порошков, независимо от состава смеси. Таким образом, содержание меди не оказывает заметного влияния на тепловой баланс реакции синтеза катализаторов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание ГЗ БВ10-2024) «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

Литература

- [1]. N.N. Skvortsova, N.S. Akhmadullina, G.M. Batanov, et al. EPJ Web Conf. 149 (2016) 02016.
- [2]. N.S. Akhmadullina, N.N. Skvortsova, E.A. Obratsova, V.D. Stepakhin, E.M. Konchekov, Yu.F. Kargin, O.N. Shishilov, Journal of Physics: Conf. Series 941 (2017) 012034.
- [3]. J. Hermann, A. Perrone and C. Dutouquet // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2001. V. 34. P. 153 – 164. doi: 10.1088/0953-4075/34/2/303.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СМЕШЕНИЯ ПОТОКА ВОЗДУХА С ДОЗВУКОВОЙ И СВЕРХЗВУКОВОЙ ВТОРИЧНОЙ СТРУЕЙ

Волков Л.С., Фирсов А.А.

*Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: volkov.ls@phystech.edu*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.154

В данной работе исследуется воздействие плазменных образований на особый тип течения газов, который формируется при инъекции вторичной поперечной струи газа в сверхзвуковой поток воздуха через отверстие на плоской поверхности. Это течение встречается, например, в некоторых типах авиационных двигателей при инъекции горючего топлива в сверхзвуковые камеры сгорания. В последние десятилетия предлагаются и исследуются разнообразные способы интенсификации смешения газов в данном течении, что необходимо для повышения эффективности двигателей [1].

Искровые разряды рассматриваются некоторыми исследователями [2] как источник возмущений, позволяющий стимулировать развитие неустойчивости в сдвиговом слое на границе поперечной струи, и, таким образом, способствовать смешению газов. Механизм воздействия разряда на течение обусловлен, в основном, импульсным нагревом, который приводит к формированию ударной волны и расширяющейся тепловой каверны. В работе [3] был обоснован выбор оптимальной частоты импульсного нагрева.

Целью данной работы было сравнение интегрального критерия эффективности смешения [3] при следующих способах инъекции и параметрах импульсного нагрева:

- а) инъекция: через инжектор в форме цилиндра или через сверхзвуковое сопло Лавалья,
- б) местоположение разряда: на кромке отверстия инжектора или в канале инжектора,
- в) энергия тепловыделения: от 5 до 25 мДж за один импульс.

Для решения поставленной задачи было выполнено численное моделирование в российском ПО FlowVision. Путем решения нестационарных уравнений Навье – Стокса (УНС), осредненных по Рейнольдсу, была рассчитана эволюция характеристик течения. Использовалась модель турбулентности KEFV [4]. Электрический разряд моделировался с помощью объемного локального источника тепла, который был задан как дополнительный член в УНС. В качестве газа вторичной струи, моделирующего топливо, был использован CO_2 . Базы данных с информацией о плотности, теплоемкости и транспортных коэффициентах равновесной плазмы в средах воздуха и CO_2 при высоких температурах (до 50000 К) были взяты из [5, 6]. Выбранные параметры течения позволяют воспроизвести исследуемое явление в эксперименте на оборудовании, доступном в ОИВТ РАН: число Маха в потоке воздуха – 2; коэффициент динамического напора ~ 1 , диаметр отверстия инжектора – 3 мм, температура воздуха – 170 К, давление – 22 кПа.

Были получены локальные характеристики течения и рассчитан интегральный критерий эффективности смешения. Показано, что в отдельных случаях, благодаря воздействию электрических разрядов на течение, значение интегрального критерия эффективности смешения может повышаться более чем на 15%.

Исследование поддержано грантом РФФИ №21-79-10408.

Литература

- [1]. Q. Liu et al. // (2020) Progress in Aerospace Sciences 119 100636.
- [2]. W. Hongyu et al. // (2023) Physics of Fluids 35 (9) 96101.
- [3]. L.S. Volkov and A.A. Firsov. // (2023) Computer Research and Modeling 15 (4) 845–860.
- [4]. S.V. Zhluktov and A.A. Aksenov // (2015) Computer Research and Modeling 7 (6) 1221–1239.
- [5]. C. Catalfamo et al. // (2009) European Phys. J. D. 54 (3) 613–621.
- [6]. M. Capitelli et al. // (2013) Fundamental Aspects of Plasma Chemical Physics. Springer New York 74 273–347.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОКА ПУЧКА В ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКАХ И УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ НА ОСНОВЕ ДУГИ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Воробьёв М.С., Коваль Н.Н., Шин В.И., Москвин П.В., Девятков В.Н., Мокеев М.А.

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.155

Источники электронов с плазменными катодами широко используются в науке и технике [1]. В таких источниках, независимо от типа разряда, используемого для генерации эмиссионной плазмы в плазменном катоде, используются системы стабилизации тока пучка. При генерации импульсных пучков с длительностью импульса порядка сотен микросекунд и даже меньше система стабилизации тока пучка представляет собой отдельное сложное техническое решение, поскольку должна иметь максимально возможную глубину обратной связи и обрабатывать неустойчивости за время, значительно меньшее длительности импульса тока пучка, т.е., обеспечивать частоту обратной связи порядка 1 МГц, что может оказаться очень сложным и дорогостоящим решением. Стабилизация тока пучка для импульсных источников особенно важна, когда речь идет об управлении мощностью пучка для формирования необходимого температурного поля на поверхности детали [2, 3].

В данной работе рассматриваются методы введения самосогласованной обратной связи в источниках электронов [4] с плазменными катодами на основе дугового разряда низкого давления с сеточной стабилизацией границы эмиссионной плазмы и плазменным анодом с открытой границей плазмы. Рассмотрен как вакуумный случай, так и плазмонаполненный ускоряющий зазор, анодная плазма в котором создается самим электронным пучком, и концентрация которой зависит от условий генерации пучка (ускоряющего напряжения, плотности тока пучка, давления газа, величины и конфигурации ведущего магнитного поля и т.д.). При этом одним из дестабилизирующих факторов является изменение условий генерации в течение субмиллисекундного импульса тока пучка. Предложены методы увеличения глубины обратной связи за счет использования операционных усилителей.

Показано, что использование в таких системах отрицательной обратной связи по потоку ионов в плазменный эмиттер из ускоряющего промежутка позволяет обеспечить воспроизводимость режимов генерации и повторяемость процессов воздействия пучка на поверхность металлических материалов.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10015-П).

Литература

- [1]. Эмиссионная электроника / Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко. Под ред. Ю.С. Протасова. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 596 с.
- [2]. M. Vorobyov, T. Koval, V. Shin, P. Moskvin, My Kim An Tran, N. Koval, K. Ashurova, S. Doroshkevich, M. Torba. Controlling the Specimen Surface Temperature During Irradiation With a Submillisecond Electron Beam Produced by a Plasma-Cathode Electron Source // IEEE Transactions on Plasma Science. 2021. V. 49. No. 9. P. 2550–2553.
- [3]. M.S. Vorobyov, N.N. Koval, P.V. Moskvin, A.D. Teresov, S.Yu. Doroshkevich, V.V. Yakovlev, V.I. Shin. Electron beam generation with variable current amplitude during its pulse in a source with a grid plasma cathode // Journal of Physics: Conference Series 1393 (2019) 012064, doi:10.1088/1742-6596/1393/1/012064.
- [4]. N.N. Koval, S.V. Grigoryev, V.N. Devyatkov, A.D. Teresov and P.M. Schanin. Effect of Intensified Emission During the Generation of a Submillisecond Low-Energy Electron Beam in a Plasma-Cathode Diode // IEEE Transactions on plasma science. 2009. V. 37, No. 10. P. 1890–1896.

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В РАЗРЯДЕ МАГНЕТРОННОГО ТИПА

Есиналин А.А., Желтухин В.С., Лучкин А.Г., Савин А.Ю.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия,
esalibek453@gmail.com, vzheltukhin@gmail.com, luchkin_a.g@mail.ru,
aysavin01@gmail.com*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.156

Магнетронное распыление широко применяется для нанесения тонких покрытий. Серьезным недостатком этого метода распыления является низкий коэффициент использования целевого материала [1]. Качество пленки очень чувствительно к воздействию частиц плазмы. Поэтому важно контролировать структуру магнетронного разряда не только вблизи катода, но и перед подложкой. Эффективным инструментом для достижения этой цели является численное моделирование. Для получения адекватных результатов модель должна быть самосогласованной и учитывать весь выброс при как можно меньшем количестве допущений и упрощений. Средством разработки такой модели может быть, в частности, программное обеспечение Comsol Multiphysics [2].

Рассмотрен разряд постоянного тока в перекрещивающихся полях между плоскими электродами в цилиндрической системе координат с размещением постоянных магнитов под катодом. Межэлектродное расстояние 9,4 см, радиус электродов 3,75 см, напряжение на катоде 125 В, индукция магнитного поля 0,8 мТл. Плазмообразующий газ аргон. Давление в расчете варьировалось от 66,7 Па до 0,02 Па.

Для моделирования разряда использованы модули “Plasma” и “Magnetic field” [2]. В модуле Plasma описывается состояние плазмы с помощью уравнений баланса электронов, ионов и метастабильных атомов, сохранения энергии электронов, импульса электронов и уравнения Пуассона. Модуль “Magnetic field” используется для расчета распределения постоянного магнитного поля из уравнений Максвелла.

Выполнены сравнительные расчеты характеристик разряда с магнитным полем и в отсутствие магнитного поля. Получены пространственные распределения концентрации электронов, ионов, метастабильных атомов, электронной температуры, потенциала электрического поля при различных давлениях плазмообразующего газа.

Результаты расчетов показали, что наложение магнитного поля приводит к более равномерному распределению плазмы по объему устройства, увеличению концентрации электронов и уменьшению электронной температуры. Алгоритм расчета с магнитным полем требует почти в 2 раза больше шагов до достижения установившегося состояния. При давлении меньше 0,1 Па расчет расходится, что может быть связано как с тем, что гидродинамическая модель, использованная в модуле «Plasma», не соответствует характеру процессов в разряде при низких давлениях, так и с неустойчивостью численного метода.

Литература

- [1]. Swann S. Magnetron sputtering // Physics in technology. 1988. Т. 19. № 2. С. 67.
- [2]. Comsol Multiphysics Simulation Software URL:<https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЧ РАЗРЯДА С ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Желтухин В.С., Каюмов Р.Р., Гашигуллин К.А., Гайсин А.Ф.

Казанский национальный исследовательский технический университет, г. Казань, Россия, e-mail: vzheltukhin@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.157

Неравновесная низкотемпературная плазма электрического разряда атмосферного давления в жидкостях, между твердым и жидким электродами, а также между жидкими электродами привлекли внимание исследователей ввиду их довольно широких применений, связанных с защитой окружающей среды и медициной: генерирование интенсивного УФ излучения, ударных волн и активных радикалов. Электрические разряды с жидкими электродами особенно пригодны для очистки от загрязнений, стерилизации, очистки и полировки металлов и сплавов [1, 2].

В работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследований ВЧ разряда с электролитическими электродами при атмосферном и пониженном давлениях в широком диапазоне параметров разряда и различных конфигураций разрядных устройств с разными составами и концентрациями электролита.

В результате экспериментальных исследований установлены основные закономерности формирования вольтамперных характеристик, колебаний тока и напряжения, структур, распределений потенциала и напряженности электрического поля, плотностей тока на электродах, оптические неоднородности конвективных газовых потоков, деформации поверхности жидких сред, пространственные распределения температур на поверхности жидкости и твердых тел. Установлено, что в ВЧ электрических разрядах с жидкими электродами концентрация электронов составляет $n_e = 10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$, электронная температура $T_e = 1,1 - 1,4 \text{ эВ}$, колебательная T_v и вращательная T_r температуры – от 900 до 4800 К.

Разработана обобщенная физико-математическая модель многофазной среды «жидкость-газ-плазма» в условиях горения ВЧ разрядов с жидкими электродами. Исследованы упрощенные модели электрических разрядов ВЧ тока, что позволило установить и теоретически обосновать наличие слоев положительного и отрицательного зарядов в структуре разрядов, оценить величину напряженности электрического поля на межфазной границе «жидкость-газ» струйного электрода. Результаты моделирования согласуются с данными экспериментальных исследований.

Обоснован механизм зажигания ВЧ разряда с жидким струйным электродом. Разряд зажигается в области распада струи и перехода ее в капельную фазу в результате усиления тока, протекающего по струйному электроду, возникновения электрического поля напряженностью свыше 10^9 В/м , и автоэлектронной эмиссии первичных электронов из жидких электродов.

В результате экспериментальных исследований установлено, что ВЧ разряд с жидкими электродами может быть эффективно применен для очистки поверхностей от загрязнений, удаления диэлектрических покрытий и других процессов обработки материалов.

Литература

- [1]. Сон Э.Е. и др. // (2014) Теплофизика высоких температур, 52 (4) 512 – 519.
- [2]. Bruggeman P.J., et al. // (2016) Plasma Sources Science and Technology, 25 (5) 053002.

ПРОЦЕСС ИОНИЗАЦИИ В СВЧ-РАЗРЯДЕ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ, ПОДДЕРЖИВАЕМОМ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ

Жуков В.И., Карфидов Д.М., Богданкевич И.Л., Андреев С.Е.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва,
Россия, e-mail: zhukov.vsevolod@physics.msu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.158

Исследовался процесс ионизации в СВЧ-разряде, поддерживаемом поверхностной электромагнитной волной (ПЭВ) [1]. Разряд возбуждался волноводным аппликатором ПЭВ ($f = 2,45$ ГГц, $\lambda_0 = 12,25$ см) в кварцевой трубке, заполненной аргоном при давлении $10^{-2} - 10^{-1}$ Торр. Реализовывался длинный плазменный столб (с длиной $L \gg \lambda_0$) со средней концентрацией электронов n_e , значительно превышающей критическую концентрацию для ПЭВ [2]: $n_{\min} = (1 + \varepsilon_d)n_c$, где ε_d – диэлектрическая проницаемость кварца, а n_c – критическая концентрация плазмы. В экспериментах измерялись скорости фронта ионизации, частоты ионизации, а также радиальные и продольные распределения плотности плазмы. Абсолютные значения средней по сечению концентрации электронов определялись по дисперсионному соотношению ПЭВ [3], связывающему концентрацию электронов с измеряемой длиной поверхностной волны. Для измерений скорости нарастания (частоты ионизации) средней по сечению концентрации электронов использовалась диагностика методом проходящих СВЧ-волн (5,5 – 7,5 ГГц) с использованием волноводной системы [4]. При $v_{en} \ll \omega$ (v_{en} – частота столкновения электронов с нейтральными атомами, ω – частота СВЧ-поля) длина релаксации энергии электронов $l_e \gg a$ (a – радиус трубки), а температура электронов $T_e = \text{const}$ по сечению разряда. Таким образом, распределения плотности плазмы были измерены по интегральному свечению плазмы с помощью коллимированных фотодетекторов. Радиальные профили были получены методом поперечных снимков с последующей обработкой по методу Абеля.

Создана численная модель, моделирующая распределение поля ПЭВ по плазменному столбу, заданному с помощью модели Друде для низкотемпературной плазмы [4] и не учитывающая процесс ионизации. Данная модель позволяет исследовать распределение поля ПЭВ внутри и снаружи плазмы в зависимости от заданных значений $n_e(r)$ и v_{en} , соответствующих эксперименту.

Начальный процесс развития разряда был смоделирован с помощью электромагнитного кода КАРАТ, в основе которого лежит PiC метод [5]. Длина системы не превышала λ_0 , что характерно для антенных систем [6]. Диапазон частот менялся от 0,5 до 2,5 ГГц с шагом 0,5 ГГц. Код позволил детально исследовать характерные области, где концентрация проходит критическую n_c и $2n_c$, соответствующую пороговой для распространения ПЭВ.

Литература

- [1]. Trivelpiece A.W. Slow wave propagation in plasma waveguides, the DP-degree Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, 1958.
- [2]. Moisan M., Zakrewski Z. // J. Phys. D: Appl. Phys., 1991, V. 24, P. 1025.
- [3]. Zhelyazkov I., Atanassov V. // Physics Reports, 1995, V. 255, No. 2–3, P. 79–201.
- [4]. Zhukov V.I., Karfidov D.M. // Plasma Physics Reports, 2023, V. 49, No. 8, P. 975–983.
- [5]. Tarakanov V. P. User’s manual for code KARAT // Springfield: BRA. – 1992.
- [6]. Bogachev N.N., Bogdankevich I.L., Gusein-zade N.G., Rukhadze A.A. // Plasma Physics Reports, 2015, V. 41, No. 10, P. 860–866.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИОНОВ АРГОНА И КРИПТОНА ВДОЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ТОКОВОГО СЛОЯ

Кирий Н.П., Харлачев Д.Е.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mails: natalya.kyrie@yandex.ru, harlachdanila@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.159

Исследование двумерного распределения концентрации электронов в токовых слоях показало, что имеются значительные градиенты плотности плазмы в направлении, перпендикулярном средней плоскости слоя, однако вдоль ширины слоя (большого из поперечных размеров слоя) плотность плазмы распределена, как правило, практически равномерно [1]. Целью настоящей работы было исследование распределения температуры ионов аргона и криптона вдоль поверхности (ширины) токового слоя, сформированного в двумерной (2D) или трехмерной (3D) магнитной конфигурации.

Эксперименты были выполнены с помощью установки ТС-3D (ИОФ РАН), условия экспериментов: начальное давление рабочего газа $p \approx 30$ мТорр, градиент поперечного магнитного поля $h = 0,57$ кГс/см, амплитуда электрического тока в плазме $I_z = 45$ кА, индукция продольного магнитного поля $B_z = 0/2,9$ кГс (2D/3D магнитные конфигурации). Измерения проводились спектральными методами, регистрировались профили спектральных линий ионов аргона Ar II 480,6 нм, криптона Kr II 473,9 нм и углерода C IV 580,1 нм, присутствующего в плазме в качестве примеси, линии уширялись за счет эффекта Доплера. Излучение плазмы собиралось из центральной квазицилиндрической области, вытянутой вдоль направления тока, поскольку все направленные движения плазмы в токовом слое происходят преимущественно в перпендикулярной току плоскости [1]. Для изучения распределений температуры ионов вдоль ширины токового слоя приемная часть схемы измерений закреплялись на оптическом столике, который перемещался вдоль ширины слоя. Измерения проводились в центральной области токового слоя и двух других областях, сдвинутых относительно центра на 3 и 6 см. Пространственное разрешение спектральных измерений – 2,6 см.

Установлено, что температура ионов аргона Ar II (потенциал ионизации $E_i = 27,6$ эВ) распределена вдоль ширины токового слоя практически равномерно, слабо меняется в процессе эволюции слоя как в 2D, так и 3D магнитных конфигурациях и составляет $T_i \approx 40 - 50$ эВ. Эта температура характеризует нагрев периферийных слоев плазменного слоя [2], а температуру более горячей центральной области слоя отражает температура ионов углерода C IV 580,1 нм ($E_i = 64,5$ эВ), которая достигает величины $T_i^{\max} \approx 90$ эВ, что в ~ 2 раза превышает температуру ионов аргона Ar II.

Показано, что распределение температуры ионов криптона Kr II ($E_i = 24,6$ эВ) вдоль ширины слоя в начале эволюции токового слоя практически однородно, слабо меняется со временем, а характерная температура ионов составляет $T_i \approx 50$ эВ. Затем, в 3D магнитной конфигурации температура ионов криптона уменьшается по всей ширине токового слоя, а в 2D магнитной конфигурации, напротив, увеличивается по ширине слоя, при этом в центре слоя образуется локальный максимум температуры: $T_i^{\max} \approx 80$ эВ.

Таким образом, установлено, что в центральной области токового слоя, сформированного в 2D магнитной конфигурации при разряде в аргоне и криптоне, образуется локальная область горячей плазмы с температурой ионов: $T_i^{\max} \approx 80 - 90$ эВ.

Литература

- [1]. Франк А.Г., Гавриленко В.П., Кирий Н.П., Островская Г.В. // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том III-2. М: Янус-К. 2008. С. 335.
- [2]. Кирий Н.П., Франк А.Г., Васильков Д.Г. // Физика плазмы. 2019. Т. 45 (4). С. 313.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И СИММЕТРИИ ТОКОВЫХ СЛОЁВ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ В НИХ ТОКОВ ХОЛЛА И ТОКОВ ОБРАТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ

¹Франк А.Г., ²Савинов С.А.

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: annfrank@fpl.gpi.ru*

²*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, e-mail: s.a.savinov@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.160

В докладе обсуждается структура токовых слоев, особенности их симметрии, а также изменения структуры и симметрии токовых слоев в результате динамических процессов, возникающих в реальной плазме. Токковые слои с трансляционной симметрией формировались в двумерных (2D) магнитных конфигурациях с нулевой линией X-типа с помощью экспериментальной установки ТС-3D. При этом симметрия, как начальной магнитной конфигурации, так и формируемых токовых слоев была характерным свойством данных экспериментов.

На начальной стадии цилиндрически-симметричная магнитозвуковая волна распространялась от внешних границ плазмы по направлению к нулевой линии магнитного поля. Нелинейная стадия распространения волны завершалась формированием токового слоя, обладающего двумя различными размерами, $2\Delta x$ и $2\Delta y$, в плоскости перпендикулярной направлению тока плазмы J_z . В результате формирования слоя происходит эффективное сжатие электрического тока и плазмы в пределы слоя, а в окрестности слоя значительно возрастает плотность магнитной энергии. При этом сформированный токовый слой обладает симметрией относительно двух взаимно перпендикулярных плоскостей, ($x = 0$) и ($y = 0$).

Во многих случаях в токовых слоях наблюдается возбуждение токов Холла, которые протекают в плоскости (x, y). Токи Холла создают продольную компоненту магнитного поля B_z с характерной квадрупольной структурой. В результате и магнитные поля, и токи становятся 3D, а также происходит значительное усложнение структуры 2D плоского токового слоя, что сопровождается изменением характера его симметрии.

Необходимо подчеркнуть, что даже простейшие 2D токовые слои представляют собой динамические объекты с интенсивными потоками плазмы. Двигаясь в поперечных магнитных полях, высокоскоростные потоки плазмы вызывают появление индукционных электрических полей и токов, направленных противоположно по отношению к основному току в слое. Обратные токи максимальной амплитуды возникают у боковых краев слоя.

Важный эффект, связанный с генерацией обратных токов, состоит в появлении сил Ампера, направленных навстречу тем силам в центральной области слоя, которые создавали ускоренные потоки плазмы. Силы торможения у боковых концов токового слоя приводят к замедлению ранее ускоренных плазменных потоков. В результате высокоскоростные потоки оказываются ограниченными, как во времени, так и в пространстве.

Таким образом, структура простейших токовых слоев, формируемых в 2D магнитных полях с нулевыми линиями, становится значительно более сложной, чем можно было бы предположить. Это происходит за счет динамических плазменных процессов, которые приводят к нарушению плоскостной симметрии токовых слоев.

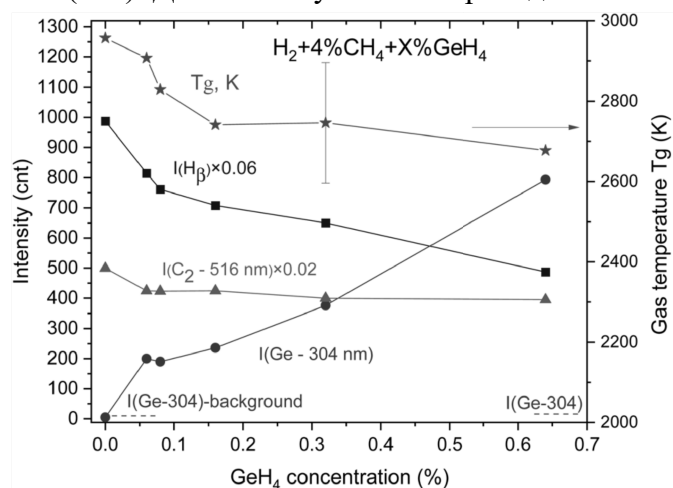
ОПТИЧЕСКАЯ ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ СВЧ ПЛАЗМЫ В СМЕСЯХ H_2 - CH_4 - GeH_4 ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ АЛМАЗА ГЕРМАНИЕМ

Федорова И.А., Юров В.Ю., Большаков А.П.,
Пивоваров П.А., Мартянов А.К., Федотов П.В., Ральченко В.Г.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва,
Россия, e-mail: vil2276@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.161

Мы реализовали осаждение легированных Geэпитаксиальных алмазных слоев с центрами окраски германий-вакансия (GeV). Центры GeV, обладающие узкополосным излучением фотолюминесценции (ФЛ) в оранжевом диапазоне спектра, интересны в качестве источника одиночных фотонов для квантово-оптических технологий, термометрии, оптических биомаркеров. Легирование в процессе роста алмаза проводилось в СВЧ-плазмохимическом реакторе АРДИС-100 (2,45 ГГц) при добавлении газообразного германа GeH_4 в плазму H_2 - CH_4 [1]. Подложками служили монокристалльные пластины НРНТ алмаза с ориентацией (111) и (100). Диагностику плазмы проводили с помощью оптической эмиссионной спектроскопии



(ОЭС) на спектрометре M833 (Solar Laser System).

Исследована динамика интенсивности основных линий (Ge, H_β и C₂) в спектрах ОЭ при вариации концентрации GeH_4 в смеси, отражающая сложную химию в плазме. Найдено, что газовая температура T_g монотонно снижается от 2980 до 2690 К при добавке германия (0,7%). Из соотношения интенсивностей линий серии Бальмера оценена температура электронного возбуждения T_{exc} . Измерены спектры ФЛ выращенных монокристалльных слоев, показано, что при определенных условиях

формируются центры GeV, излучающие на длине волны 602 нм. Найдено, что эффективность легирования грани алмаза с ориентацией (111) значительно выше, чем для грани (100).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант №21-12-00403.

Литература

- [1]. Yurov V.Y., Ralchenko V.G., Martyanov A.K., Antonova I.A., et al. // Phys. Chem. Chem. Phys., 2023, 25, 26623.

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ»**

**SECTION
«PHYSICAL BASIS FOR PLASMA AND BEAM
TECHNOLOGIES»**

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЦР-НАГРЕВА В БЕЗЭЛЕКТРОДНОМ ПЛАЗМЕННОМ РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ

^{1,2}Абрамов И.А., ³Господчиков Е.Д.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, abramov_ia@nrcki.ru

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

³Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия, egos@ipfran.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.162

В проектируемом на сегодняшний день безэлектродном плазменном ракетном двигателе (БРПД) в НИЦ «Курчатовский институт» предлагается использовать ИЦР-нагрев по методу магнитного берега. Такой метод нагрева предполагает использование собственных альфвеновских колебаний неоднородного плазменного шнура, возбуждаемых в области сильного магнитного поля, превышающего резонансное значение. Длина волны колебаний сокращается по мере приближения к области ИЦР, фазовая и групповая скорости стремятся к нулю – колебания «останавливаются». Поэтому, какова бы ни была интенсивность диссипативных процессов, действующих в резонансной зоне, колебания практически полностью поглощаются. Однако в неоднородном плазменном шнуре наряду с дискретным спектром собственных альфвеновских колебаний существует непрерывный спектр – альфвеновский континуум. Колебания, составляющие континуум, испытывают альфвеновский резонанс, трансформируясь в нижнегибридные. Последние обладают значительным продольным электрическим полем, что приводит к их эффективному поглощению электронами плазмы [1, 2]. Эффективное возбуждение дискретного набора собственных альфвеновских мод требует точной оптимизации используемой антенной системы. В настоящей работе на основе полноволнового моделирования возбуждения волн ИЦ-диапазона частот в плазме, учитывающего пространственную дисперсию диэлектрического отклика как электронов, так и ионов, было проведено сравнение нескольких основных типов антенн с точки зрения эффективности энерговыклада в ионы плазмы и найдены оптимальные размеры для каждого из рассматриваемых типов антенн, применительно к лабораторным макетам БРПД, установкам Е-1 и ПС-1.

Литература

- [1]. А.В. Тимофеев «О влиянии альфвеновского резонанса на ИЦР-нагрев» // Физика плазмы, 2014, Т. 40, № (1), С. 3.
- [2]. Е.Д. Господчиков, А.В. Тимофеев К теории ИЦР-нагрева по методу «магнитного берега» // Физика плазмы, 2019, Т. 45, № 8, С. 695.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ЗОНДОВЫМ МЕТОДОМ В УСЛОВИЯХ ВЧ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ГЕЛИКОНОВОЙ АНТЕННОЙ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

^{1,2}Рогозин К. А., ^{1,2}Анисимов Д.А., ¹Чан К.В., ^{1,2}Чилин М.С., ¹Коньков А.А.,
^{1,2}Губанова А.И., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Федорович С.Д., ^{1,3}Кавыршин Д.И.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

³Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.163

Для термоядерного реактора-токамака необходимы исследования методов дополнительного нагрева плазмы. В работе проведены испытания ввода мощности с помощью геликоновой антенны в стационарной плазме плазменной установки ПЛМ-М (плазменный линейный мультикасп) [1], которая является одной из нескольких уникальных плазменных установок, позволяющая получить параметры, аналогичные периферийной плазме крупного токамака.

Система ВЧ-нагрева плазмы (рис. 1) состоит из рабочей камеры, которая прозрачна для электромагнитного излучения; геликоновой антенны; ВЧ-источника и системы согласования. Геликоновая антенна имеет длину 100 мм и внутренний диаметр 78 мм, изготовлена из медной трубки диаметром 6 мм. Энергия из ВЧ-источника, имеющего внутреннее сопротивление 50 Ом и мощность 4 кВт, вводится в плазму через геликоновую антенну на частоте 27,12 МГц в виде геликоновой волны. Система согласования связывает антенну и ВЧ-генератор и позволяет приравнять комплексное сопротивление нагрузки сопротивлению ВЧ-генератора для исключения потерь мощности. Была разработана система согласования для ручного регулирования.

В ходе экспериментов с геликоновой антенной с помощью зондовой диагностики определены основные параметры плазмы в установке ПЛМ-М: плотность плазмы $(1-10) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$; температура плазмы более 10 эВ; диаметр плазменного шнура – 3,5 см. Также по сечению плазменного разряда определены статистические и спектральные характеристики плазмы и проведено их сравнение с данными, полученными в отсутствие дополнительного нагрева плазмы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 21-79-10281.

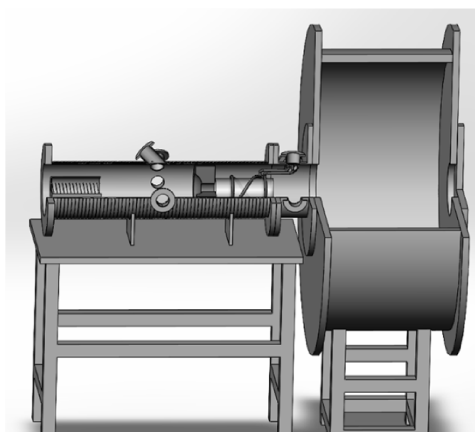


Рис. 1. 3D модель системы ВЧ-нагрева в установке ПЛМ-М

Литература

[1]. Будаев В.П. и др. // ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 2017, Т. 40, № 3, С. 35.

ДИНАМИКА ПОТОКА ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ В КОРРЕЛЯЦИИ С ЭВОЛЮЦИЕЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ РЭП С ПЛАЗМОЙ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-ПЭТ

^{1,2}Аржанников А.В., ^{1,2}Синицкий С.Л., ¹Самцов Д.А., ^{1,2}Калинин П.В., ^{1,2}Попов С.С.,
¹Атлуханов М.Г., ^{1,2}Сандалов Е.С., ^{1,2}Степанов В.Д., ¹Куклин К.Н., ¹Макаров М.А.

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,*
²*Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.164

Исследования процесса генерации терагерцового излучения при релаксации релятивистского электронного пучка (РЭП) в плазме осуществляются в настоящее время на специализированной установке ГОЛ-ПЭТ [1]. В этих экспериментах осуществляется инжекция пучка электронов с энергией 0,5 МэВ, плотностью тока 1–2 кА/см² (полный ток пучка до 20 кА) и длительностью импульса 5 мкс в столб плазмы с плотностью $(4–8) \times 10^{14}$ см⁻³, удерживаемый магнитным полем 4 Тл (см. [1–2]). При проведении этих экспериментов реализована генерация потока излучения, направленно распространяющегося в атмосфере, с длительностью импульса, приближающейся к длительности импульса инжектируемого пучка, с энергосодержанием масштаба 10 Дж в области частот 0,2–0,3 ТГц (см. [1–3]).

Дальнейшее развитие этих исследований направлено на установление корреляций между динамикой параметров потока излучения, генерируемого во время инжекции пучка, и изменениями плотности плазмы в том сечении плазменного столба, где проходит сильноточный РЭП. Наряду с получением фундаментальных знаний в области физики плазмы по направлению пучково-плазменного взаимодействия, результат этих исследований приобретает значимость в развитии реализуемого нами метода генерации терагерцового излучения применительно к его практическому использованию. Такое развитие метода генерации ТГц излучения мы связываем с переходом в описываемых в этом докладе экспериментах к использованию для инжекции в плазму килоамперного РЭП, генерируемого в линейном индукционном ускорителе [4]. Эти изменения в условиях проведения экспериментов открывают возможность получения мегаваттных потоков излучения в окрестности частоты 1 ТГц в импульсно-периодическом режиме работы генератора излучения.

Литература

- [1]. A.V. Arzhannikov, S.L. Sinitsky, S.S. Popov et al. “Energy Content and Spectral Composition of a Submillimeter Radiation Flux Generated by a High-Current Electron Beam in a Plasma Column with Density Gradients” // IEEE Transactions on Plasma Science, 50 (8), p. 2348-2363, 2022. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3183629>.
- [2]. Д.А. Самцов, А.В. Аржанников, С.Л. Синицкий и др. Частотный спектр потока излучения в интервале частот 0.1-0.6 ТГц, генерируемого на установке ГОЛ-ПЭТ в различных условиях // Известия вузов: Радиофизика, Т. LXV, № 5–6, с. 1-11, 2022.
- [3]. А.В. Аржанников, С.Л. Синицкий, Д.А. Самцов и др. «Частотный спектр и энергосодержание в импульсном потоке ТГц излучения, генерируемом РЭП в плазменном столбе с различными распределениями плотности» // Рукопись направлена для опубликования в журнал Физика плазмы. Индикатор статьи FizPlaz2360145Arzhannikov.
- [4]. А.В. Аржанников, С.Л. Синицкий, Д.А. Старостенко, и др. Пучково-плазменный генератор ТГц-излучения на основе индукционного ускорителя (проект ЛИУ-ПЭТ) // Сибирский физический журнал. 18 (1), с. 28-42, 2023. doi:10.25205/2541-9447-2023-18-1-28-42.

СОЗДАНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ В КАПИЛЛЯРНОМ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ

¹Степанов И.Г., ¹Бычков В.Л., ²Сороковых Д.Е., ²Бычков Д.В.

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, г. Москва, Россия, ilyastep91@mail.ru

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет г. Москва, Россия, bychvl@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.165

Проведены эксперименты по получению долгоживущих светящихся образований-плазмоедов при взаимодействии струи капиллярного плазмотрона с образцами стали, меди, олова и припоя.

Конструкция капиллярного плазмотрона имеет стандартный вид [1]. Энергия, вложенная в разряд, варьировалась от 0,3 до 1,5 кДж. В отличие от экспериментов [1], к образцам прикладывалось высокое напряжение величиной 10 – 13 кВ. При больших напряжениях происходил пробой на плазмотрон.

В отсутствие высокого напряжения при взаимодействии струи капиллярного плазмотрона с металлами происходило образование компактных долгоживущих светящихся образований - плазмоедов. При воздействии на припой были получены плазмоеды с необычно большими размерами внешним диаметром до 1,5 см, оболочкой толщиной около 10 мкм и временем жизни до 7 с. Объекты состоят из ядра и оболочки и обладают плотностью энергии, сравнимой с плотностью энергии горючих материалов. Эти объекты падают и оставляют на поверхности бумаги следы взаимодействия в виде обугленных точек траекторий и следов взрывов (звездообразной формы).

При прикладывании к образцам высокого напряжения при взаимодействии струи капиллярного плазмотрона с металлами также происходило образование компактных долгоживущих светящихся образований. При этом их время жизни увеличивалось. Часть плазмоедов не сразу падала, как в случае отсутствия приложенного напряжения, а продолжала двигаться по сложной траектории, погасая или взрываясь в воздухе. При падении на поверхность эти плазмоеды продолжали прыгать на большие расстояния (до нескольких см) после чего гасли.

Эти факты говорят о создании униполярно заряженных плазмоедов, в которых существует оболочка и ядро из расплавленного (испаренного) металла. При этом наличие заряда приводит как к увеличению времени жизни плазмоеда, так и упрочнению его оболочки. По этим свойствам созданные плазмоеды аналогичны шаровым молниям естественного происхождения.

Литература

- [1]. Байдак В.А., Бычков В.Л., Сороковых Д.Е., Бычков Д.В., Ваулин Д.Н. Воздействие капиллярного плазмотрона на металлы // Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 5. С. 399 – 406.

МОДЕЛЬ РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В АЦЕТИЛЕНЕ

¹Степанов И.Г., ¹Бычков В.Л., ²Андреев Г.И., ²Нечаев К.А., ²Кралькина Е.А.

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
г. Москва, Россия, ilyastep91@mail.ru

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия, bychvl@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.166

Кинетика углеводородной плазмы представляет интерес как для фундаментальных исследований, так и для прикладных целей. Важным применением такой плазмы является нанесение тонких пленок на основе углеводородов на различные материалы. Ацетилен (C_2H_2) часто используется в качестве исходного газа, который вводят в камеру при производстве пленки. В приложениях были проведены эксперименты по исследованию ацетиленовой плазмы. В работе [1] была исследована кинетика углеводородной плазмы ВЧ-разряда. Условия соответствуют низкому давлению (эксперимент проводился при давлении 30 мТорр). Эксперименты приводят к получению так называемого алмазоподобного углерода (DLC). Нами проделаны расчеты параметров плазмы тлеющего разряда в C_2H_2 при давлении 20 мТорр на интервале времени 1 с, реализуемого в эксперименте. В работе рассмотрена ионизация ацетилена при давлении 20 мТорр и токе 300 мА и значении параметра $E/N = 100$ Тд. Разработана модель, состоящая из 16 компонент: нейтралы и радикалы: C_2H_2 , C_2H , C_4H_2 , C_4H , C_6H_2 , C_6H , C_2H_3 , C_4H_3 , H_2 , H , C_6H_3 ; заряженные частицы: электрон и положительные ионы: C_2H^+ , $C_4H_2^+$, $C_2H_2^+$, $C_6H_4^+$. Расчеты проводились для двух моделей ионизации. В первой считалось, что идет эффективная ионизация при экспериментальных характеристиках разряда. Во второй были использованы литературные данные по сечениям ионизации и вычислены константы в условиях эксперимента, см. рис. 1.

В наших условиях, получены основные радикалы C_4H_3 , C_6H_3 и C_2H , они соответствуют радикалам из [1] полученным в аналогичных условиях. В ВЧ разряде [1] при близких условиях происходило образование алмазоподобных пленок. Поэтому можно предполагать появление алмазоподобных пленок и в наших условиях.

При низких мощностях разряда в эксперименте [1] наблюдаются радикалы C_4H_2 , C_6H_2 , отсутствующие в нашем модельном расчете, что может быть связано с тем, что в [1] использовался высокочастотный разряд, при котором происходит дополнительная низкоэнергетическая ионизация ацетилена, приводящая к образованию этих радикалов.

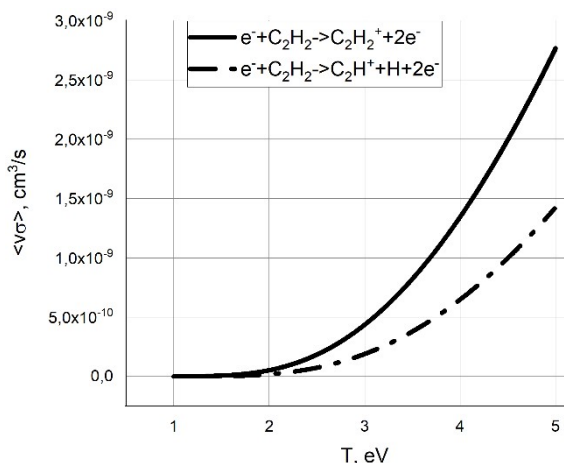


Рис. 1. Значения констант скорости ионизаций в зависимости от температуры электронов в разряде ацетилена.

Литература

- [1]. J.R. Doyle. Chemical kinetics in low pressure acetylene radio frequency glow discharges // Journal of Applied Physics 82, 4763 (1997).

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ МОЩНЫХ РАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ЗАМКНУТОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ВОЗБУЖДЕНИЯ С ИХ ПОМОЩЬЮ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Дмитриев Е.О., Бухарский Н.Д., Корнеев Ф.А.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: egor.o.dmitriev@gmail.com.*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.167

Электромагнитное излучение терагерцового (ТГц) диапазона обладает уникальными свойствами, привлекательными как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Неионизирующий характер взаимодействия позволяет применять ТГц импульсы в различных областях науки, таких как химия, биология и медицина. К многочисленным приложениям ТГц излучения можно отнести в том числе манипулирование расположением и ориентацией молекул, детектирование дефектов материалов и поляризационную спектроскопию. Эти, а также различные другие применения ТГц импульсов требуют возможности управления поляризационными свойствами и достижения высоких интенсивностей излучения.

Одними из наиболее эффективных схем генерации мощного ТГц излучения являются схемы, использующие в качестве источника мощный локализованный разрядный ток в металлических проволоках. Формирование разрядного тока большой скорости и мощности возможно при облучении такой протяженной проводящей мишени коротким лазерным импульсом [1–3]. Параметры ТГц импульса, излучаемого током, контролируются геометрическими характеристиками мишени. Соответственно, при скорости тока близкой к скорости света, для генерации излучения частоты порядка одного ТГц характерный размер мишени должен быть порядка несколько десятков микрон.

В данной работе в рамках численного кинетического моделирования и аналитической модели рассмотрен механизм генерации мощного ТГц излучения контролируемой поляризации разрядным током, индуцированным лазером в проводящей мишени. Показано, что при некоторой геометрии облучения разрядный импульс может быть направлен вдоль поверхности преимущественно в сторону, в которую направлен греющий лазерный импульс. Для этого необходимо, по крайней мере, достаточно высокие интенсивности при не очень большой длительности импульса. Применение замкнутой мишени эллиптической формы позволяет генерировать эллиптически поляризованный ТГц импульс [4]. Основные параметры излучения, такие как коэффициент эллиптичности и частота, определяются геометрической формой мишени. Направление вращения напряженности поля, в свою очередь, определяется направлением движения разрядного тока по мишени. Согласно количественной оценке, величина мощности ТГц импульса, достигаемая при генерации разрядного тока современными петаваттными лазерами в такой схеме, может достигать нескольких тераватт.

Литература

- [1]. K. Quinn et al. // *Physical Review Letters*, 102 (19), 194801 (2009).
- [2]. N. Bukharskii, Iu. Kochetkov, Ph. Korneev // *Applied Physics Letters*, 120 (1), 014102 (2022).
- [3]. N. Bukharskii, Ph. Korneev // *Matter and Radiation at Extremes*, 8 (4), 044401 (2023).
- [4]. N. Bukharskii, E. Dmitriev, Ph. Korneev // *Photonics*, 10 (7), 803 (2023).

СТАТУС РАБОТ ПО ПЛАЗМЕННОЙ МИШЕНИ ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПУЧКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Емелев И.С.

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: I.S.Emelev@inp.nsk.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.168

Инжекция атомарных пучков является одним из важнейших методов нагрева плазмы в современных термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы. Требуемые энергии атомарных пучков 0,5 – 1 МэВ, требуемая мощность 10 – 100 МВт. В рамках выполнения федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разрабатывается атомарный инжектор мегаэлектронвольтового диапазона энергий, основанный на ускорении и нейтрализации отрицательных ионов водорода [1].

Для нейтрализации ускоренного пучка предполагается использовать плазменный нейтрализатор. Эффективность нейтрализации при этом может быть увеличена в сравнении с газовым нейтрализатором и достигать 85%.

В ИЯФ СО РАН создан прототип плазменного нейтрализатора, предназначенный для нейтрализации ускоренного пучка с током до 9 А. Плазменный нейтрализатор представляет собой плазменную ловушку с мультипольными магнитными стенками. В докладе представлены результаты первых экспериментов на созданном прототипе. Измерены параметры плазмы при относительно небольшой мощности разряда. Приводятся результаты оптимизации магнитного поля нейтрализатора для получения необходимого распределения параметров плазмы в мишени.

Литература

- [1]. O. Sotnikov, A. Ivanov, Yu. Belchenko, A. Gorbovsky, P. Deichuli, A. Dranichnikov, I. Emeev, V. Kolmogorov, A. Kondakov, A. Sanin, I. Shikhovtsev, Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices // Nuclear Fusion. V. 61, P. 116017 (2021).

ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ПЛМ-М ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОБЛИЦОВКИ ГИБРИДНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

¹Федорович С.Д., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Дедев А.В., ¹Кавыршин Д.И., ^{1,2}Карпов А.В.,
¹Чан К.В., ¹Лукашевский М.В., ¹Губкин М.К., ^{1,2}Рогозин К.А.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия,
fedorovichsd@mail.ru

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.169

С целью испытаний тугоплавких материалов стационарными плазменными нагрузками с плотностью мощности $1 - 5 \text{ МВт/м}^2$, моделирующими стационарную нагрузку на пластины дивертора гибридного термоядерного реактора, в НИУ «МЭИ» сооружена плазменная установка ПЛМ-М – плазменный линейный мультикасп модернизированный. Плазменные испытания материалов в ПЛМ-М дополнены облучением мощными лазерными импульсами, что имитирует уровень импульсной нагрузки ЭЛМов и срывов на диверторные пластины ожидаемые в реакторе, в том числе, в ИТЭР.

Магнитная система установки ПЛМ-М построена по схеме линейного мультикаспа - восьмипольный мультикасп. Продольное магнитное поле создается соленоидом для обеспечения МГД устойчивости разряда. Такая восьмипольная схема плазменной ловушки является уникальной в мире. Параметры ПЛМ-М: диаметр/длина разрядной камеры – 15/100 см, продольное магнитное поле на оси плазменного разряда до 0,035 Тл, индукция магнитного поля вблизи стенок камеры до 0,2 Тл, диаметр горячей зоны цилиндрического плазменного разряда 3,5 см задается диаметром апертуры анода, плотность плазмы $(0,1 - 2) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, электронная температура 2 – 10 эВ с фракцией горячих электронов до 50 эВ, ионный поток из плазмы на испытываемые материальные образцы до $1 \times 10^{23} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, мощность плазменно-тепловой нагрузки на испытываемые образцы 0,4 – 4,5 МВт/м², длительность разряда – стационарная до 500 мин и более, плазмообразующий рабочий газ - гелий. Для размещения в плазменном пучке охлаждаемых образцов теплозащитной облицовки гибридного термоядерного реактора служит ресиверная камера диаметром 100 см и длиной 200 см. Система откачки с использованием безмаслянных вакуумных насосов обеспечивает достижение давления в рабочей камере и ресивере до 7×10^{-7} Торр. Ионизация атомов плазмообразующего газа в ПЛМ-М происходит в результате электронного удара в зоне катодного узла. Система дополнительного ВЧ-нагрева с использованием геликоновой антенны в ПЛМ-М будет использоваться для достижения плотности электронов плазмы до 10^{20} м^{-3} и температуры электронов 15 эВ и более.

Система оптической диагностики приповерхностной плазмы в ПЛМ-М состоит из монохроматора-спектрографа MS7504(i), оптической линии с коллиматором и четырехканального спектрометра AvaSpec с оптоволоконным кабелем для регистрации излучения в спектральном диапазоне длин волн 200 – 1100 нм с разрешением 0,013 нм. Одновременно регистрируемый интервал длин волн 16,5 нм, пространственное разрешение 0,01 см. Регистрация спектров выполняется ПЗС камерой с частотой до 500 кГц.

Система зондовой диагностики состоит из подвижных ленгмюровских зондов, погружаемых электроприводом в плазму со скоростью до 1 м/с.

Измерения спектров оптической диагностикой выполнены при поддержке гранта РФФ 21-79-10281.

Литература

- [1]. V.P. Budaev et al. Erosion of Fuzz Layers Formed in Steady-State Plasma Discharge // Fusion Science and Technology. 2022. DOI: 10.1080/15361055.2022.2118471.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОТИПА ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ, РАБОТАЮЩЕГО НА ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Дудин В.С., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Задириев И.И., Никонов А.М., Швыдкий Г.В.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия, e-mail: vsd97@list.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.170

В настоящее время всё острее встаёт вопрос более эффективного освоения человеком околоземного космического пространства. В связи с этим особый интерес вызывают до сих пор не освоенные сверхнизкие околоземные орбиты (СНОО) (160 – 250 км). Долговременные полёты космических аппаратов (КА) на СНОО позволят развить сверхбыстрые коммуникационные сети по всей планете, выйти на новый уровень в сфере исследования поверхности и атмосферы Земли [1] и на порядок снизить затраты на вывод спутников на орбиту. КА, используемые на столь низких высотах, станут меньше и дешевле, но качество получаемых от них данных – выше, снизятся требования к радиационной стойкости используемой на борту электроники.

Одним из важнейших аспектов работы КА на СНОО является наличие остаточной атмосферы, создающей значительное аэродинамическое торможение, с одной стороны очищающее данные орбиты от любого космического мусора, с другой – вынуждающее иметь на борту постоянно работающий реактивный двигатель, компенсирующий тормозящую силу. Эффективно справиться с такой задачей способен лишь электрореактивный двигатель (ЭРД). Одним из основных кандидатов на роль такого двигателя является высокочастотный сеточный источник ионов (ВЧ ИИ) из-за высоких значений удельного импульса и широких возможностей отдельного регулирования как величины удельного импульса, так и величины извлекаемого ионного тока.

Но главным достоинством ВЧ ИИ в данном контексте становится потенциальная возможность работы двигателя на любом рабочем теле, включая остаточные атмосферные газы, окружающие КА при полёте на СНОО. Это позволит, создав сопряжённое с двигателем устройство забора атмосферных газов (УЗАГ), обеспечивающее достаточный поток рабочего тела в двигатель для создания компенсирующей сопротивление воздуха тяги, осуществить стабильный долговременный полёт КА на СНОО без колоссальных запасов рабочего тела на борту [2]. Работы по созданию УЗАГ так же активно ведутся в мировом научном сообществе.

Так как известно, что на высоте ~200 км атмосфера преимущественно состоит из молекулярного азота и атомарного кислорода [3], в данной работе была поставлена задача изучить возможности оптимизации работы ВЧ ИИ на азоте, кислороде и их смеси, имитирующей газовую среду на орбите. В качестве модели ВЧ ИИ использовался индуктивный источник ионов диаметром 10 см. Для улучшения рабочих показателей двигателя на разряд накладывалось внешнее магнитное поле и варьировалась рабочая частота генератора. Результаты эксперимента сопоставлены с расчётами.

Литература

- [1]. Suvorov M., Syrin S., Khartov S., Popov G. // *Advances in the Astronautical Sciences*, 2017, P. 161.
- [2]. Larson W.J., Wertz J.R. // *Space mission analysis and design*, 1999.
- [3]. Cifali G. et al. // *32nd International Electric Propulsion Conference*, 2011, No. 11–15.

ОПТИМАЛЬНЫЙ СПОСОБ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИМ НАНОСЕКУНДНЫМ РАЗРЯДОМ НА ЭНЕРГОЕМКИЕ ПРОЦЕССЫ

Филимонова Е.А., Добровольская А.С., Битюрин В.А., Бочаров А.Н.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия, helpful@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.171

Устойчивое воспламенение и стабильное горение топливно-воздушных смесей является важным технологическим требованием для силовых установок, использующих энергию топлива. Как правило, в термодинамическом цикле должен присутствовать элемент активации исходной смеси, который предопределяет переход смеси из исходного состояния в равновесное высокотемпературное, в котором рабочее тело может совершить полезную работу. Кроме того, важен временной интервал этапа активации. Требование эффективности активации подразумевает оценку необходимых энергетических затрат.

В области плазменно-стимулированного горения считается, что импульсно-периодический, в том числе, коронный, наносекундный разряд хорошо подходит для воспламенения слабо реакционных бедных смесей, что было продемонстрировано во многих работах. Создается впечатление, что данный тип разряда способен решить проблему воспламенения любой бедной смеси при соответствующих условиях, и тогда можно управлять конечной стадией работы системы, изменяя ее параметры (активация) на стадии действия разряда.

Чтобы понять, насколько электрический разряд эффективен для воспламенения метано-воздушной смеси, был сделан расчет эволюции состава для трех типов активации: 1) обработка разрядом - создание химически активных частиц и нагрев смеси, 2) создание частичной сверхравновесной диссоциации кислорода и/или азота, 3) предварительный нагрев. Расчёт был проведен в нульмерной постановке, в адиабатической ячейке, чтобы исключить влияние пространственных процессов. Воздействие разрядом было лучшим с точки зрения времени достижения воспламенения (несколько миллисекунд), однако энергозатраты должны быть слишком большими - несколько МДж/м³. Но если в энергетической системе заметная доля этой энергии будет вкладываться за счёт внешнего подвода тепла (как сжатие поршнем в двигателе), разряд с заметно меньшей удельной энергией может успешно использоваться для воспламенения и управления процессами горения в камере сгорания.

С точки зрения полноты сгорания важны не только концентрация химически активных частиц и нагрев, но и стабилизация горения, и развитие самовоспламенения. В данной работе, с целью определить механизм влияния разряда на различные стадии горения: воспламенение активированной разрядом зоны, продвижение фронта волны горения, самовоспламенение газа перед фронтом, было проведено исследование развития горения пропано-воздушной смеси в камере сгорания, варьируя параметры разряда [1].

Была установлена зависимость между воспламенением активированной разрядом зоны и самовоспламенением газа перед фронтом волны горения. На её основе предложен новый способ управления горением обедненной топливно-воздушной смеси в камере сгорания компрессионного двигателя при помощи высокочастотного коронного разряда. За счет изменения параметров разряда в широком диапазоне можно обеспечить самовоспламенение в узком диапазоне углов поворота коленвала вблизи верхней мертвой точки. Влияние разряда снижается с увеличением степени обедненности смеси.

Таким образом, для достижения желаемого сценария горения топливно-воздушной смеси требуется оптимальное сочетание внешнего подвода энергии (например, сжатие поршнем) и управляющего электроразрядного воздействия.

Литература

[1]. Dobrovolskaya A.S., Filimonova E.A., Bocharov A.N. // Fuel, 2023, 354, 129349.

ФОРМИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЁННЫХ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Глинов А.П., Головин А.П.

НИИ механики МГУ, г. Москва, Россия, e-mail: krestytroitsk@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.172

На установке П-2000 НИИ механики МГУ [1] проведена модернизация питающей цепи электроразрядного стенда, связанная с шунтированием дуги ёмкостью и активным сопротивлением. Цели исследования – повышение стабильности инициирования и горения дуги, увеличение времени стабильного горения разряда и его мощности при соблюдении сохранности электродных узлов и приемлемом нагреве и силовых нагрузках на оборудование – стенки разрядной камеры, катушек магнитов. Основные эксперименты проведены в разрядной камере с цилиндрическими боковыми стенками из кварцевого электровакуумного стекла при атмосферном давлении. Высота и диаметр – 250 мм. Ранее эта камера апробирована в серии экспериментов, представленных в докладах [2 – 5]. Рассмотрены вертикально ориентированные разряды преимущественно в воздушной среде. Изучались дуги между графитовыми (ЗОПГ) электродами разных диаметров (6 – 150 мм). Инициирование разряда осуществлялось размыканием первоначально сомкнутых графитовых электродов. Межэлектродное расстояние 5 – 15 см. Продолжительность разрядов несколько секунд. Работа продолжает изучение неустойчивостей разряда, теоретически рассмотренных в [6 – 8]. Высокоскоростная видеосъёмка разрядов с частотой 1200 к/с проводилась синхронно с диагностикой осциллограмм тока и напряжения дуг, пирометрическим измерением температуры катода. В результате проведенных экспериментов показана принципиальная возможность увеличения времени горения разряда при токах до 500 А в стабильном режиме от традиционных 2 – 3 до 10 и более секунд, даже без применения специального охлаждения электродов и магнитов. Это расширяет возможности использования установки для испытаний термостойкости и оценок ресурса новых материалов.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова.

За проведение визуализации разряда авторы выражают благодарность снс к.ф.-м.н. П.В. Козлову.

Литература

- [1]. Glinov A.P., Golovin A.P., Kozlov P V // J. Phys.: Conf. Ser. 2055 (2021) 012006.
- [2]. Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. // Сборник тезисов докладов XLIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, М.: Изд. МБА 2022, с. 172.
- [3]. Головин А.П., Глинов А.П. // Ломоносовские чтения, секция механики, тезисы докладов, Изд. МГУ 2022, с. 58 – 59.
- [4]. Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. // там же, с. 57 – 58.
- [5]. Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. Исследование инициирования и протекания тока и межэлектродной среды разных газов атмосферного давления в протяженных разрядных камерах // XIII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Санкт-Петербург, 21 – 25 августа 2023 года.
- [6]. Бармин А.А., Глинов А.П., Шумова Г.А. // ТВТ, 1987, том 25, вып. 5, 873 – 879.
- [7]. Бармин А.А., Глинов А.П., Шумова Г.А., Зотиков И.Б. // Отчет о НИР НИИ механики МГУ, № 3322 от от 25 ноября 1986 г., 42 с., М. 1986.
- [8]. Бармин А.А., Зотиков И.Б. // ТВТ, 1991, том 29, вып. 3, 440 – 445.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ СПЕКТРОВ ТЯЖЁЛЫХ МОЛЕКУЛ ПРИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С СВЧ ПОЛЕМ НА ЧАСТОТАХ 2 – 4 ГГц

Иванов И.Е., Диас Михайлова Д.Е., Стрелков П.С., Стрелков В.В.

Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: iei@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.173

Доклад посвящен экспериментальной методике исследования вращательных спектров тяжелых молекул при их взаимодействии с СВЧ-полем. Рассматриваются молекулы, у которых переходы между нижними вращательными уровнями имеют частоты в несколько гигагерц. Исследование таких спектров представляет интерес как с фундаментальной точки зрения (установление длин межатомных связей в молекулах), так и практической (анализ химических соединений, анализ изотопного состава молекул и т.д.).

В отличие от ранее разработанных методик вращательной спектроскопии в гигагерцовой области, наши эксперименты основаны на использовании плазменного релятивистского СВЧ-генератора, работающего в режиме широкополосной генерации [1]. Уникальной особенностью этого источника является генерация СВЧ излучения в широком диапазоне частот, что существенно упрощает технику спектроскопических исследований. Исследуемый объект помещается в волноводе на пути выходного излучения между двумя антеннами, сигналы с которых регистрируются с помощью осциллографа с шириной полосы 4 ГГц и затем подвергаются компьютерной обработке с применением быстрого Фурье преобразования (БФП). Для проведения измерений была разработана конструкция системы вывода излучения с учетом исключения отражений излучения от стенок диагностического помещения. Также была решена задача перехода от многомодовой генерации в одномодовую, что позволило увеличить чувствительность измерений амплитудных и фазовых изменений.

Литература

- [1]. П.С. Стрелков, В.П. Тараканов, Д.Е. Диас Михайлова, И.Е. Иванов, Д.В. Шумейко // Физика плазмы, 2019, Т. 45, № 4, С. 335 – 345.

ИНИЦИИРУЕМЫЙ ПОЛУВОЛНОВОЙ АНТЕННОЙ СВЧ-РАЗРЯД В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКАХ

¹Корнев К.Н., ^{1,2}Двинин С.А., ¹Логунов А.А., ¹Сурконт О.С., ¹Абушаев Т.Р.,
¹Вольнец А.Л.

¹Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия,
e-mail: singuliarnost@yandex.ru

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.174

Различные разряды в высокоскоростных газовых потоках исследуются на протяжении последних десятилетий в рамках задач плазменной аэродинамики [1]. Необходимость определения механизмов воздействия плазмы разрядов на высокоскоростные потоки обуславливает актуальность проводимых исследований. В работе экспериментально изучен СВЧ-разряд, инициируемый на остриях полуволновой антенны, помещаемой в высокоскоростные воздушные и пропан-воздушные потоки. Аэродинамический канал врезался в волновод перпендикулярно широкой стенке [2]. Разряд создавался с помощью магнетронного источника с частотой 2,45 ГГц, рассчитанного для работы на мощностях до 5 кВт в непрерывном режиме. Структура СВЧ-разряда регистрировалась с помощью скоростной видеосъемки камерой Видеоспринт. Оптический спектр в видимой и ближней УФ-области регистрировался спектрометром OceanOptics. При анализе спектров определялись основные параметры плазмы разряда: концентрация и температура электронов, температура газа.

Экспериментально показано, что структура (длина светящегося канала, его толщина, интенсивность свечения) СВЧ-разряда зависит от параметров потока: давления в потоке и его скорости. На рис. 1 показано составное изображение из четырех фрагментов кадров высокоскоростной съемки разряда при различных давлениях в потоке. Экспериментально определена концентрация электронов n_e порядка 10^{15} см^{-3} , а также установлено, что плазма находится в состоянии близком к равновесному со значениями электронной и газовой температурами около 5500 К, что согласуется с результатами проводимых ранее исследований [3].

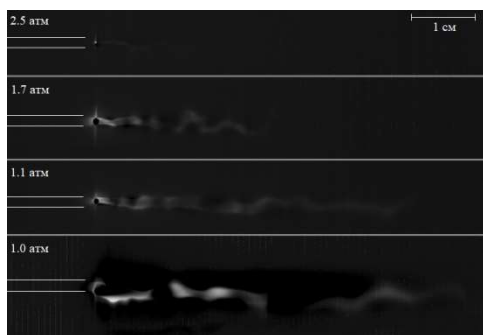


Рис. 1. Сборка кадров видеосъемки СВЧ разряда при различных давлениях в потоке. Экспозиция кадров 2 мкс. Скорость воздушного потока 200 м/с, направлен слева направо. Вектор напряженности поля E параллелен потоку.

Корнев К.Н. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» и благодарит его за финансовую поддержку. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00233.

Литература

- [1]. Leonov S.B. // Energies 2018, 11, 1733. <https://doi.org/10.3390/en11071733>.
- [2]. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. С. 511.
- [3]. Злобин В.В., Кузовников А.А., Шибков В.М., ВМУ. 3. Физика. Астрономия. 1988. Т. 29, № 1.

ГЕНЕРАТОР МИШЕНЕЙ ИЗ ТВЕРДОГО КСЕНОНА ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ИСТОЧНИКА EUV ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НАНОЛИТОГРАФИИ

¹Коробко Д.Д., ¹Черноизюмская Т.В., ¹Сергеев В.Ю., ¹Шаров И.А., ¹Капралов В.Г.,
¹Карасев П.А., ²Буторин П.С., ²Калмыков С.Г., ²Сасин М.Э.

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

²Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: korobko.dd@edu.spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.175

Благодаря технологии фотолитографии за 50 с лишним лет развития полупроводниковой промышленности удалось уменьшить нормы технологического процесса с 3 мкм до 10–20 нм. Дальнейшее уменьшение норм техпроцесса для удовлетворения нужд современной микроэлектроники планируется вести средствами нанолитографии в глубоком ультрафиолете (EUVL – Extreme Ultraviolet Litography). В настоящий момент для получения экстремального ультрафиолетового излучения в литографах используются лазерно-плазменные источники излучения с мишенью в виде капель Sn и с длиной волны $\lambda = 13,5$ нм. Для такого излучения применяются оптические системы из многослойных Si/Mo зеркал.

Существенный недостаток EUV-литографов с оловянной мишенью – малый ресурс работы дорогостоящих оптических элементов вследствие быстрого загрязнения оловом. Попытки решить эту проблему значительно удорожают систему, но не приводят к успеху [1].

В качестве альтернативы мишени из Sn рассматривается вариант газоструйной мишени из Хе с длиной волны излучения $\lambda = 11,2$ нм. В этом спектральном диапазоне в оптической системе Ве-содержащие многослойные интерференционные зеркала [2]. В проведенных в ФТИ им. А.Ф. Иоффе исследованиях такого источника продемонстрирована достаточно высокая эффективность конверсии лазерного импульса в EUV излучение $\text{CE} = 4\%$ [3]. Однако при этом сопло, из которого истекает Хе, находится на расстоянии ~ 1 мм от области, в которой должен гореть лазерно-плазменный факел. Это приводит к быстрой деградации сопла.

Авторы настоящего доклада предлагают использовать в качестве мишени эшелон пеллет из твёрдого Хе. Это устраняет проблему сопла, расположенного в нескольких миллиметрах от лазерной плазмы. Струя жидкого ксенона в генераторе пеллет-мишеней распадается на капли в результате развития поверхностной неустойчивости Плато-Рэлея. Охлаждение образованных капель в результате испарения материала с их поверхности приводит к их переходу в твёрдое состояние. Таким образом формируется поток твёрдых частиц, движущихся друг за другом. Возможность формирования эшелона пеллет с параметрами, близкими к требуемым в литографе, была успешно продемонстрирована для жидкого водорода [4] и для Хе [5]. В докладе представлены результаты расчётных и экспериментальных работ по созданию стенда генератора мишеней.

Работа поддержана ГК Росатом и Минобрнауки России в рамках Федерального проекта 3 (U3), проект № FSEG-2023-0018 «Разработка и создание систем струйной и пеллет инъекции с повышенными производительностью и ресурсом».

Литература

- [1]. I. Fomenkov, D. Brandt, A. Ershov et al. // Adv. Opt. Tech. 6 (2017), No. 3–4, 173.
- [2]. S.A. Bogachev, N.I. Chkhalo, S.V. Kuzin et al. // Appl. Opt. 55 (2016), No. 9, 2126.
- [3]. S.G. Kalmykov, P.S. Butorin, M.E. Sasin. Xe laser-plasma EUV radiation source with a wavelength near 11nm—Optimization and conversion efficiency // J. Appl. Phys. 2019. 126, 103301; doi: 10.1063/1.5115785.
- [4]. I.C.A. Foster, K. Kim, R.J. Turnbull and C.D. Hendricks. Apparatus for producing uniform solid spheres of hydrogen // Review of Scientific Instruments 48, 625 (1977); doi: 10.1063/1.1135095.
- [5]. EUV Sources for Lithography, ed. V. Bakshi (SPIE Press, Bellingham, WA, 2005), chpt. 19.

САМООБРАЩЕННЫЕ ЛИНИИ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ АТОМОВ В РАЗРЯДАХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ ИМПУЛЬСАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО ГИРОТРОНА

Летунов А.А., Логвиненко В.П., Князев А.В., Воронова Е.В., Борзосеков В.Д.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: let@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.176

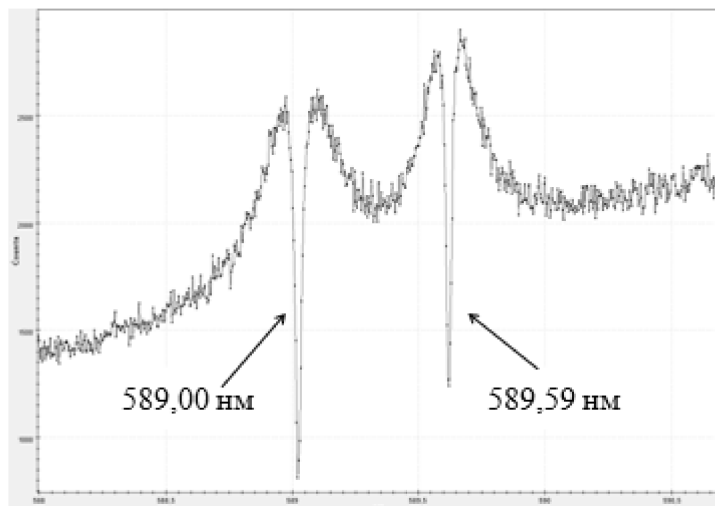
В докладе приведены результаты оптических измерений самообращенных линий в экспериментах по синтезу микро- и наночастиц в микроволновом разряде. Разряды инициировались импульсами излучения мощного гиротрона ($\lambda = 4$ мм, $t = 1 - 8$ мс, $P = 100 - 500$ кВт) в тонких слоях порошковых смесей со свободной верхней поверхностью.

Наблюдается самообращение линий щелочных металлов, а также кальция и серебра, входящих в состав основных компонентов смеси. В большинстве разрядов наблюдается и самообращение линий щелочных атомов, являющихся малыми следовыми примесями.

При использовании спектральных приборов достаточно высокого разрешения были обнаружены характерные детали динамики спектров самообращенных линий, которые могут использоваться для количественной диагностики разрядов. На некоторой стадии разряда, в нашем случае, близкой к его старту, амплитуда линии проходит через максимум, после чего в центре начинает появляться провал [1]. В этом случае максимальная амплитуда соответствует интенсивности излучения черного тела. Типичный спектр линий самообращенного дублета натрия приведен на рисунке.

При самообращении наблюдается значительный рост ширины линий, не связанный с доплеровским уширением и силовыми полями в разряде, поэтому следует крайне осторожно использовать такие линии для оценки параметров, связанных с указанными источниками уширения.

Как видно на рисунке, в центрах линий возникают провалы с быстро растущей глубиной.



В представленном случае центр линии «выедается» полностью и начинается поглощение фонового излучения. Обычно такая ситуация возникает уже после окончания импульса СВЧ.

Были также зарегистрированы спектры с ярко выраженным самопоглощением линий лития и калия, а также кальция и серебра. При этом значительное уширение в литии регистрировалось в случае его присутствия в составе соли как одного из основных компонентов смеси и в виде случайной примеси.

В ряде случаев при использовании некоторых упрощающих предположений возникает возможность грубой оценки плотности атомов, находящихся в основном состоянии.

Литература

- [1] Völker T., Gornushkin I.B. // J. Anal. At. Spectrom., 2023, V. 38, P. 911–916.

ОСАЖДЕНИЕ ПОКРЫТИЙ НА РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ И ШТАМПОВУЮ ОСНАСТКУ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАШИН, НА УСТАНОВКЕ "КРЕМЕНЬ-2"

Мисников В.Е., Обрезков О.И., Шутьев О.Л.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия,
e-mail: misnikov_ve@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.177

В работе рассматривается процесс разработки технологии осаждения износостойких покрытий в вакууме ионно-плазменным методом. Разработку технологического процесса осаждения можно разделить на четыре этапа: разработка химических составов и архитектуры покрытий; разработка технологии изготовления мишеней заданного состава; разработка оборудования для осуществления технологического процесса и разработка режимов осаждения покрытий.

В ходе исследований было выявлено, что наиболее перспективными являются покрытия, имеющие наноразмерную структуру: наноламинированные покрытия, в которых происходит периодическое (с периодом порядка 10 – 20 нм) чередование слоев различного химического состава, и нанокпозиционные покрытия, в которых частицы твердой фазы находятся в аморфной матрице, которая препятствует росту кристаллитов твердых частиц. Принцип увеличения твердости и износостойкости в таких покрытиях описывается уравнением Холла-Петча:

$$HV \approx \sigma_0 + Kd^{-1/2}, \quad (1)$$

где HV – твердость, σ_0 – напряжение начала скольжения дислокаций в кристалле, K – (<https://efre2020.hcei.tsc.ru/>) коэффициент, зависящий от материала. В нанокпозиционных покрытиях с уменьшением размера зерна энергетически затрудняется движение дислокаций, поэтому происходит рост твердости [1].

Для осаждения наноструктурированных покрытий в ходе работы была разработана установка «Кремень-2», в которой реализуется процесс осаждения покрытий из вакуумного дугового разряда.

Установка умеет безмасляную систему вакуумной откачки, позволяющую получать рабочий вакуум на уровне 5×10^{-4} Па. Установка оснащена следующими электрофизическими устройствами:

- 12 дуговых испарителей с током разряда до 140 А, снабженных магнитной системой управления дугой. Система управления дугой позволяет снижать объем капельной фазы в осаждаемом покрытии [2];

- газовый ионный источник очистки с напряжением до 3,5 кВ;

- источник металлических ионов типа MEVVA с ускоряющим напряжением до 50 кВ.

Литература

- [1]. Vereshchaka A.S., Operability increase of edge cutters based on the directed modification of properties their operation surfaces at plating nano-structured multi-level composite coatings // Bulletin of MSTU “Stankin”, 2014, No 4 (31), p. 45–51.
- [2]. Dukhopelnikov D.V., Kirillov D.V. Influence of the Arched Magnetic Field on the Cathode Erosion Rate of the Vacuum Arc Discharge // 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk, 2020, p. 45–51.

ТОКОВЫЕ И ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОСЕКУНДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ВОЗДУХА В КАНАЛЕ

Мурсенкова И.В., Сазонов А.С.

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия,
e-mail: murs_i@physics.msu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.178

Характеристики разряда в высокоскоростном потоке представляют интерес с точки зрения практической реализации контролируемого энерговклада. В задачах плазменной газодинамики это необходимо для оптимизации работы плазменных актуаторов [1]. Целью работы был анализ тока и излучения скользящего поверхностного разряда в сверхзвуковом потоке с наклонной ударной волной при обтекании препятствия в канале ударной трубы.

В разрядной камере ударной трубы [2] инициировался скользящий поверхностный разряд при импульсном напряжении 25 кВ, которое прикладывалось к разрядному промежутку шириной 30 мм и протяженностью 100 мм в направлении потока. Ток регистрировался малоиндуктивным шунтом, излучение разряда – фотокамерами и электронно-оптическими камерами. Измерения проводились в потоках с числами Маха 1,30 – 1,60 и в неподвижном воздухе при плотности 0,02 – 0,25 кг/м³. В однородном воздухе исследуемый разряд развивается в виде параллельных каналов – диффузных и повышенной интенсивности, формирующих плазменный лист площадью 30 × 100 мм² [2]. Осциллограммы тока имеют колебательный характер с декрементом затухания, растущим с увеличением плотности среды. Длительность тока 500 – 800 нс.

После дифракции плоской ударной волны на препятствии устанавливалось его обтекание сверхзвуковым потоком, и в результате взаимодействия наклонной ударной волны с пограничным слоем формировалась зона пониженной плотности [2]. При приложении импульсного электрического поля в этой зоне реализуется повышенное значение приведенного электрического поля E/N . Ток разряда в результате протекал в одиночном прямолинейном токовом канале, свечение которого характеризовалось высокой интенсивностью и продолжительностью до 6 мкс [2]. Электронно-оптическая регистрация показала, что время затухания излучения разряда в потоках значительно больше времени затухания в однородном воздухе и достигает 1300 нс.

Осциллограммы тока, полученные в потоках с наклонной ударной волной на различных временных интервалах течения (160 – 400 мкс после установления обтекания), близки. Динамика тока в потоках отличается большими максимальными значениями и меньшими декрементами затухания колебаний по сравнению с однородным воздухом. Большая проводимость, очевидно, обусловлена большей концентрацией электронов в локализованном токовом канале.

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ.

Литература

- [1]. Komuro A., Takashima K., Suzuki K. et.al. Influence of discharge energy on the lift and drag forces induced by a nanosecond-pulse-driven plasma actuator. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2019. V. 28. 065006. DOI 10.1088/1361-6595/ab1daf.
- [2]. Мурсенкова И.В., Иванов И.Э., Ляо Ю., Зиганшин А.Ф. Исследование взаимодействия поверхностного скользящего разряда с наклонной ударной волной. *Физика плазмы*, 2023. Т. 49. № 6. С. 600.

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТОГО РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ПЛЁНОК, ОСАЖДАЕМЫХ ПЛАЗМЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Обрезков О.И., Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю., Шутьев О.Л., Шевчук С.Л.,
Мисников В.Е., Рукина Ю.И., Кочетов С.Н.

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия,
e-mail: mifst04nmy@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.179

Развитый рельеф осаждаемых плёнок в термоядерных установках является отрицательным фактором, поскольку способствует адсорбции и накоплению изотопов водорода на деталях, обращённых к плазме, а также является источником образующейся пыли и загрязнения плазмы [1]. В то же время для многих приложений развитый рельеф необходим для функциональных свойств таких устройств как суперконденсаторы, катализаторы, а также электроды кардиостимуляторов, для которых нужна большая удельная ёмкость их контакта с тканью миокарда [2]. Свойства плёнок сильно зависят от режимов, при которых они осаждаются. В данной работе изучались плёнки нитрида титана, осаждаемые на титановую подложку при магнетронном распылении титана в присутствии реактивного газа азота. Исследовано влияние параметров процесса осаждения плёнок, таких как энергия осаждаемых ионов, температура подложки, на которую осаждаются продукты распыления, давление в камере в процессе осаждения плёнок, на их свойства. Скорость осаждения плёнок составляла ~900 нм/час. Для всех режимов исследована структура, их удельная площадь поверхности и измерена толщина плёнок. Показано, что наиболее развитая структура плёнок образуется при минимальной энергии осаждаемых ионов, которая варьировалась с помощью отрицательного потенциала подложки относительно плазмы. Однако плёнка с наиболее развитой структурой, полученная при нулевом смещении, имела очень плохую адгезию. При температуре подложки 300°C плёнки получались плотные и гладкие, а при температуре подложки 170°C наблюдалась столбчатая структура с толщиной столбов менее 100 нм. Покрытия, полученные при меньшем давлении в камере, характеризовались большей ёмкостью двойного электрического слоя у катода с исследуемым покрытием при испытаниях в электрохимической ячейке. При сравнении покрытий, полученных при разных температурах подложки во время осаждения, установлено, что более плотные покрытия осаждаются при большей температуре подложки, что соответствует диаграмме Торнтона [3]. При увеличении толщины плёнок за счёт развития сферических структур более крупного масштаба происходит образование фракталоподобных структур и дальнейшее увеличение удельной площади поверхности. Структура и удельная ёмкость плёнок исследовались с помощью испытаний покрытий электродов в электрохимической ячейке, а также растровой электронной и атомно-силовой микроскопии.

Литература

- [1]. Крауз В.И., Мартыненко Ю.В., Свечников Н.Ю., Смирнов В.П., Станкевич В.Г., Химченко Л.Н., Наноструктуры в установках управляемого термоядерного синтеза // УФН, 2010, т. 180, с. 1055.
- [2]. Шальдах М. Электрокардиотерапия. СПб: «Северо-Запад», 1992, 256 с.
- [3]. Thornton J.A. // Ann. Rev. Mater. Sci., 1977. V.7. P. 239.

ИСТОЧНИКИ И МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ДЛИННОМ ВЫСОКОВОЛЬТНОМ РАЗРЯДЕ

Паркевич Е.В., Хирьянова А.И., Хирьянов Т.Ф., Байдин И.С., Шпаков К.В.,
Родионов А.А., Болотов Я.К., Рябов В.А., Огинов А.В.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: parkevich@phystech.edu*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.180

Проведены исчерпывающие измерения эмиссий мощного СВЧ-излучения на частотах 1 – 6 ГГц во время развития лабораторного высоковольтного разряда в 50 см воздушных промежутках при напряжениях порядка 1 МВ (при отрицательной и положительной полярности) [1 – 4]. С высокой точностью локализованы области генерации данного излучения при помощи разработанной сверхширокополосной системы радио-регистрации. Установлены пространственные области генерации СВЧ излучения и проведен их анализ на предмет корреляции с развитием в разряде плазменных структур. Изучена также корреляция СВЧ эмиссий с генерацией в разряде жесткого рентгеновского излучения. Показано, что генерация СВЧ излучения в разряде не может быть однозначно объяснена в терминах общепринятых концепций развивающихся или соударяющихся стримеров. Высказано предположение о том, что появление радиоизлучения на частотах выше 1 ГГц в разряде может быть связано с локальным развитием Черенковских пучковых неустойчивостей в плазме [5].

Работа поддержана Российским научным фондом (грант № 23-19-00524).

Литература

- [1]. E.V. Parkevich, A.I. Khirianova, T.F. Khirianov, I.S. Baidin, K.V. Shpakov, A.A. Rodionov, Ya.K. Bolotov, V.A. Ryabov, Yu.K. Kurilenkov, I.S. Samoylov, S.A. Ambrozevich, A.V. Oginov. Electromagnetic emissions in the MHz and GHz frequency ranges driven by the streamer formation processes // *Phys. Rev. E*, 106 (4), 045210 (2022), doi: 10.1103/PhysRevE.106.045210; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.106.045210>.
- [2]. E.V. Parkevich, K.V. Shpakov, I.S. Baidin, A.A. Rodionov, A.I. Khirianova, T.F. Khirianov, Ya.K. Bolotov, M.A. Medvedev, V.A. Ryabov, Yu.K. Kurilenkov, A.V. Oginov. Streamer formation processes trigger intense x-ray and high-frequency radio emissions in a high-voltage discharge // *Phys. Rev. E*, 105, L053201 (2022), doi: 10.1103/PhysRevE.105.L053201; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.105.L053201>.
- [3]. Parkevich E.V., Khirianova A.I., Khirianov T.F., Baidin I.S., Shpakov K.V., Tolbukhin D.V., Bolotov Ya.K., Ryabov V.A., Ambrozevich S.A., Oginov A.V. Natural sources of intense ultra-high-frequency radiation in high-voltage atmospheric discharges // *Physical Review E*, 108 (2), 025201 (2023); <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.108.025201>.
- [4]. Parkevich E.V., Khirianova A.I., Khirianov T.F., Baidin I.S., Shpakov K.V., Tolbukhin D.V., Bolotov Ya. K., Ryabov V.A., Ambrozevich S.A., Oginov A.V.. Temporal correlation between hard x rays and radio emissions in the MHz and GHz frequency ranges generated by a laboratory high-voltage discharge // *Journal of Applied Physics* (2023), 134 (15); <https://doi.org/10.1063/5.0168616>.
- [5]. Kuzelev M.V., Rukhadze A.A. Waves in inhomogeneous plasmas and liquid and gas flows. Analogies between electro-and gas-dynamic phenomena // *Physics-Uspekhi*, 61 (8), 748 (2018); <https://ufn.ru/en/articles/2018/8/c/>.

СРАВНЕНИЕ СТЕПЕНИ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДИФИКАЦИИ БЕЛКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ СО СПОРИЦИДНЫМ И ФУНГИЦИДНЫМ ЭФФЕКТОМ

¹Пискарев И.М., ²Аристова Н.А., ³Иванова И.П.

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, г. Москва, Россия, e-mail: i.m.piskarev@gmail.com

² Уральский федеральный университет, Нижнетагильский технологический институт, г. Нижний Тагил, Россия, e-mail: aristova-na@mail.ru

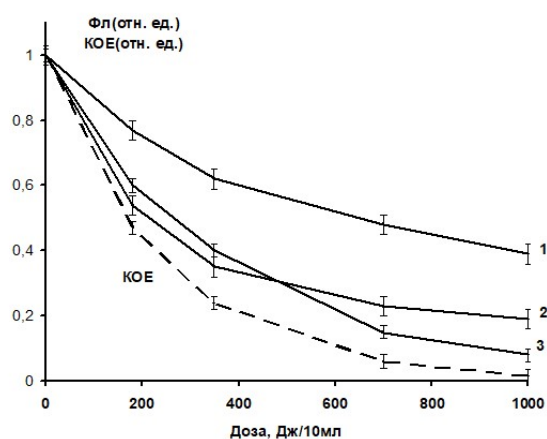
³ Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, e-mail: ivanova.ip@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.181

Исследованы УФ спектры поглощения и спектры флуоресценции для альбумина, тирозина и триптофана после действия импульсного излучения горячей плазмы генератора ИР10 [1]. Основными компонентами клеток являются белки, поэтому повреждение структуры белков может быть критичным фактором, ответственным за гибель микроорганизмов. Работа посвящена сравнению степени повреждения модельных растворов альбумина, тирозина, триптофана и фенилаланина с фунгицидным эффектом водной суспензии микромицетов *Aspergillus Niger* и спорицидным эффектом *E-Coli* в зависимости от дозы импульсного излучения горячей плазмы искрового разряда.

Схема эксперимента аналогична использованной в работе [1]. В качестве тестового белка использовался бычий сывороточный альбумин. В состав бычьего сывороточного альбумина входят 607 аминокислотных остатков. Из них по спектрам поглощения и спектрам флуоресценции могут идентифицироваться фенилаланин, тирозин и триптофан. Установлено, что оптическая плотность линии поглощения УФ спектров в растворах альбумина, триптофана и тирозина остается постоянной при всех дозах обработки. Это означает, что ароматическое кольцо не повреждается и УФ спектры поглощения не могут быть использованы для оценки состояния белка.

Зависимость выходов флуоресценции тестовых препаратов от дозы облучения через сутки после обработки излучением генератора ИР10 представлена на рисунке.



Зависимость флуоресценции растворов тирозина (1), альбумина (2) и триптофана (3) от дозы облучения генератором ИР10 через сутки после обработки. Фл (отн. ед.) – флуоресценция, относительные единицы; за единицу принята флуоресценция исходных необработанных растворов. КОЕ – относительное число колониеобразующих единиц для бактерии *Aspergillus Niger* после обработки генератором ИР10, за единицу принята величина КОЕ в сходном необработанном растворе.

Из рисунка видно, что выход флуоресценции аминокислот и белка коррелирует с изменениями КОЕ тестового микроорганизма, поэтому белок можно использовать для качественной оценки фунгицидного и антимикробного действия физического фактора.

Литература

[1]. Piskarev I.M., Ivanova I.P. // Plasma Sources Sci. Technol. 28, 085008 (10 p), 2019.

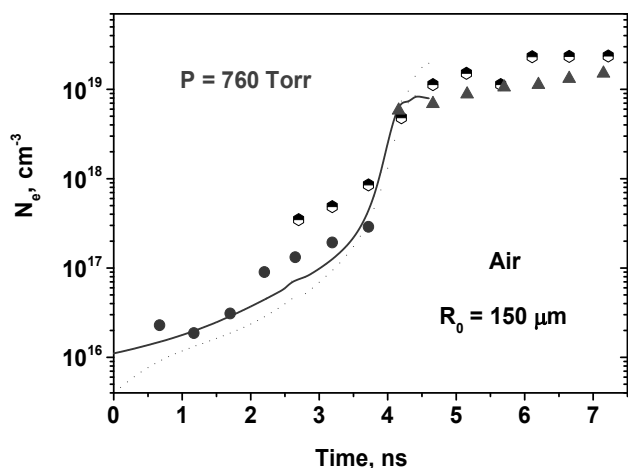
КОНТРАКЦИЯ ИМПУЛЬСНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ РАЗРЯДОВ В АЗОТЕ И ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Попов Н.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, e-mail: NPopov@mics.msu.su

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.182

В последние годы появился ряд экспериментальных работ по исследованию контракции импульсных наносекундных разрядов в воздухе [1–3] и азоте [4] атмосферного давления. Импульс тока разряда, как правило, составлял $t_{imp} = 10–20$ ns, $I_{max} = 40–60$ А, межэлектродное расстояние $d \leq 3$ mm. Отличительной особенностью всех исследованных разрядов являлась их контракция, то есть резкое уменьшение радиуса плазменного канала на наносекундных временах. Следствием контракции являлся быстрый рост плотности электронов, которая за 3–4 нс увеличивалась от $N_e = 10^{15}–10^{16}$ см⁻³ до $N_e > 10^{19}$ см⁻³ (см. рис. 1). Плотность электронов измерялась по штарковскому уширению линий атомарного водорода, кислорода или азота.



В данной работе представлена 1-D модель с заданной временной динамикой импульса тока разряда, описывающая механизм контракции наносекундных разрядов для условий экспериментов [3, 4]. Отличительной особенностью разработанной модели является учет реакций диссоциации возбужденных молекул $N_2(A, B, C)$ электронным ударом, а также ступенчатой ионизации образующихся возбужденных атомов $N(^2D)$, $N(^2P)$ [5].

На рис. 1 приведены результаты расчетов временной динамики плотности электронов в воздухе для условий экспериментов [3]. Расчеты проводились в рамках токового приближения с использованием экспериментально измеренного импульса тока [3]. На временах $t = 1–3$ нс происходит эффективная наработка атомарного азота, концентрация которого достигает 10^{19} см⁻³. Резкий рост плотности электронов при $t > 3,5$ нс связан с эффективной ионизацией атомов азота электронным ударом и образованием атомарных ионов N^+ с относительно низким коэффициентом электрон-ионной рекомбинации [5].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (23-17-00264).

Литература

- [1]. Lo A., Cessou A., Lacour C. et al. // Plasma Sources Sci. Technol., 2017, P. 045012.
- [2]. Orriere T., Moreau E., Pai D. // J. Phys. D: Appl. Phys., 2018, P. 494002.
- [3]. Minesi N., Mariotto P., Stancu G., Laux C. // Plasma Sources Sci. Technol., 2023, P. 044005.
- [4]. Albrecht H., Herden W.H., Maly R. et al. // 1977, SAE-770853.
- [5]. Zhang B., Zhu Y., Zhang X., Popov N.A. et al. // Plasma Sources Sci. Technol., 2023.

УСТАНОВКА "МИКРОМЕД" ОСАЖДЕНИЯ ТОНКОПЛЁНОЧНЫХ БИОСОВМЕСТИМЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЭНДОКАРДИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ

Обрезков О.И., Рукина Ю.И., Шевчук С.Л., Мартыненко Ю.В., Мисников В.Е.,
Шутьев О.Л., Ильинский Д.И.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.183

Технологическая установка «Микромед» предназначена для обработки в вакууме групп деталей с целью нанесения на их рабочие поверхности биосовместимых покрытий, обладающих специальными функциональными свойствами, достаточными для надежной работы этих деталей в составе имплантируемых в сердце человека эндокардиальных электродов электрокардиостимуляторов.

Установка «Микромед» оснащена набором электрофизических устройств. Для нанесения покрытий используется планарный магнетрон на постоянном токе и импульсный дуговой испаритель. Источник ионов с замкнутым дрейфом электронов, формирующий ленточный пучок ионов аргона, эффективно используется для очистки и активации поверхности перед осаждением функциональных слоев. Радиочастотный генератор плазмы предназначен для создания газоразрядной низкотемпературной плазмы и может использоваться как при очистке подложек, так и при магнетронном осаждении покрытий. Планетарная карусель, позволяющая наносить покрытия одновременно на 1000 кардиоэлектродов, снабжена ленточным нагревателем, датчиком температуры и возможностью подачи электрического смещения для регулирования энергии ионов, осаждаемых на покрытие. Всё это позволяет в едином вакуумном цикле проводить процессы нанесения функциональных слоев, значительно отличающихся по физико-химическим свойствам (состав, плотность, твердость, электропроводимость, оптическая прозрачность). Откачка технологической камеры осуществляется турбомолекулярным насосом до остаточного вакуума порядка 10^{-4} Па. Конструктивное исполнение откачной системы позволяет проводить процессы осаждения в диапазоне давления $10^{-2} \div 10$ Па.

Работа, которая выполнялась в рамках совместного проекта с НИИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева, заключалась в разработке технологического процесса получения тонкопленочного биосовместимого покрытия кардиоэлектродов (БПКЭ). В ходе работы решались задачи исследования и оптимизации параметров различных технологических операций процесса осаждения многослойного покрытия на кардиоэлектроды: очистка подложек методами ионно-лучевой обработки, осаждения тонкопленочного слоя титана и нитрида титана методом магнетронного распыления мишени в инертной и химически активной среде. Изучены вольт-амперные характеристики магнетрона и ионного источника, полученные при различных потоках инертного и смеси инертного и реактивного газов в камеру, распределение магнитного поля магнитной системы магнетрона и ионно-оптической системы источника ионов, установлена зависимость морфологии и структуры тонкопленочных слоев от давления в камере, температуры и электрического смещения на подложке, что позволило оптимизировать параметры процесса послыонного осаждения для формирования покрытия с заданными свойствами.

Кардиоэлектроды с покрытиями с развитой поверхностью обеспечивают наиболее эффективную стимуляцию сокращений сердечной мышцы и снижение энергопотребления батареи ЭКС вследствие большой ёмкости двойного электрического слоя (ДЭС) [1] и малого импеданса. Техническая оснащённость разработанной в НИИЦ «Курчатовский институт» технологической установки «Микромед» позволяет в широком диапазоне варьировать как номенклатуру технологических операций, так и параметры процесса осаждения тонкопленочных покрытий. Разработанный технологический процесс осаждения многослойного покрытия с функциональным пористым слоем нитрида титана на электроды кардиостимуляторов позволяет увеличить ёмкость ДЭС в 20 – 30 раз и уменьшить импеданс ДЭС в 15 – 20 раз по сравнению с образцами без покрытия.

Литература

- [1]. Н. Specht // Proceedings of the Materials and Processes for Medical Devices Conference 2006, P. 169–173.

ПРОТЯЖЕННЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ШНУР В УСТАНОВКЕ ЛИУ-ПЭТ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ НАПРАВЛЕННОГО ПОТОКА ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ

¹Аржанников А.В., ¹Самцов Д.А., ¹Синицкий С.Л., ¹Старостенко Д.А.,
²Григорьев А.Н., ²Воробьев С.О., ²Протас Р.В., ²Мастюк Д.А.

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

²Российский Федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.184

Электромагнитное излучение терагерцового диапазона частот активно применяется в большом количестве научных и практических задач. В качестве примеров его использования можно провести следующие: нагрев плазмы, спектроскопия быстропротекающих процессов исследования и воздействие на материалы в соответствующей области спектра. В настоящее время наименее освоенным, по сравнению с другими, остаётся частотный диапазон 0,3 – 1 ТГц. Исследования направленные на решения проблемы создания мощных источников ТГц излучения ведутся в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, где используется метод генерации на основе пучково-плазменного взаимодействия [1]. В настоящее время исследования ведутся на специализированной установке ГОЛ-ПЭТ, где реализована генерация излучения в области частот 0,1 – 0,3 ТГц при инжекции РЭП с энергией 0,5 МэВ, плотностью тока 1 – 2 кА/см² и полным током 20 кА в плазму плотностью 5×10^{14} см⁻³ [2].

Полученные к настоящему моменту понимание механизмов генерации излучения и результаты, достигнутые в экспериментах на установке ГОЛ-ПЭТ, позволили сформировать проект установки ЛИУ-ПЭТ, предназначенной для генерации излучения в диапазоне 0,3 – 0,9 ТГц [3]. Для перехода в частотный диапазон 0,3 – 0,9 ТГц при генерации излучения в системе пучок-плазма необходимо обеспечить уровень плотности плазмы $\sim 5 \times 10^{15}$ см⁻³ и величину плотности тока пучка масштаба 10 кА/см² при сохранении его угловой расходимости на низком уровне. В рамках проекта предлагается использовать линейный индукционный ускоритель (ЛИУ) [4], позволяющий получить пучок электронов с энергией 1 МэВ и током 2 кА и возможность его сжатия для обеспечения плотности тока 10 – 15 кА/см². С другой стороны, необходимо обеспечить формирование плазменного шнура диаметром 16 мм протяжённостью 300 мм и величиной плотности $\sim 5 \times 10^{15}$ см⁻³.

Данный доклад будет посвящён вопросу создания системы формирования плазмы с требуемыми параметрами. В докладе будут обозначены основные требования к системе формирования плазмы. Рассмотрены подходы, которые позволят обеспечить формирование плазмы с необходимыми параметрами. Будет представлен проект системы формирования плазмы на базе импульсного высоковольтного разряда.

Литература

- [1]. Arzhannikov A.V., Timofeev I.V. // Plasma Phys. and Contr. Fusion. 54 (10), P. 105004, 2012.
- [2]. Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Popov S.S. et al. // IEEE Transactions on Plasma Science, 50 (8), P. 2348–2363, 2022. DOI: 10.1109/TPS.2022.3183629.
- [3]. Аржанников А.В., Синицкий С.Л., Старостенко Д.А. и др. // Сибирский физический журнал, 18 (1), С. 28 – 42, 2023. DOI: 10.25205/2541-9447-2023-18-1-28-42.
- [4]. Nikiforov D.A., Petrenko A.V., Sinitsky S.L., et al. // Journal of Instrumentation, 16 (11), P. 11024, 2021. DOI: 10.1088/1748-0221/16/11/P11024.

КОМПАКТНЫЙ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ЭЛЕКТРОНОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЗАДАЧ ЯДЕРНОЙ ФОТОНИКИ

Савельев А.Б., Горлова Д.А., Иванов К.А., Цымбалов И.Н.

Физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: abst@physics.msu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.185

Получение направленных пучков электронов при взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса релятивистской интенсивности с подкритической плазмой является одной из наиболее активно развивающихся областей на стыке лазерной физики и физики плазмы [1]. Наиболее впечатляющие результаты получены при использовании уникальных лазерных систем с пиковой мощностью от 0,5 до нескольких ПВт: энергия квазимоноэнергетического пучка электронов достигает 8 ГэВ при длине ускорения всего 20 см [2]. Вместе с тем, низкая частота следования импульсов таких систем (не выше 0,1 Гц) определяет низкий средний ток пучка. Кроме того, для многих задач не требуются столь большие энергии электронов, при этом важен заряд электронного импульса и средний ток пучка [3]. Именно такие электронные импульсы могут быть получены с использованием фемтосекундных лазерных комплексов тераваттного уровня пиковой мощности, способных функционировать на килогерцовых частотах следования.

В настоящей работе представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований нескольких схем ускорения электронов фемтосекундным лазерным импульсом с пиковой мощностью 1–2 ТВт, возможности масштабирования развитых подходов на большие мощности (десятки ТВт и ПВт), а также применение этих пучков для генерации вторичного излучения в широком электромагнитном диапазоне – от терагерцового до гамма. В частности, нами получены пучки электронов с энергией до 15 МэВ, зарядом сотни пикокулон и расходимостью около 0,1 рад [4, 5]. Будут представлены оригинальные подходы, обеспечивающие эффективное управление энергетическим спектром пучка при высокой частоте следования, генерацию квазиуниполярных импульсов терагерцового излучения [6], гамма вспышек и фотоядерных реакций [7].

Литература

- [1]. Esarey E., Schroeder C.B., Leemans W.P. // Rev. Mod. Phys. 81, 1229, 2009.
- [2]. Gonsalves A.J. et al. // Phys. Rev. Lett. 122, 084801 (2019).
- [3]. Недорезов В. Г., Рыкованов С. Г., Савельев А. Б. // УФН 191, 1281–1306, 2021.
- [4]. Tsymbalov I., Gorlova D., Shulyapov S., et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 61(7):075016, 2019
- [5]. Tsymbalov I., Gorlova D., Ivanov K., et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 63 (2), 02201, 2021.
- [6]. Gorlova D., Tsymbalov I., Volkov R., Savel'ev A. // Laser Physics Letters, 19 (7), 075401, 2022.
- [7]. Gorlova D., Zavorotny A., Tsymbalov I., et al. // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 17 (4), 865–873, 2023.

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ "ВЗРЫВНОЙ" МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ И СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ 2000 – 10000 К

^{1,2}Савватимский А.И., ²Онуфриев С.В.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: savvatimskiy.alexamder@gmail.com

²Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: s-onufriev@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.186

Физические свойства тугоплавких соединений необходимы в атомной энергетике для создания тепловой защиты при высоких температурах. Представлена методика быстрого («взрывного») нагрева и результаты экспериментов по теплофизическим свойствам веществ до предельно высоких температур. Основатель этой методики – Сергей Владимирович Лебедев (1913 – 1990), исследовал ее применение сначала в ФИАНе, а затем в ОИВТ РАН. Используется быстрый нагрев (~5 мкс) импульсом электрического тока [1], что обеспечивает получение в едином акте нагрева сразу нескольких теплофизических свойств (энтальпии H , теплоты плавления ΔH , теплоемкости C_p , электросопротивления ρ). Ключевое решение этой методики заключается в ограничении объема вокруг расширяющегося жидкого образца (проволока или фольга). Импульсный нагрев током эффективен также в отношении экономии затрат при достижении высоких температур. Не требуются финансовые средства на создание стационарного оборудования для постоянного поддержания высокой температуры, нагрев обеспечивается джоулевым тепловыделением при кратковременном прохождении импульса тока через проводящий образец. За счет скорости процесса нагрева жидкий образец сохраняет свою форму и положение в пространстве во время опыта. Лазерная подсветка образца дает возможность измерить тепловое расширение жидких металлов (Zr, Fe, Hf). Размещение образцов в толстостенных сапфировых ячейках позволяет исследовать свойства веществ при повышенных давлениях (вплоть до десятков кбар).

Температура измерялась [2] быстродействующим фотодетектором по излучению поверхности плоского образца и рассчитывалась далее по формуле Планка (при известном значении нормальной излучательной способности материала ϵ). В случае отсутствия последней в литературе использовался образец в виде уголкового модели черного тела: две тонкие плоскости, расположенные под углом (в форме приоткрытой книги). Это обеспечивало получение достоверного результата по температуре, с надежностью 0,95.

Представлены данные для тугоплавких карбидов ZrC, ZrC + C, TaC, HfC (до 5000 К), обзор представлен в [3]. Впервые в мировой практике, был выполнен эксперимент (до 5500 К) с карбидом (HfTaTiNbZr)C, представляющим собой твердый раствор пяти карбидов [4]. Высокая термодинамическая стабильность таких многокомпонентных карбидов, высокая тугоплавкость и коррозионная стойкость, – привлекательны для создания эффективной тепловой защиты в атомной энергетике.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-79-30086-П, (руководители Г.А. Месяц и В.С. Лебедев, ФИАН, Москва).

Литература

- [1]. Савватимский А.И., Онуфриев С.В. // Ядерная физика и инжиниринг, 2015, Т. 6, С. 622.
- [2]. Онуфриев С.В., Савватимский А.И. // ТВТ, 2018, Т. 56, С. 704.
- [3]. Савватимский А.И., Онуфриев С.В., Аристова Н.М. // УФН, 2022, Т. 192, С. 642.
- [4]. Савватимский А.И., Онуфриев С.В., Седегов А. С. Юдин С.Н., Московских Д.О. // ТВТ, 2022, Т. 60 (5), С. 672.

ЖИДКИЙ УГЛЕРОД ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ

^{1,2}Савватимский А.И., ²Онуфриев С.В.

¹Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: savvatimskiy.alexamder@gmail.com

²Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: s-onufriev@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.187

Наиболее полно история исследования физических свойств графита и жидкого углерода, начиная с 1911 и вплоть до 2015 года, изложена в книге [1]. Тройная точка углерода при давлении 120 бар получила экспериментальное подтверждение. Нагрев графита током за короткое время (микросекунды) имеет ряд преимуществ перед стационарным нагревом. Впервые (1986 год) при быстром нагреве током было измерено относительное расширение графита (около 70%) при плавлении (давление ~200 бар). Впоследствии этот результат был подтвержден при лазерном нагреве. Детали исследований изложены в обзорах [1, 2].

Электросопротивление пиролитического графита плотностью 2,26 г/см³, отнесенное к исходным размерам, при плавлении ($T=4900$ К) растет от 450 до 630 мкОм·см. Температура фиксировалась с поверхности графита, через слой стекла. Заметим, что в случае расплавления тонкого слоя стекла оптическое пропускание не изменяется (в этом его положительное отличие от сапфира Al₂O₃). С дальнейшим ростом температуры электросопротивление углерода слабо растет, достигая 900 мкОм·см при 8000 К. При этом на кривой электросопротивления нет признаков кипения. Предполагается, что точка кипения жидкого углерода находится выше 8000 К. Отсутствие кипения при 8000 К может быть объяснено также повышенным давлением в ячейке, при окончании импульсного нагрева.

Для жидкого углерода при температурах 5000 – 7000 К была измерена теплоемкость C_V (~2 Дж/(г·К)), которая оказалась вдвое меньшей, чем C_p (~4 Дж/(г·К)), измеренная ранее также импульсной методикой. Измерения C_V выполнено при быстром нагреве пластинки графита, зажатой в двух толстостенных пластинах стекла ТФ-5. При этом электросопротивление жидкого углерода – константа, подобно ртути нагреваемой в ограниченном объеме.

При быстром нагреве графита в сапфировых толстостенных капиллярах [3] получены значения давления выше 50 кбар (оценка); температуры – порядка $25 \cdot 10^3$ К (оценка). Утверждение [4] о переходе металл–неметалл при плавлении графита – противоречит всем известным экспериментам. Последующая публикация [5] представила линию плавления графита, не совпадающую со всеми экспериментами, в частности с данными Ф. Банди (США) и М. Тогайя (Япония). Наконец, в печати [6] появилось заявление А. Рахеля [5] о том, что «*впервые исследованы свойства жидкого углерода*», что совершенно не соответствует известной исторической картине исследования углерода, рассмотренной в [1, 2].

Работа выполнена при поддержке Российский научный фонда, грант № 19-79-30086-П, (руководители Г.А. Месяц и В.С. Лебедев, ФИАН, Москва).

Литература

- [1]. Savvatimskiy A.I. // Carbon at High Temperatures. Springer, 2015. V. 134. 246 p.
- [2]. Савватимский А.И., Онуфриев С.В. // УФН. 2020. Т. 190. № 10. С. 1085–1108.
- [3]. Savvatimskiy A.I. // Carbon, 2009, V.47, P. 2322–2328.
- [4]. Kondratyev, Korobenko and Rakhel // J. Phys.: Condens. Matter 2016, 28, 265501.
- [5]. Kondratyev A.M. and Rakhel A. D. // Physical Review Letters 2019,122, 175702.
- [6]. <https://indicator.ru/chemistry-and-materials/svoystva-zhidkogo-ugleroda-14-05-2019.htm>.

ФОРМИРОВАНИЕ ИОНОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

¹Степанов И.Г., ¹Бычков В.Л., ¹Голубков Г.В., ²Бычков Д.В., ¹Голубков М.Г.,
²Ваулин Д.Н.

¹ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: ilyastep91@mail.ru

²Физический факультет, Московский государственный университет им.
М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: bychvl@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.188

Сведения о распределении концентраций ионов в тропосфере на высотах до 40 км имеют важное теоретическое и прикладное значение, поскольку участие ионов в физико-химических процессах определяет динамику формирования заряда тропосферы и облаков. Анализ процессов, приводящих к накоплению и изменению сорта ионов, необходим в связи с определением фоновых условий для развития различных типов атмосферных разрядов и разрядов, используемых в плазмохимических технологиях. Более того, знание ионного состава атмосферы требуется при моделировании устройств плазменной аэродинамики, когда необходимо создать область плазмы на высотах, где процессы ионизации за счет радона в приземном слое атмосферы малоэффективны.

Важнейшую роль в образовании ионов в тропосфере играют процессы ионизации с участием космических лучей. В расчетах использованы данные по альтитудной зависимости скорости ионизации $Q(h)$ космическими лучами в области высот, на которых отсутствует ионизация за счет процессов с участием радона.

Целью данного исследования является определение высотной зависимости концентрации ионов, образующихся в тропосфере в спокойной геомагнитной обстановке под действием космических лучей и радиоактивного γ -излучения от поверхности почвы во влажной атмосфере. Полученные результаты необходимы для управления процессами формирования слоистых грозных облаков и искусственного стимулирования выпадения осадков [1].

Для расчета концентраций ионов была разработана кинетическая модель, включающая 47 компонентов и 149 реакций. При этом использовался программный пакет KINET. Показано, что ионизация воздуха космическими лучами на высотах от 5 до 35 км приводит к образованию плазмы, состоящей в основном из ионов $H^+ \cdot (H_2O)_4$ и $O_2^- \cdot (H_2O)_2$. Максимумы концентраций ионов наблюдаются на высотах от 10 до 15 км в условиях минимальной магнитной жесткости.

Данные результаты резко отличаются от результатов модельных расчетов для сухого воздуха. Они позволяют создавать реалистичные модели зарядки облаков и дополнять выводы работ [1, 2], в которых оценки делались для сухого воздуха.

Полученные данные о распределении концентрации ионов в тропосфере позволяют реализовать плазменные области для искусственного стимулирования выпадения осадков без применения дорогостоящих химических реагентов.

Литература

- [1]. Смирнов Б.М. Физика глобальной атмосферы. Парниковый эффект, атмосферное электричество, эволюция климата. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2017.
- [2]. Чэнсюнь Ю., Чжицзянь Л., Бычков В.Л. и др. Распределение концентраций положительных и отрицательных ионов в тропосфере // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 10. С. 28 – 37.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ

Карташева А.А., Гуторов К.М., Подковыров В.Л., Муравьева Е.А., Лукьянов К.С.,
Климов Н.С.

*Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, округ
Троицк, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.189

Одним из перспективных направлений применения установок типа КСПУ является разработка на его основе мощных электрореактивных плазменных ракетных двигателей [1]. В рамках работ по этому направлению актуальны задачи эффективного использования плазмообразующего газа и вложенной в разряд энергии, а также снижение эрозии электродной системы плазменного ускорителя. Исследование пространственно-временных характеристик разряда и потока плазмы, генерируемого КСПУ, позволит оптимизировать геометрию и режимы работы КСПУ с целью формирования более однородных плазменных потоков, обеспечения устойчивой работы и уменьшения роли диссипативных процессов.

Экспериментальные исследования были проведены на квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе, генерирующем сверхсигнальный поток водородной плазмы с энергосодержанием 125 кДж и длительностью 1 мс. С помощью высокоскоростной видеорегистрации впервые получена пространственно-временная структура излучения разряда. На протяжении плазменного импульса длина области свечения в разрядном промежутке колеблется в диапазоне от 2 до 7 см.

Показано, что на торце электродной системы ускорителя наблюдается радиальная неоднородность свечения плазменного потока. Существует область диверторного свечения размерами 8,5 см в продольном направлении и 2,7 см в радиальном. В работе показано, что данная область характеризуется наличием примесей материалов электродной системы и повышенными значениями плотности электронов. Максимальное значение концентрации электронов в этой области, полученное на основе измерения штарковского уширения линии H_{β} , равно $(4 \pm 0,7) \times 10^{16} \text{см}^{-3}$. Данная величина в 4 раза превышает значение $n_e = (1 \pm 0,2) \times 10^{16} \text{см}^{-3}$, полученное вне этой области с помощью того же метода.

В [2] на основе высокоскоростной видеорегистрации показано, что плазменный поток за пределами области радиальной неоднородности в продольном направлении представляет собой чередующиеся во времени темные и светлые области. В данной работе показано, что эти периодические изменения связаны с направленным движением плазменного потока.

Проведено измерение временных зависимостей концентрации электронов одновременно с помощью двух независимых методов. Первый основан на измерении штарковского уширения H_{β} . В качестве второго была применена гетеродинная интерферометрия. Из сопоставления значений концентрации, полученных с помощью указанных методов, следует, что значения n_e плазменного потока на расстоянии 90 см от выходного торца электродной системы лежат в диапазоне от 3×10^{15} до $7 \times 10^{15} \text{см}^{-3}$.

Исследование выполнено в рамках Государственного контракта от 25.08.2022 № Н.4ф.241.09.22.1127, Государственного контракта от 29.04.2021 № Н.4ц.241.09.21.1115.

Литература

- [1]. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. – 2008.
- [2]. Карташева А.А., Гуторов К.М., Подковыров В.Л., Муравьева Е.А., Лукьянов К.С. Экспериментальное определение характеристик плазменного потока квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя. // Тезисы докладов 20-й Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы» – 2023.

НАГРЕВ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ ГЕЛИКОНОВОЙ АНТЕННЫ В УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

¹Чан К.В., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Федорович С.Д., ^{1,2}Карпов А.В., ^{1,3}Кавыршин Д.И.,
¹Лукашевский М.В., ¹Губкин М.К., ¹Перегудов Д.В., ¹Рогозин К.А., ¹Коньков А.А.,
¹Анисимов Д.А., ¹Чилин М.С.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

³Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.190

В установке ПЛМ-М [1] проводятся исследования по взаимодействию стационарной плазмы с поверхностью теплозащитных материалов термоядерного реактора и исследования по разработке технологии создания плазменного двигателя. Одна из решаемых задач заключается в создании плазмы высоких электронных плотности (до 10^{14} см⁻³) и температуры (10 – 15 эВ) в слабом магнитном поле (~0,03 Тл) и поддержании ее посредством возбуждения геликоновых волн на частотах 13,56 и 27,12 МГц.

Плазма генерируется в процессе ступенчатой ионизации электронным ударом атомов плазмообразующего газа (гелия, водорода). Необходимая для процесса ступенчатой ионизации плотность тока электронов достигается за счет термоэлектронной эмиссии при нагреве танталового катода до температуры 2300 К. Для нагрева плазмы используется ВЧ-генератор мощностью до 5 кВт и охлаждаемая антенна, установленная внутри вакуумной камеры в узле геликонового нагрева на рабочих частотах 13,56 и 27,12 МГц. В результате плазменный разряд поддерживается в течение нескольких часов (8 часов и более).

В рамках данной работы разработана оптимальная схема системы согласования, которая предназначена для того, чтобы трансформировать плазменную нагрузку в чисто активную нагрузку 50 Ом. Данная система обеспечивает высокий уровень нагрузочной мощности без подстройки элементов согласования во время разряда. Разработана методика определения поглощенной ВЧ-мощности плазмой путем измерения ВЧ-тока и определения эквивалентного сопротивления плазмы. Будут определены оптимальные режимы нагрева на частотах 13,56 и 27,12 МГц при изменении внешнего неоднородного магнитного поля и начальной электронной плотности плазмы. Проведены сравнительные исследования эффективности ВЧ-нагрева плазмы на базе охлаждаемой геликоновой антенны с плазмообразующими рабочими газами – гелием и аргоном с малой добавкой водорода. В экспериментах измерена эффективность передачи энергии плазме в широком диапазоне плотностей при различных значениях магнитного поля. Проведены измерения параметров плазмы с помощью оптической эмиссионной спектроскопии и электрических зондов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 21-79-10281.

Литература

[1]. V.P. Budaev et al. // J. Phys.: Conf. Ser., 2019, V. 1383, P. 012016.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕМКостНОГО ВЧ-РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В СЛОЖНЫХ ГЕОМЕТРИЯХ: ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ

Варшавчик Л.А., Бочарников В.А., Старовойтов Е.А., Галицын Д.Д., Никитенко С.А.,
Мухин Е.Е.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: lidia.varsh@mail.ioffe.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.191

Емкостной высокочастотный (ВЧ) разряд низкого давления имеет широкий спектр применения, от чистки диагностических зеркал токамаков-реакторов до технологических процессов, таких как модификация, стерилизация и шлифовка поверхностей, травление и осаждение пленок в микроэлектронике. Разработка и оптимизация таких процессов, равно как и исследование режимов и физики ВЧ разряда, требуют проведение численного моделирования.

Существенно усложняет задачу наличие ряда условий, необходимых для практического применения результатов расчетов: для физической корректности необходима гарантия непрерывности тока на электродах (т.е. учет токов смещения), возможность моделировать разряд в произвольных геометриях требует проведения 3D расчетов, а точное описание поверхностей возможно только при использовании нерегулярной (треугольной) расчетной сетки. Дополнительными важными требованиями к проведению расчетов являются скорость расчета, наличие пользовательского интерфейса и вспомогательного функционала.

Перечисленные требования были реализованы в разработанном нами коде KITE [1]. Помимо моделирования емкостного ВЧ разряда низкого давления, код также позволяет проводить расчет транспорта и напыления примесей в сложных геометриях, таких как диагностические каналы ИТЭР. Расчеты проводятся на суперкомпьютере ФТИ им. Иоффе.

В модификации кода 2023 года к стандартной модели расчета локальных электрических полей (задача Дирихле – уравнение Пуассона и фиксированные потенциалы на электродах), создаваемых частицами в плазме, для учета токов смещения были добавлены два дополнительных граничных условия. Из получившейся системы уравнений следует равенство нулю суммы зарядов на электродах и в плазме, что эквивалентно условию непрерывности тока. Расчет перетекания заряда по внешней электрической цепи позволит проводить моделирование разряда как с наличием постоянного смещения по напряжению, так и в режиме заземления по постоянному току. Однако дополнительные граничные условия делают матрицу системы уравнений несимметричной и плохо обусловленной, что создает технические трудности ее решения, особенно на сложных геометриях.

В данной работе показаны результаты моделирования разряда кодом KITE на модельных геометриях, таких как вложенные сферы, плоскопараллельные пластины, расчет изолированной системы заряженных частиц. Проводится сравнение со стандартной моделью. Исследуется сходимость и устойчивость модели при вариации геометрий и расчетных сеток.

Планируется валидация кода данными с установки ГЕС и некоторыми другими.

Литература

- [1]. Varshavchik L.A. et al. Three-dimensional simulation of neutral transport in gases and weakly ionized plasmas // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020. Т. 63. №. 2. С. 025005.

НАНЕСЕНИЕ БАКТЕРИЦИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕДИЦИНСКИЕ ИНСТРУМЕНТЫ С ПОМОЩЬЮ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Гребенщикова М.М., Желтухин В.С.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет
им. А.Н. Туполева, г. Казань, Россия, grebenshikova.marina@yandex.ru;
vzheltukhin@gmail.com*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.192

Для снижения числа осложнений при установке имплантатов суставов в травматологии перспективно применение титано-гафниевого нитридного покрытия металлических конструкций [1]. Покрытие обладает бактерицидными свойствами и совместимо с тканями живого организма.

Процесс нанесения покрытия основан на конденсации соединений из металлической плазмы электродугового разряда в среде реакционного газа. В конденсированных покрытиях и на их поверхности присутствуют кластеры металла и нанокпельная фаза совместного нитрида титана и гафния $TiHfN_2$. Механизм воздействия покрытия на бактерии может быть связан с миграцией наночастиц нитридов с поверхности покрытия и их токсического воздействия на микрофлору [2].

С целью повышения выхода наночастиц с покрытия поверхность обрабатывали потоком низкоэнергетичных ионов высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕ) пониженного давления при давлении 15 – 30 Па. При этом плотность ионного тока составляла 0,6 – 0,8 А/м² и с энергией ионов 50 – 70 эВ в диапазоне вкладываемой в разряд мощности 750 – 1000 Вт [3]. Ионы приобретают такую энергию в слое положительного заряда у поверхности образца толщиной 1,0 – 3,0 мм. При столкновении с поверхностью кинетическая энергия иона трансформируется в энергию колебаний атомов поверхности.

Для определения механизма воздействия ВЧЕ разряда требуется разработка математической модели взаимодействия ионного потока с титано-гафниевым нитридным покрытием. Модель описывается системой уравнений классической молекулярной динамики на основе полноатомной модели (all atom model) с потенциалом Леннард-Джонса (LJ) для бомбардирующего иона и многочастичного оптимизированного по заряду потенциала (COMB) для совместно конденсированной системы TiN и HfN.

Первичная оценка воздействия низкоэнергетических ионов на поверхность показала уменьшение количества адсорбированных на поверхности покрытия капельных конденсатов и уменьшение размеров наночастиц, мигрировавших с поверхности покрытия, с 200 – 1500 до 8 – 10 нм, и зарегистрированных анализатором NanoBrook 90Plus ZetaParticleSizeAnalyzer.

Результаты позволяют выдвинуть гипотезу об определяющей роли воздействия наночастиц титано-гафниевого нитридного покрытия-конденсата на контактное угнетение жизнедеятельности болезнетворной микрофлоры по ионно-кластерному механизму.

Литература

- [1]. Гребенщикова М.М., Миронов М.М., Стародумова Е.В. Исследование миграции ионов металлов с защитных наноструктурированных покрытий для имплантатов // Вестник технологического университета. 2016. Т. 16, № 17. С. 49 – 50.
- [2]. Мамонова И.А. Влияние наночастиц переходной группы металлов на антибиотико-резистентные штаммы микроорганизмов: специальность 03.02.03 "Микробиология": автореф. дисс. канд. биол. наук / Мамонова Ирина Александровна. – Москва, 2013. – 24 с.
- [3]. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов. Теория и практические приложения. Казань: Изд-во Казан. ун-та. 2000.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОПОРИСТОСТИ

Змиевская Г.И.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия
e-mail: zmig@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.193

Успешной реализацией вычислительного эксперимента /ВЭ/ в плазме стало создание кинетических кодов для решения задач бесстолкновительной сильно неравновесной плазмы [1]. С этими кодами могут быть согласованы кинетические модели неравновесной стадии фазового перехода /ФП/ (нуклеации) формирования вакансионно-газовой пористости в тонких слоях поверхности «метал-диэлектрик» при имплантации ионов инертных газов, изменяющей механические, электрические, оптические и теплофизические свойства материалов при заполнении пористости различными веществами, в том числе имеющими большой коэффициент преломления, при этом возникает перспектива для изменений оптических свойств материала. Модели пористых сред могут использоваться для изменения коэффициента теплопроводности в задачах управляемого горения, также при блистеринге в диагностических зеркалах, при плазменной обработке поверхностей с пористо-капиллярной структурой и др. Под ВЭ понимают расчет на компьютере аналога изучаемого физического процесса, ВЭ позволяют изучать явления в тех условиях, где кончаются области применения теории, или может служить основой для новых теорий.

ВЭ нуклеации фазового перехода 1-го рода ФП, известной как задача Фольмера-Беккера-Деринга-Френкеля-Зельдовича [2] модифицирована на нестационарные случаи с решением квазилинейных уравнений типа Фоккера-Планка-Колмогорова (ФПК), учитывающих дальнедействующий осциллирующий потенциал взаимодействия кластеров зародышей ФП в твердом теле методом стохастической молекулярной динамики /СМД/, основанном на решении стохастических уравнений Ито-Стратоновича (СДУ) [3, 4] численным методом с среднеквадратичной сходимостью второго порядка и алгоритмами с бесконечной областью устойчивости для СДУ с аддитивным шумом, построенных для вероятностных мер, которые зависят от фазовых переменных размеров кластеров зародышей ФП, т.е. пор, и их центров масс в кристаллической решетке. В качестве примера ВЭ модели нуклеации ФП: в слоях образца Mo/Si под действием ионов Xe^{++} с энергией 5 кэВ за 10–4 с при нормальном падении потока ($10^{15} - 10^{17}$ ион/см²) могут формироваться цепочки пор длиной до 35 нм параллельно потоку в зависимости от его флюенса и температуры поверхности.

Исследовательские программы СМД решения квазилинейных уравнений ФПК [3, 4] могут быть частью «гибридных» кодов, в которых плазменные коды дополнены расчетами ФП.

Благодарность: соавтору и соисполнителю грантов РФФИ (2009-2019) А.Л. Бондаревой за большой вклад в разработку вычислительных средств исследований.

Литература

- [1]. Сигов Ю.С. «Вычислительный эксперимент: мост между прошлым и будущим физики плазмы. Избранные труды»//Сост. Змиевская Г.И., Левченко В.Д. М.: ФИЗМАТЛИТ, «НАУКА», 2001. 288 с.
- [2]. Зельдович Я.Б. К теории образования новой фазы. Кавитация // ЖЭТФ. 1942. Т. 12. № 11 – 12. С. 525.
- [3]. Змиевская Г.И. Неравновесная кинетика начальной стадии фазового перехода // ФТТ, 2020. Т. 62, № 1, С. 40 – 45.
- [4]. Бондарева А. Л., Змиевская Г.И., Левченко В.Д. Численные методы моделирования образования карбида кремния // XXXVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 14 – 18 февраля 2011.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЛЕНКЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА В ПЛАЗМЕ

Иванов В.А., Коныжев М.Е., Камолова Т.И., Дорофеюк А.А., Сатунин С.Н.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.194

При воздействии плазмы на металлы существенную роль могут играть диэлектрические пленки и микровключения на их поверхности. Наличие диэлектрических пленок становится важным в условиях, когда металл служит катодом при возбуждении различных типов разрядов. Цель работы состоит в расчете электрических полей как внутри диэлектрической пленки, расположенной на высокопотенциальном отрицательном металлическом электроде, так и в ее разрыве при взаимодействии с потоком внешней плазмы. Диэлектрическая пленка, плотно прилегающая к поверхности металла, рассматривается как электрический конденсатор с утечкой заряда, обусловленной электропроводностью диэлектрика, при этом потенциал поверхности пленки до начала воздействия плазмы равен отрицательному потенциалу электрода. Процесс зарядки пленки и напряжение внутри неё описывается как

$U(t) = j_0 \cdot R \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{CR}\right) \right]$, где $U(t)$ – изменение во времени t напряжения между внешней

поверхностью диэлектрической пленки и металлом, C – удельная электрическая емкость единицы поверхности диэлектрической пленки относительно поверхности металла, R – удельное омическое сопротивление единичной площади пленки, определяющее утечку электрического заряда, j_0 – ток ионов из плазмы на поверхность пленки в первые моменты времени после появления плазмы. По мере зарядки поверхности пленки потоком положительных ионов потенциал поверхности пленки будет возрастать от первоначального отрицательного значения $\Psi_0 \approx 300$ В к более положительному значению, и ток электронов из плазмы будет также увеличиваться. Когда суммарный ток ионов и электронов из плазмы на поверхность пленки будет равен нулю, тогда потенциал внешней поверхности плёнки будет равен плавающему потенциалу плазмы Ψ_f , т.е. $U(t \rightarrow \infty) = \Psi(t \rightarrow \infty) - \Psi_0 = j_0 R = \Psi_f - \Psi_0$.

В плазме с длительностью $\tau_{pl} \gg \tau_f = CR$ величина максимального электрического поля в диэлектрической пленке вычисляется по формуле $E_d = (\Psi_f - \Psi_0)/d$. В Таблице даны округленные значения параметров пленок и поля $E = U(\tau_f)/d$ внутри пленок на титане. Взаимодействие плазмы плотностью $10^{13} - 10^{12}$ см⁻³ с тонкими оксидными пленками на титане может приводить к возникновению в пленке сильных электрических полей 30–3МВ/см, достаточных для электрического пробоя как внутри пленки, так и в её разрывах.

| n_e , см ⁻³ | d , нм | R , Ом | C , мкФ | $\tau_f = CR$, мкс | j_0 , А/см ² | $U(\tau_f)$, В | E , МВ/см |
|--------------------------|----------|----------|-----------|---------------------|---------------------------|-----------------|-------------|
| 10^{13} | 10 | 1 | 20 | 20 | 30 | 30 | 30 |
| 10^{13} | 100 | 10 | 2 | 20 | 30 | 300 | 30 |
| 10^{12} | 10 | 1 | 20 | 20 | 3 | 3 | 3 |
| 10^{12} | 100 | 10 | 2 | 20 | 3 | 30 | 3 |

Литература

- [1] В.А. Иванов Электрическое поле на поверхности погруженного в плазму металлического электрода при большом отрицательном потенциале // Успехи прикладной физики, 2022. Том 10, № 4. С.343 – 350. DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-343-350.

ГЕНЕРАЦИЯ АКТИВНЫХ СОЕДИНЕНИЙ КИСЛОРОДА И АЗОТА В ЖИДКОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МИКРОВОЛНОВЫМ ИМПУЛЬСНЫМ КАПИЛЛЯРНЫМ РАЗРЯДОМ

¹Артемьев К.В., ^{1,2}Гудкова В.В., ¹Давыдов А.М.

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

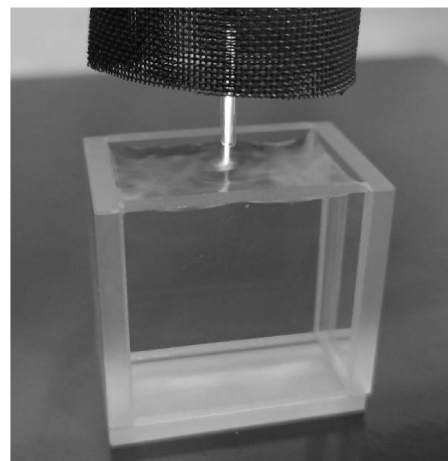
²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.195

Воздействие газового разряда атмосферного давления на воду — многофакторный процесс, приводящий к образованию в жидкости соединений азота и кислорода. Данные соединения обладают высокой биологической и химической активностью, что вызывает повышенный интерес к их прикладным исследованиям.

В работе представлены результаты по обработке воды с помощью импульсного микроволнового капиллярного разряда. Исследовалось образование в жидкой фазе долгоживущих соединений (H_2O_2 , NO_2^- , NO_3^-) и изменение pH в процессе воздействия для различных плазмообразующих газов (аргон, воздух, кислород, азот).

Концентрации пероксида водорода и нитрит-ионов определялись спектрофотометрическим методом. Для определения концентрации H_2O_2 использовался реактив FOX и длина волны излучения $\lambda = 560$ нм. Для определения NO_2^- использовался реактив Грисса и длина волны излучения $\lambda = 525$ нм.



МОДУЛЬНЫЙ МАСШТАБИРУЕМЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ ДЕКОНТАМИНАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

^{1,2}Гудкова В.В., ¹Бурмистров Д.Е., ¹Конькова А.С., ¹Полякова В.А., ^{1,2}Хатуева М.Д.,
^{1,2}Зимица М.А., ¹Колик Л.В., ¹Гусейн-заде Н.Г., ¹Кончечков Е.М.

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: gudkova-vi@fpl.gpi.ru

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.196

Эффективное применение низкотемпературной плазмы для бактериальной деконтаминации возможно реализовать при плазменной обработке жидкости благодаря образованию в ней активных форм кислорода и азота (например, долгоживущих – H_2O_2 , NO_2^- , NO_3^-). Для этого мы спроектировали модульный источник плазмы. Исследована эффективность воздействия на бактерии *E. coli* BL21 (DE3) модуля с прямым пьезоразрядом в воздухе и модуля с плазменной струей в потоке аргона. [1] Определены концентрации образующихся в фосфатно-солевом буфере (PBS) активных форм кислорода и азота (рис. 1а, б).

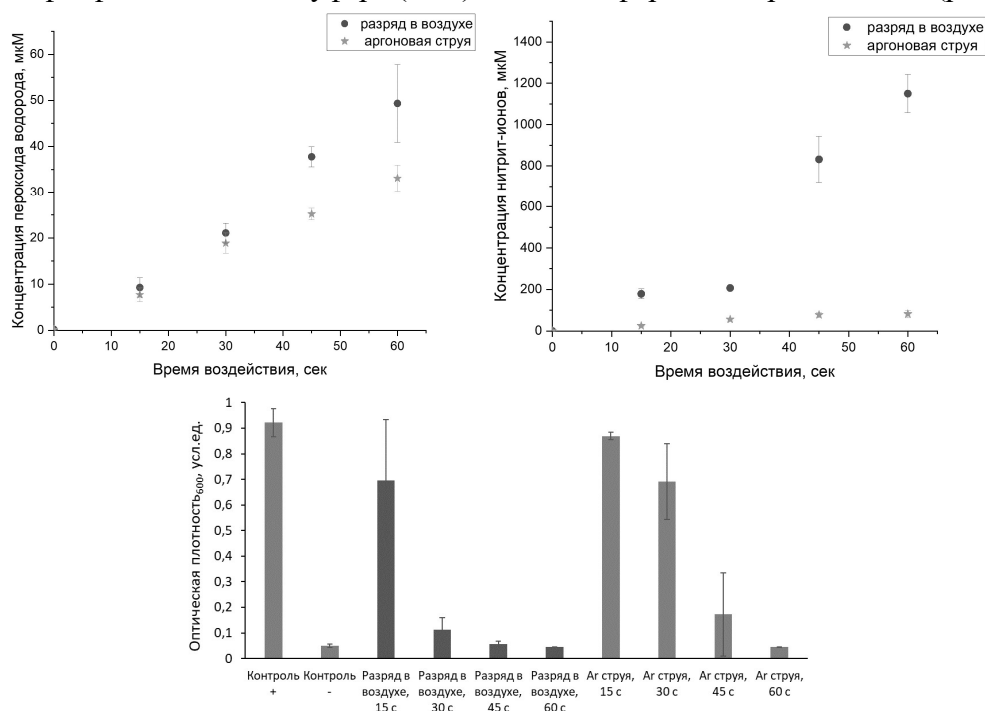


Рис. 1. Зависимость концентрации H_2O_2 (а), концентрации NO_2^- (б) и эффективности деконтаминации (в) от времени воздействия источника плазмы.

Эффективность деконтаминации соответствует уменьшению оптической плотности бактериальных клеточных суспензионных культур (рис. 1в). Наилучший результат был достигнут при временном воздействии в 60 секунд, что коррелирует с наибольшими величинами концентраций пероксида водорода при данном времени воздействия.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-29-00856.

Литература

- [1]. L.V. Kolik et al. Study of characteristics of the cold atmospheric plasma source based on a piezo transformer // Russian Physics Journal, V. 62, No. 11, March, 2020.

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ В МНОГОИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ С ИНЖЕКЦИЕЙ ГАЗА В МЕЖЭЛЕКТРОДНОЕ ПРОСТРАНСТВО

¹Моряков И.В., ^{1,2}Гудкова В.В., ^{1,2}Резаева А.Д., ¹Анпилов А.М., ¹Давыдов А.М.,
¹Заклецкий З.А., ¹Тактакишвили И.М., ^{1,2}Борзосеков В.Д., ¹Кончевков Е.М.,
¹Гусейн-заде Н.Г.

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.197

В последнее время все активнее ведутся исследования по использованию низкотемпературной плазмы для получения различного типа наночастиц оксидов металлов. Это связано с тем, что традиционно применяемые в промышленности при производстве наночастиц химические технологические решения зачастую являются очень дорогостоящими, опасными для здоровья человека и экологически грязными. Одна из возможных альтернатив состоит в том, чтобы использовать для синтеза наночастиц металлов искровой разряд в жидкости с инъекцией газа в межэлектродное пространство [1]. Преимущество данного метода состоит в том, что он не требует использования дорогостоящих прекурсоров, для него требуются только газ, вода, электроды и электроэнергия.

В работе представлены результаты исследований, демонстрирующие возможность

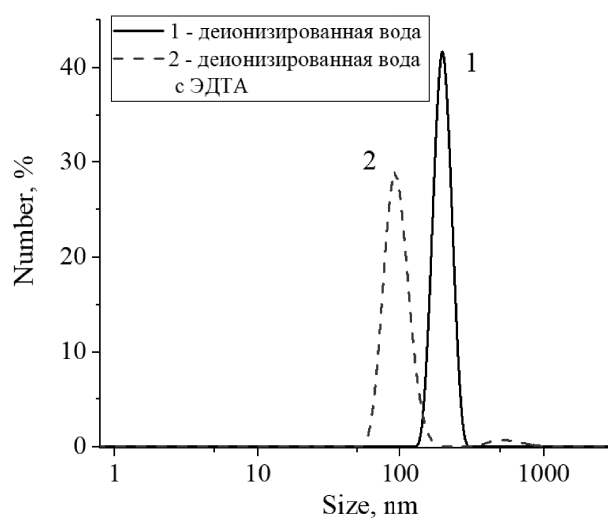


Рис. 1. Гидродинамический радиус частиц, образовавшихся в деионизованной воде (1) и воде с ЭДТА после 10 минутной обработки разрядом, измеренный с помощью Zetasizer ULTRA. Инжектируемый газ – аргон, электроды и нержавеющей стали.

использования предлагаемой разрядной системы для получения в жидкости наночастиц оксидов металлов различных типов и размеров (рис. 1) в зависимости от инжектируемого газа (аргон, воздух), исходной обрабатываемой жидкости (деионизованная вода Milli-q и вода с добавлением ЭДТА - этилендиаминтетрауксусной кислоты) и времени обработки растворов. В экспериментах использовались электроды, выполненные из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и сплава дюралюминия Д16. Параметры источника питания: подаваемое напряжение $U = 20$ кВ, частота следования высоковольтных импульсов $f = 50$ Гц, энергия накопительного конденсатора $W = 1,6$ Дж. Нарботка наночастиц происходила преимущественно за счет распыления материала электродов.

Полученные экспериментальные результаты будут востребованы в

дальнейших исследованиях при получении наночастиц и их агломератов с контролируемыми параметрами.

Литература

- [1]. А.М. Анпилов, Э.М. Бархударов, Ю.Н. Козлов, И.А. Косый, М.А. Мисакян, И.В. Моряков, М.И. Тактакишвили, Н.М. Тарасова, С.М. Темчин, Физика плазмы, 45 (3), 268 (2019). DOI: 10.1134/S0367292119020016.

ВЛИЯНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОДНОРОДНОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО МАЗЕРА

Рогожин В.И., Донец А.Е., Бахтин В.П., Булейко А.Б.,
Быков А.Г., Лоза О.Т., Раваев А.А.

Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, округ
Троицк, Россия, rogozhin@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.198

Плазменные мазеры – это источники импульсов СВЧ-излучения с мощностью $10^8 - 10^9$ Вт с управляемыми в широких пределах центральной частотой излучения и шириной спектра [1]. Представленные результаты получены в ходе экспериментального исследования аксиально-симметричного плазменного мазера, работающего в режиме усилителя шумов в полосе частот 3 – 16 ГГц при мощности от 10 до 100 МВт. Плазма создавалась плазменным источником на основе кольцевого термокатода; ее концентрация, определяющая частоту излучения, измерялась зондом Ленгмюра [2].

Показано, что ширина спектра излучения в значительной степени зависит от азимутальной однородности концентрации плазмы. При однородной по азимуту плазме изменение ее концентрации позволяло изменять центральную частоту излучения в диапазоне от 4 до 13 ГГц при сохранении ширины спектра 3 – 4 ГГц, см. рис 1.

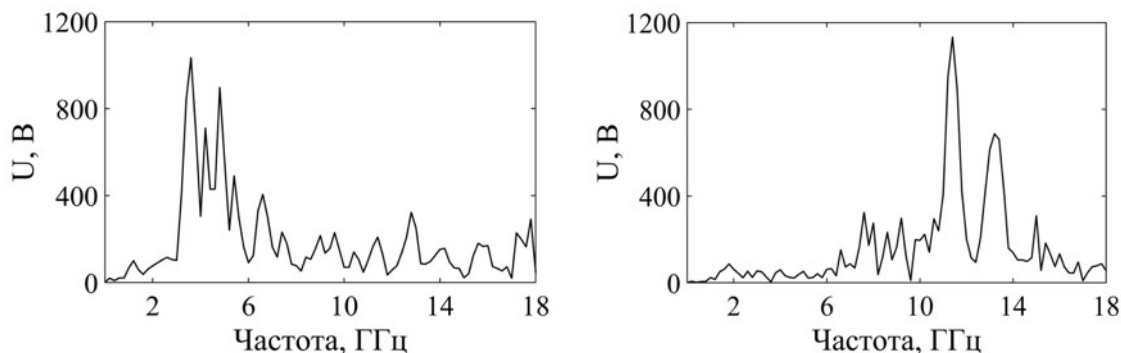


Рис. 2 Спектры излучения плазменного мазера для различных концентраций плазмы: слева – $n_e = 1 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$; справа – $n_e = 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ (концентрация плазмы однородна по азимуту).

Нарушение азимутальной однородности концентрации плазмы до фактора ~ 2 приводило к уширению спектра излучаемых частот до 100% от центральной частоты, рис. 2.

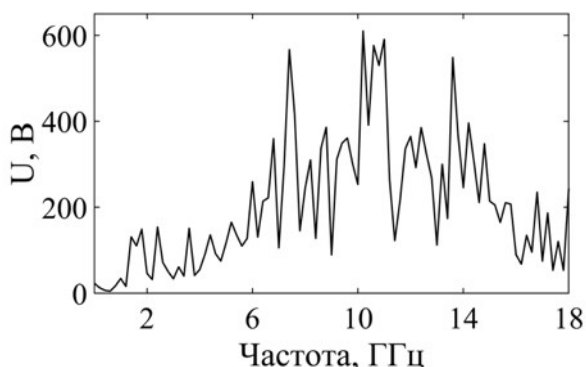


Рис. 3 Спектр излучения плазменного мазера (концентрация плазмы неоднородна по азимуту)

Продемонстрировано электронное управление шириной спектра излучения, основанное на применении секционированного термокатода прямого накала. В зависимости от степени шунтирования накала одной из секций меняется азимутальное распределение концентрации плазмы и ширина спектра излучения мазера. Настоящая работа выполнена по договору № Н.4к.241.09.23.1050 от 10.04.2023г.

Литература

- [1]. Кузелев М.В., Лоза О.Т., Рухадзе А.А. и др. Физика плазмы, 2001, т.27, №8, сс.710-733.
- [2]. Пономарев А.В., Ульянов Д.К. Физика плазмы, 2023, т.49, №6, сс. 576-581

ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ПЛАЗМЕННЫЙ МАЗЕР С ДВОЙНЫМ КОАКСИАЛЬНЫМ ПЛАЗМЕННО-МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ВОЛНОВОДОМ

Донец А.Е., Рогожин В.И., Бахтин В.П., Булейко А.Б., Быков А.Г.,
Лоза О.Т., Раваев А.А.

Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва,
округ Троицк, Россия, donets@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.199

Исследована работа плазменного мазера, показанного на рисунке, в котором в качестве генераторной секции используется двойной коаксиальный волновод, внешний (1) и внутренний (2) электроды которого металлические, а роль среднего электрода играет трубчатая плазма (3).

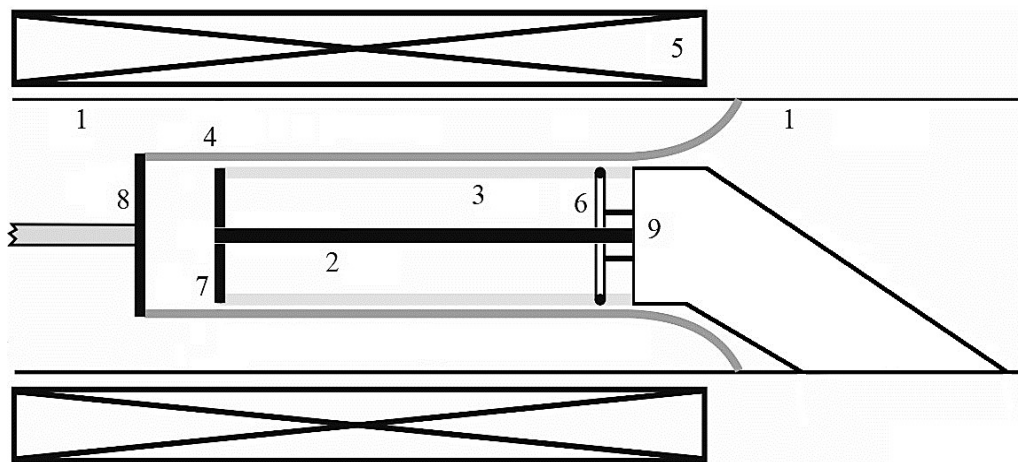


Рис. 1 Плазменный мазер. 1 – внешний электрод коаксиального волновода; 2 – внутренний электрод коаксиального волновода; 3 – трубчатая плазма; 4 – релятивистский электронный поток; 5 – соленоид; 6 – источник плазмы; 7 – ограничитель плазмы; 8 – взрывоэмиссионный катод; 9 – держатель источника плазмы.

Трубчатый релятивистский электронный поток (РЭП) (4) распространяется в сильном магнитном поле соленоида (5) снаружи плазмы (3), создаваемой источником (6), и осаждается на стенки вакуумной камеры (1). Ограничитель плазмы (7) предотвращает короткое замыкание катода (8) через плазму (3), внутренний электрод коаксиального волновода (2) и держатель источника плазмы (9) на корпус. Созданный плазменный мазер предназначен для работы в импульсно-периодическом режиме, поскольку крепление (2) ограничителя не препятствует распространению РЭП.

Как было показано в работе [1], использование подобной конструкции плазменного мазера «позволяет повысить значение тока электронного пучка, транспортируемого через систему, при этом инкремент неустойчивости и эффективность преобразования энергии направленного движения электронов также возрастают».

Плазменный мазер работал в режиме усиления шума. Поток электронов с энергией 250 кэВ, током до 1,5 кА и длительностью 2,5 нс взаимодействовал с плазмой с измеренной концентрацией до $3 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Зарегистрировано излучение, спектр которого перестраивался в диапазоне 3 – 16 ГГц при мощности от 10 до 100 МВт. Настоящая работа выполнена по договору № Н.4к.241.09.23.1050 от 10.04.2023г.

Литература

[1]. Карташов И.Н., Кузелев М.В. // Физика плазмы, 2021, т. 47, № 6, с. 531 – 540.

ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И АЗОТА В ЖИДКОСТИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МНОГОИСКРОВЫМ РАЗРЯДОМ С ИНЖЕКЦИЕЙ ГАЗА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАТЕРИАЛА ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЫ

^{1,2}Зими́на М.А., ^{1,2}Гудкова В.В., ¹Артемьев К.В., ¹Давыдов А.М., ¹Полякова В.А.,
¹Моряков И.В., ^{1,2}Борзосекон В.Д., ¹Анпилов А.М., ¹Кончекон Е.М.

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: masha.zimina1014@gmail.com

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.200

Воздействие на жидкость низкотемпературной плазмой газового разряда приводит к образованию активных форм азота и кислорода. В работе использовалась установка с реализацией высоковольтного импульсно-периодического многоэлектродного кольцевого разряда в жидкости с инжекцией газа в межэлектродных промежутках (воздух, расход 2,5 литра в минуту) [1]. Рассматривались электродные системы, выполненные из нержавеющей стали 12X18H10T и сплава дюралюминия Д16. Время воздействия 2 – 10 минут, с промежутком варьирования 2 минуты, объем жидкости — 120 мл (деионизированная вода, проводимость 0,1 мкСм/см).

Концентрация пероксида водорода измерялась с помощью реактива FOX по спектру поглощения на длине волны 560 нм, концентрация нитрит-ионов с помощью реактива Грисса по спектру поглощения на длине волны 525 нм с помощью спектрофотометра HACH LANGE DR-5000 (HACH LANGE GmbH, Германия). Наилучший результат по концентрациям пероксида водорода и нитрит-ионов был достигнут при временном воздействии в 10 минут с использованием электродов из сплава дюрала. Также было установлено увеличение концентрации нитрат-ионов с возрастанием длительности обработки жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24-29-00736.

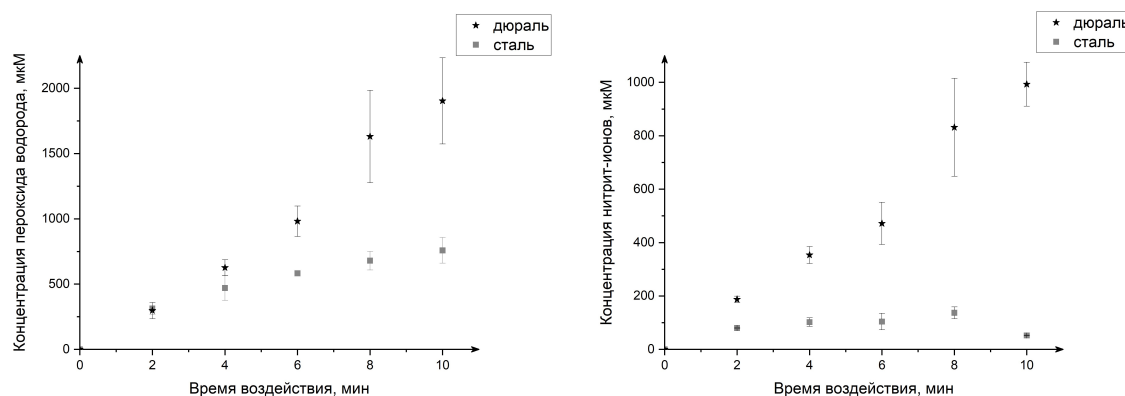


Рис. 1. Зависимость концентрации H_2O_2 (а), концентрации NO_2^- (б) от времени воздействия источника плазмы.

Литература

- [1]. А.М. Анпилов, Э.М. Бархударов, Ю.Н. Козлов, И.А. Косый, М.А. Мисакян, И.В. Моряков, М.И. Тактакишвили, Н.М. Тарасова, С.М. Темчин, Физика плазмы, 45 (3), 268 (2019). DOI: 10.1134/S0367292119020016.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЗДАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ГЕЛИКОНЫМ ИСТОЧНИКОМ БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Брагин Е.Ю., Бобырь Н.П., Гусев С.С., Егорова Е.Н., Жильцов В.А., Камин Д.В.,
Леженникова Д.А., Коробцев С.В., Костриченко И.А., Спицын А.В.

*Национальный исследовательский центр «Курчатовских институт», г. Москва,
Россия, e-mail: bragin_ey@nrcki.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.201

В НИЦ «Курчатовский институт» проводятся исследования в поддержку создания отечественного безэлектродного плазменного ракетного двигателя (БПРД). Одна из решаемых задач заключается в оптимизации конфигурации геликонного источника плазмы с целью повышения его эффективности. В данной работе приведены результаты исследований, направленных на изучение факторов, влияющих на эффективность создания плазмы при геликонном разряде, проведенной в рамках федерального проекта «Термоядерные и плазменные технологии».

Геликонный источник плазмы является одной из разновидностью ВЧ источников плазмы, в котором энергия вкладывается в электроны при их взаимодействии с вводимой геликонной ВЧ волной. Для БПРД оптимальным является плотный ($\sim 10^{19} \text{ м}^{-3}$) низкоэнергетический истекающий из источника плазменный поток с узким радиальным профилем.

В качестве критериев эффективности разряда выбраны следующие параметры: полный ионный ток – ток, создаваемый всеми ионами, истекающего плазменного потока; коэффициент использования рабочего тела – отношение количества ионов истекающего плазменного потока к количеству атомов рабочего тела, поступающих в систему; мощность, переносимая плазменным потоком, доля вводимой мощности, пошедшая на ускорение плазменного потока; цена ионизации – энергия, затрачиваемая за создание одного иона истекающего плазменного потока.

Исследования проводились на стенде ПН-3, являющимся макетом безэлектродного плазменного ракетного двигателя. Использовались такие плазменные диагностики, как подвижный двойной зонд Ленгмюра, СВЧ интерферометр, сеточный анализатор. Получены зависимости указанных выше параметров от таких факторов, как расход рабочего газа, величина индукции и профиль магнитного поля для различных газов при постоянной вводимой ВЧ мощности.

Показано, что с ростом расхода рабочего газа полный ионный ток растет, пока не достигнет максимума, соответствующий максимальному потоку рабочего тела, который способно ионизировать такое количество вводимой ВЧ мощности. Коэффициент использования рабочего тела имеет максимальные значения при низких расходах и незначительно спадает с ростом расхода, пока не будет достигнут максимум полного тока. При дальнейшем росте расхода рабочего тела спад будет более значительный. Так как электронная температура, а вместе с ней и энергия ионов, спадают с ростом расхода рабочего тела, то переносимая потоком мощность, являющаяся произведением средней энергии ионов и полного ионного тока, имеет максимум. Этот максимум находится при низких расходах рабочего газа. При росте расхода рабочего газа, мощность, переносимая потоком, уменьшается. Цена ионизации высока при малых расходах рабочего газа. При увеличении расхода она уменьшается пока не выходит на постоянное значение.

С ростом величины индукции магнитного поля (в рассматриваемых нами пределах), монотонно растут полный ионный ток, коэффициент использования рабочего тела и переносимая плазменным потоком мощность, а цена ионизации, наоборот, падает.

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ПРОЕКТ ИТЭР: ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО»**

**SECTION
«ITER PROJECT:
A STEP TO THE FUTURE OF POWER ENGINEERING»**

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ, РАЗРАБОТАННЫХ В РАМКАХ ПРОЕКТА ИТЭР, ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСТАНОВКИ ТРТ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЭМС

¹Алексеев Д.И., ¹Манзук М.В., ¹Латманизова Ю.Н., ²Микляев С.М., ¹Семенов А.И.,
¹Соленый А.А., ¹Рошаль А.Г.

¹Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия

²Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: dmitry.alekseev@sintez.niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.202

Разработкой коммутирующей аппаратуры для проекта ИТЭР АО «НИИЭФА» занимается с 2011 года. За это время специалисты предприятия проделали огромный путь от предварительных расчётов до изготовления прототипов и проведения квалификационных испытаний как отдельных компонентов, так и всей коммутационной системы в целом.

Спроектированное оборудование обеспечивает функционирование термоядерного реактора на стадии инициирования плазменного разряда и при поддержании горения плазменного шнура, а также выполняет функцию защиты сверхпроводниковых обмоток за счет быстрого вывода энергии, запасенной в магнитном поле, для предотвращения перегрева участка обмотки, потерявшего сверхпроводящие свойства. Сбой в процессе вывода энергии может вызвать необратимые повреждения установки стоимостью в миллиарды долларов, поэтому к надежности коммутационных аппаратов предъявляются исключительно высокие требования.

Технологии и компетенции, полученные при работах по разработке и испытаниям уникального сильноточного коммутационного оборудования, являющегося основной частью системы электропитания сверхпроводниковых обмоток, выполняемых в АО «НИИЭФА» в рамках международного проекта ИТЭР, могут быть легко адаптированы для использования в рамках отечественной программы управляемого термоядерного синтеза.

Таким образом в рамках проекта ТРТ может быть реализован опыт создания следующих компонентов системы электропитания электромагнитной системы (ЭМС): аппараты систем оперативной коммутации тока и быстрого вывода энергии, систем контроля и измерения токов и напряжений, комплекс токоведущих шинопроводов, система заземления, система управления.

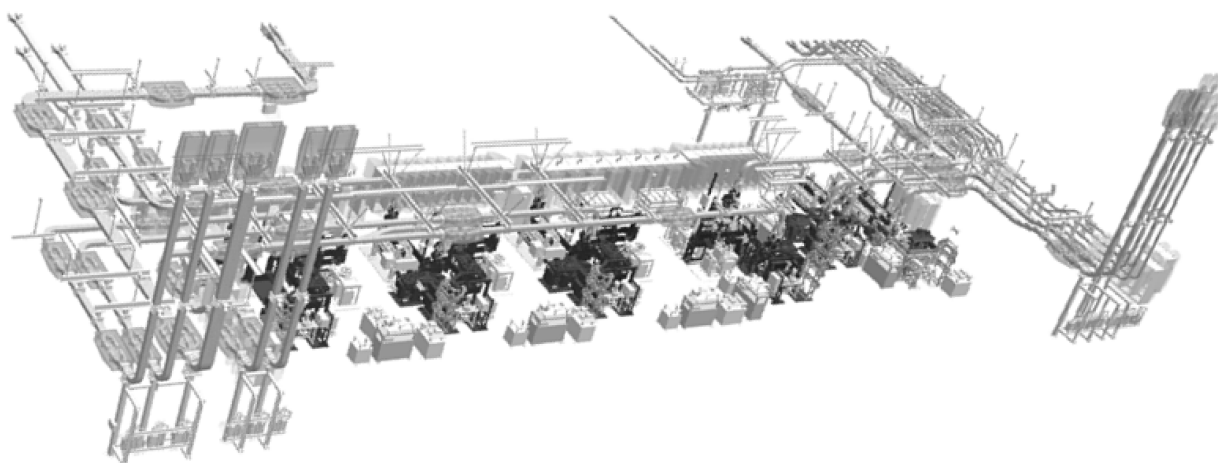


Рисунок 1.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ПРИМЕСНЫХ ЧАСТИЦ БЕРИЛЛИЯ И БОРА В ДИАГНОСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ДТР

Бочарников В.А., Варшавчик Л.А., Старовойтов Е.А., Галицын Д.Д., Никитенко С.А., Мухин Е.Е.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: vladislav.bocharnikov@mail.ioffe.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.203

Выбор материала первой стенки токамаков следующего поколения и, в частности, международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР влияет на работоспособность оптических диагностик. Недавно было предложено заменить бериллий на вольфрам с бор-содержащим пленочным покрытием. Предполагается, что плазма реактора будет иметь высокое содержание примесных частиц, выбитых с поверхностей первой стенки. Тяжелые, по сравнению с плазмообразующим газом, частицы дрейфуют из основного объема реактора в диагностические каналы и осаждаются на оптических поверхностях, что значительно снижает эффективность работы оптических диагностик плазмы. Ввиду этого необходимо проведение работ по предупреждению возможных неисправностей систем диагностик, одной из которых является моделирование транспорта примеси и расчет скорости ее осаждения в диагностических каналах.

В данной работе рассматривается напыление на поверхность первого оптического элемента системы сбора рассеянного излучения диагностики диверторного томсоновского рассеяния (ДТР) 55.C4. Дивертор является областью, где распыление первой стенки будет самым интенсивным и концентрация примесных частиц будет самой высокой. В докладе представлены результаты моделирования транспорта примесных частиц бериллия и бора в диагностическом канале ДТР для оценки степени загрязнения первого зеркала. Для решения этой задачи создан программный Монте-Карло код KITE [1], позволяющий моделировать процессы транспорта, распыления и осаждения материалов первой стенки и других конструктивных элементов. В качестве входных данных при расчете используются данные о потоках ионов и атомов бериллия и бора из основного объема на первую стенку реактора, рассчитанные кодом SOLPS-ITER.

В ходе работы получены профили распределения падающих и распыленных потоков частиц бериллия и бора, а также проведено исследование скорости загрязнения первого оптического элемента диагностики ДТР. Проведен сравнительный анализ полученных результатов для обоих материалов и сделаны выводы об ожидаемой степени загрязнения поверхности первого зеркала.

Литература

- [1]. Varshavchik L.A. et al. Three-dimensional simulation of neutral transport in gases and weakly ionized plasmas // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020. Т. 63. №. 2. С. 025005.

ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КЕРАМИК ИМПУЛЬСНОЙ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКОЙ, ВОЗМОЖНОЙ В ДИВЕРТОРНОЙ ЗОНЕ ТОКАМАКА ИТЭР

^{1,2,3}Черепанов Д.Е., ^{1,4}Бурдаков А.В., ¹Вячеславов Л.Н., ¹Кандауров И.В.,
^{1,2}Касатов А.А., ^{1,2}Попов В.А., ¹Рыжков Г.А. ^{1,2,4}Шошин А.А.

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

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия

⁴Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.204

Термоядерные установки нуждаются в исследовании новых материалов для изготовления обращенных к плазме компонентов (ОПК). Утвержденный сейчас материальный состав, например, токамака ИТЭР имеет ряд недостатков, среди которых высокое среднее зарядовое число, а также недостаточная устойчивость ОПК импульсному нагреву. Перспективной, но плохо исследованной идеей, является предложение о применении высокотемпературных керамик для изготовления защиты ОПК. Среди основных преимуществ такого подхода можно отметить низкое среднее зарядовое число и достаточно высокую рабочую температуру. Главные недостатки этого подхода – повышенная хрупкость и возможное высокое удержание трития, особенно, в случае углеродсодержащих керамик.

При выборе материала необходимо понимать детали деструктивных процессов, происходящих с ним, в частности, во время термических ударов, во время удержания плазмы. Для изучения эрозии высокотемпературных керамик при импульсном нагреве на базе установки БЕТА [1] был создан стенд с *in situ* диагностическими системами [2]. Термические удары моделировались с использованием импульсного ИК лазера, позволяющего добиваться ожидаемой во время переходных процессов в ходе удержания плазмы плотности мощности на поверхность образцов. Стенд был снабжен диагностическими системами для отслеживания динамики эрозии облучаемой поверхности образцов, ее температуры, а также поглощенной плотности мощности.

В ходе экспериментальной работы было проведено испытание керамик, считающихся перспективными с целью применения в качестве материала для изготовления защиты ОПК термоядерных установок: W_4C в виде монолитного образца и покрытий, нанесенных на вольфрам, SiC, ZrB_2 , а также ZrB_2-SiC в пропорциях 70:30 и 80:20. Экспериментальные результаты позволили охарактеризовать поведение керамик во время термических ударов, определить допустимые параметры нагрева, при которых не происходит эрозии поверхности с потерей вещества, а также получить информацию о перспективности их использования в термоядерных установках с точки зрения устойчивости в случае возникновения переходных процессов во время удержания плазмы.

Работа по разработке системы лазерного нагрева керамик была частично поддержана грантом РФФ № 23-19-00212.

Литература

- [1]. L.N. Vyacheslavov et al. // Phys. Scripta 93 (2018) 035602.
- [2]. D.E. Cherepanov et al. // Nucl. Matter. 36 (2023) 101495.

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА D-D ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ *in-situ* КАЛИБРОВКИ НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ИТЭР

Фридрихсен Д.С., Кормилицын Т.М., Панкратенко А.В., Обудовский С.Ю.,
Кащук Ю.А.

Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: D.Fridrikhsen@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.205

Одной из нейтронных диагностик токамака-реактора ИТЭР является Диверторный Монитор Нейтронного Потoka (ДМНП). Диагностика ДМНП служит для измерения локального потока быстрых нейтронов, определения полного нейтронного выхода плазмы и выделяемой термоядерной мощности. ДМНП будет располагаться под дивертором и в непосредственной близости к плазме. Проведение калибровки планируется методом *in situ*, путем размещения в вакуумной камере токамака компактных источников нейтронного излучения: DD- и DT-нейтронных генераторов производства ВНИИА им. Н.Л. Духова. Для контроля полного нейтронного выхода генераторы будут оснащены мониторами нейтронного потока. Большой вклад в точность калибровки детекторных узлов ИТЭР внесет правильный подбор и предварительная калибровка мониторов, которыми будут оснащены генераторы.

В качестве монитора-спектрометра, в дополнение к борному счётчику, для DD-генератора нейтронов рассматривается детектор на основе сцинтилляционного кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. Предыдущие исследования [1] показали перспективность использования такого кристалла для регистрации DD-нейтронов (~2.5 МэВ). К достоинствам этого сцинтиллятора можно отнести высокий световыход и классическую форму функции отклика при регистрации нейтронов. Более низкая, в сравнении с органическими сцинтилляторами, чувствительность к быстрым DD-нейтронам позволяет разместить монитор в непосредственной близости к мишени, закрепив детекторный узел на корпусе нейтронного генератора.

В данной работе представлена методика абсолютной калибровки нейтронного спектрометра на основе кристалла LaCl_3 . Калибровка энергетической шкалы и определение абсолютной эффективности сцинтилляционного детектора $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ проводилась на эталонном источнике DD-нейтронов (~2.5 МэВ) в ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. На стенде нейтронной диагностики АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» отработывалась методика калибровки с использованием нейтронных генераторов с запаянной трубкой и «толстой» мишенью. По результатам измерений была проведена независимая оценка сечения реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}_{g.s.}$, используемой для регистрации DD-нейтронов. Проведен анализ полученных результатов и выполнено сравнение данных из базы ENDF [2] и опубликованных в работах [3, 4].

Коллектив авторов выражает благодарность Моисееву Н.Н. за организацию и помощь в работе с эталонным источником DD-нейтронов в ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

Работа выполнена в рамках реализации Рабочего соглашения №1 (ITER ref. IO/21/СТ/4300002685) между МО ИТЭР, Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и ФГУП «ВНИИА» «Исследование и разработка технического проекта компонентов нейтронных генераторов пригодных для *in-situ* калибровки нейтронных диагностик ИТЭР».

Литература

- [1]. Kormilitsyn, T.M. et al., Novel $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ -based spectrometer for deuterium plasma neutron diagnostics // Review of Scientific Instruments, 92 (4), 2021, <https://doi.org/10.1063/5.0042394>.
- [2]. Batchelder, J.C. et al., Possible evidence of nonstatistical properties in the $\text{Cl}^{35}(n,p)\text{S}^{35}$ cross section // Physical Review C, 99 (4), 2019. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.99.044612>.
- [3]. Kuvín, S.A. et al. // Nonstatistical fluctuations in the $\text{Cl}^{35}(n,p)\text{S}^{35}$ reaction cross section Physical Review C, 102 (2), 2020 <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.102.024623>.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДРАЙВЕРА ДЛЯ НАГРЕВНЫХ АТОМАРНЫХ ИНЖЕКТОРОВ С МНОГОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ РАБОТЫ

Гаврисенко Д.Ю., Шиховцев И.В., Бельченко Ю.И., Горбовский А.И., Кондаков А.А., Сотников О.З., Воинцев В.А., Финашин Р.А., Санин А.Л.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия
e-mail: D.Yu.Gavrisenko@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.206

Атомарная инжекция является одним из основных способов нагрева плазмы в термоядерных установках с магнитным удержанием. Пучок атомов создается путем ускорения ионов и их последующей нейтрализации. В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН разработана серия нагревных инжекторов [1]. В качестве генератора плазмы в ионном источнике перспективно использовать высокочастотный плазменный драйвер [2]. Ионные источники на основе ВЧ драйверов не имеют накаливаемых частей и поэтому обладают стабильными эмиссионными параметрами в многосекундных импульсах. Драйвер имеет керамический вакуумный объём, внутри которого поддерживается индукционный разряд. Плазма, генерируемая в ВЧ драйвере, влияет на основные параметры пучка: ток, состав, однородность. Для предотвращения перегрева и эрозии керамической стенки драйвера внутрь вставлен защитный цилиндрический экран с продольными щелями. Такой экран уменьшает эффективность передачи мощности в разряд. В работе сравниваются характеристики ВЧ драйвера, разработанного для нагревного инжектора высокоэнергетичных нейтралов [3] с характеристиками ВЧ драйвера, разработанного для диагностического инжектора. На основании сравнения созданы рекомендации для создания более оптимальной конструкции плазменного ВЧ драйвера.

Получена зависимость плотности ионного тока на выходе драйверов от ВЧ мощности. Измерены мощности, отводимые водяным охлаждением от защитных экранов и элементов ВЧ драйверов, в импульсах длительностью 30 секунд. Измерены температуры экранов и элементов драйверов. Определены основные требования к конструкции ВЧ драйвера с многосекундной длительностью работы.

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Литература

- [1]. Belchenko Y.I. et al, Studies of ion and neutral beam physics and technology at the Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS // *Physics-Uspekhi*, 2018, 61, (6), p. 531 – 581.
- [2]. Гаврисенко Д.Ю., Шиховцев И.В., Бельченко Ю.И., Горбовский А.И., Кондаков А.А., Сотников О.З., Санин А.Л., Воинцев В.А., Финашин Р.А., Сравнительный анализ высокочастотных плазменных драйверов с различными защитными экранами для атомарных инжекторов с многосекундной длительностью импульса // *Физика плазмы*, 2023, 49, 964 – 974.
- [3]. Ivanov A.A., Abdrashitov G., Anashin V., Belchenko Yu., Burdakov A., Davydenko V., Deichuli P., Dimov G., Dranichnikov A., Kapitonov V., Kolmogorov V., Kondakov A., Sanin A., Shikhovtsev I., Stupishin N., Sorokin A., Popov S., Tiunov M., Belov V., Gorbovsky A., Kobets V., Binderbaue M., Putvinski S., Smirnov A., Sevier L., Development of a negative ion-based neutral beam injector in Novosibirsk // *Rev. Sci. Instrum.*, 2014, 85, 02B102.

ПОДГОТОВКА К ПРОИЗВОДСТВУ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УСТАНОВКИ ИТЭР В ИЯФ СО РАН

¹Иванцовский М.В., ^{1,3}Бурдаков А.В., ¹Гавриленко Д.Е., ^{1,3}Грищенко А.М.,
¹Константинов В.М., ²Кравцов Д.Э., ⁵Лобачев А.М., ⁵Логинов И.Н., ⁵Модестов В.С.,
¹Рыжанков И.С., ¹Селезнев П.А., ¹Серемин В.В., ^{1,4}Соломатин Б.Н., ²Сорокина Н.В.,
^{1,4}Суляев Ю.С., ¹Таскаев А.С., ¹Шабунин Е.В., ¹Шарафеева С.Р., ¹Шиянков С.В.,
^{1,3,4}Шошин А.А.

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: m.v.ivantsivsky@inp.nsk.su

²Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: d.kravtsov@iterrf.ru

³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: a.v.burdakov@inp.nsk.su

⁴Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: a.a.shoshin@inp.nsk.su

⁵Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vmodestov@spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.207

Институт ядерной физики СО РАН с 2013 года ведет проектные работы по диагностическому оборудованию для установки ИТЭР. В перечень разрабатываемого оборудования входят: проектирование и интеграция верхних диагностических портов №№ 02, 07, 08, экваториального диагностического порта № 11 в качестве основного поставщика, а также в виде изготовителя и разработчика части системы в диагностиках: вертикальная нейтронная камера (верхняя и нижняя), диверторный монитор нейтронного потока, анализатор атомов перезарядки (внутревакуумная часть).

В 2023 году большая часть работ, проводимых в ИЯФ СО РАН по проекту ИТЭР, вышла на этап производства или подготовки производства. В частности, идет производство и сборка диагностических защитных модулей экваториального порта № 11, подготовка к производству диагностического защитного модуля верхнего порта № 07. Финальные проекты опорных рам около портового пространства и порт камеры верхних портов № 02 и № 08 подготовлены и будут проходить защиту проекта уже в 2024 г., после чего перейдут на стадию подготовки производства.

Производство элементов верхней вертикальной нейтронной камеры запланировано на 2024 г., что требует тщательной подготовки документации и самого производства, закупки требуемого материала.

Компоненты диверторного монитора нейтронного потока для первой плазмы так же вышли на стадию производства.

В докладе будут представлены прогресс и степень готовности к производству диагностического оборудования для установки ИТЭР.

ВЕРИФИКАЦИЯ КОДА ВTR ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

Кичик М.Г., Длугач Е.Д.

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: kichik.mg@phystech.edu

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.208

Код ВTR (Beam Transmission with Re-ionization) [1 – 2] много лет активно используется для проектирования и инженерно-физического анализа систем нейтральной инжекции, в том числе, для проекта ITER [3]. В 2008 по заказу ITER была проведена верификация первой версии ВTR [4], которая показала высокое качество кода и согласованность результатов его работы с расчётами кода ION для системы инжекции токамака JET. За прошедшие годы ВTR код активно развивался с учетом пожеланий пользователей, появлялись новые версии, включая ВTR-5 (в 2020). В каждой новой версии расширялась функциональность ВTR, причем значительно менялся исходный код всего проекта. С учетом обновлений и потребностей дальнейшего использования ПО ВTR необходима верификация, которая не только проверяет надежность отдельных расчетных процедур, но и служит руководством к корректному применению кода к различным задачам оптимизации и анализа процессов в трактах инжекции нейтральных пучков.

В данной работе представлен набор тестов, которые делятся на две группы: проверка корректной работы ВTR и исследование чувствительности моделей к входным данным. Эти тесты применимы не только к ВTR-5 и более ранним версиям: предполагается, что будущие версии ВTR тоже должны проходить полную верификацию с ручным или автоматическим использованием разработанных тестов. В первую группу тестов входит проверка физических моделей и условий: уравнения движения частиц в электромагнитных полях; фазовое распределение пучка, полученного из источника-ускорителя ионов; нейтрализация на газовой мишени, потери на ре-ионизацию, ионизация в плазме токамака; сохранение частиц и баланс мощностей в системе. Во вторую группу тестов вошли параметрические скейлинги, демонстрирующие влияние отдельных входных параметров на результаты моделирования: исследование влияния магнитного поля на инжектированную мощность; параметров газовой мишени – на эффективность нейтрализации; ошибок фокусировки составляющих пучка бимлет – на полную эффективность транспортировки; параметров формы бимлет – на конечные профили тепловой нагрузки; уровня детализации геометрии инжектора – на эффективность расчета тепловых нагрузок и выходные показатели работы инжектора.

Приведено сравнение результатов работы ВTR с аналитическими решениями. Оно показывает, что при корректном использовании код ВTR служит надежным инструментом детального анализа и оптимизации систем инжекции; кроме того, ВTR код может применяться для исследования эффективности различных схем инжекции и захвата инжектированной мощности в плазме токамака.

Работа проведена при поддержке организации ITER.

Литература

- [1]. E. Dlugach, BTR code for neutral beam design. <https://sites.google.com/view/btr-code/home>.
- [2]. E. Dlugach, M. Kichik, Beam Transmission (BTR) Software for Efficient Neutral Beam Injector Design and Tokamak Operation. // Software 2023, 2, 476–503. <https://doi.org/10.3390/software2040022>.
- [3]. ITER Final Design Report; NB H&CD, DDD 5.3; IAEA: Vienna, Austria, 2001.
- [4]. Damian B. King, Review of the Beam Transport and Re-ionization Code. 2008.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К RAMI-АНАЛИЗУ ДЛЯ ДИАГНОСТИК ИТЭР

Коновалов Г.М.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: g.konovalov@iterrf.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.209

Для увеличения надежности ИТЭР был разработан комплекс мер, называемый RAMI-анализом [1, 2]. RAMI – аббревиатура от reliability (коэффициент надежности – вероятность того, что система будет выполнять свои функции без отказов на протяжении заданного интервала времени), availability (коэффициент готовности – вероятность того, что система будет в состоянии выполнять свои функции в данный момент времени), maintainability (ремонтпригодность – возможность ремонта, обслуживания и модернизации), inspectability (инспектируемость – возможность осуществления контроля). RAMI-анализ проводится на стадии проектирования и начинается с эскизного анализа. Уже на самом начальном этапе можно предложить действия, направленные, например, на изменение конструкции или элементной базы, подготовку набора специфических, не предусмотренных промышленными стандартами тестов, составление списка запасных частей и т.д. с конечной целью повысить надежность системы и иногда даже минимизировать затраты на изготовление.

Требования к проектированию и сооружению ИТЭРа, в частности требования к надежности различных подсистем, даны в проектных документах верхнего уровня (Project Requirements). В части диагностического комплекса – набора диагностических систем, позволяющего осуществлять измерение и контроль параметров плазмы и токамака, – требования к надежности определены в терминах минимальных коэффициентов готовности. Диагностический комплекс включает в себя около восьмидесяти различных диагностик и позволяет измерять более ста параметров. Все параметры разделены на четыре группы в зависимости от их назначения: обеспечение безопасной работы (machine protection – MP), основной и дополнительный контроль работы установки (basic and advanced control – BC и AC) и физические измерения (physics – Ph). Проектной документацией определены только минимальные значения коэффициентов готовности для группы параметров. Требования к коэффициентам готовности отдельных диагностических подсистем не определены. В настоящий момент при определении коэффициентов готовности диагностик разработчики предполагают, что глобальные требования распространяются на подсистему без учета того, что параметр может измеряться одновременно несколькими диагностиками и что вклады каждой диагностики в измерение параметра неравнозначны. Такой подход дает завышенные требования к коэффициентам готовности конечных подсистем, так как не учитывает имеющееся дублирование измерений.

Для решения описанной выше проблемы ранее была разработана математическая модель и вычислительный алгоритм на ее основе [3]. Результаты расчетов, выполненных с помощью этого алгоритма, могут быть использованы разработчиками различных диагностических подсистем ИТЭР в виде конкретных требований.

Литература

- [1]. Van Houtte, D., Okayama K. and Sagot F. 2010. RAMI Approach for ITER. J. Fusion Engineering and Design, 85 (7–9): 1220–1224. doi: 10.1016/j.fusengdes.2010.03.007.
- [2]. Коновалов Г.М. Методика расчета надежности международного термоядерного экспериментального реактора и оптимизация действий по снижению рисков // Системы и средства информатики, 2016. Т. 26. № 1. С. 166 – 181.
- [3]. Коновалов Г.М. Проблема задания коэффициентов готовности диагностических систем в проекте ИТЭР: постановка задачи и алгоритм решения // Системы и средства информатики, 2020. Т. 30. № 2. С. 89 – 102.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ИКД ДМНП ИТЭР

¹Козерук А.А., ^{1,2}Кормилицын Т.М., ^{1,2}Обудовский С.Ю.,
^{1,2}Кашук Ю.А., ^{1,2}Воробьев В.А.

¹ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, округ Троицк, Россия, e-mail: kozeruk.aa@phystech.edu

² Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.210

Строящийся международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР (англ. International Thermonuclear Experimental Reactor) является первым в мире экспериментальным термоядерным реактором на базе токамака. Задача проекта – демонстрация возможностей использования управляемого термоядерного синтеза (УТС) для выработки энергии. В процессе работы токамака планируется достичь следующих параметров: магнитное поле около 5,3 Тл, ток плазмы – 15 МА, мощность термоядерных реакций – 700 МВт при длительности реакций более 300 секунд. Для обеспечения безопасной работы установки и получения достоверной информации о параметрах плазмы при всех возможных сценариях работы токамака разработан широкий комплекс диагностик. Одной из ключевых диагностик, отвечающих за контроль т/я мощности, является нейтронная диагностика Диверторный Монитор Нейтронного Потока ДМНП (англ. Divertor Neutron Flux Monitor). Она измеряет полный выход нейтронов и позволяет определить термоядерную мощность установки. В состав ДМНП входят ионизационные камеры деления (ИКД) с ураном-235 и ураном-238 [1].

Целью работы было детальное моделирование функции отклика ИКД на основе как урана-238, так и урана-235 при регистрации потока быстрых DD-нейтронов (2,5 МэВ) и DT-нейтронов (14,1 МэВ), а также потока нейтронов с характерным для реального расположения ИКД ДМНП спектром. Проведены следующие работы – построение модели с учётом реалистичной геометрии электродов и плотности нанесения материала, оценка корректности разработанной численной модели на эксперименте, построение амплитудного спектра ИКД, определение порога дискриминации, анализ калибровочного коэффициента диагностики ДМНП. Для моделирования использовалось специализированное ПО GEANT4 [2], реализующее метод Монте-Карло для расчёта транспорта и взаимодействия ионизирующего излучения с веществом. Экспериментальная проверка модели проводилась при облучении ИКД быстрыми нейтронами источника Am-Be.

Результатом работы стала модель функции отклика ИКД, которая позволяет анализировать измерительные характеристики детекторных узлов ДМНП в разрядах ИТЭР, учитывать вклад особенностей геометрии электродов ИКД в наблюдаемый амплитудный спектр, а также достоверно оценивать калибровочный коэффициент ИКД - коэффициент соответствия между количеством актов деления в рабочем объёме ИКД и скоростью счёта ИКД. Полученная модель предлагается как часть синтетической диагностики ДМНП ИТЭР.

Работа выполнена в рамках государственного контракта №Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 года на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

Литература

- [1]. Yu. Kashchuk, A. Krasil'nikov, D. Prosvirin, A. Tsutsikh, V. Frunze & C. Walker, “Concept project of ITER divertor monitor of neutron flux”, Instruments and Experimental Techniques, V. 49, No. 2, p. 179–186, 2006.
- [2]. J. Allison et al., “Recent developments in GEANT4” // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., v. 835, p. 186–225, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.nima.2016.06.125.

ОБОСНОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОЕДИНИТЕЛЯ БЛАНКЕТА ИТЭР

¹Козлов С.А., ¹Вербицкая К.С., ¹Паршутин Е.В., ¹Толкачев Д.В., ¹Поддубный И.И.,
¹Свириденко М.Н., ²Путрик А.Б.

¹Акционерное общество «НИКИЭТ», г. Москва, Россия,

²Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.211

В рамках реализации Соглашения о Поставке теплонапряженных панелей первой стенки бланкета ИТЭР и соединителей модуля бланкета (СМБ) для сооружаемого в настоящее время во Франции Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР АО «НИКИЭТ» ответственно за разработку и поставку на площадку ИТЭР более 2000 комплектов электрических соединителей (ЭС).

ЭС различных типоразмеров предусмотрены в конструкции бланкета ИТЭР для замыкания токов с поверхности модуля бланкета (МБ) на вакуумную камеру (ВК) с целью защиты патрубков подвода и отвода теплоносителя от омического нагрева, а также снижения электромагнитных нагрузок при возможных срывах плазмы на МБ. Два ЭС устанавливаются на интерфейсе “панель первой стенки (ППС) - защитный блок (ЗБ)”, а также 2 шт. на интерфейсе “ЗБ – ВК”.

ЭС выполнен в виде моноблочной конструкции прямоугольной формы с волнообразными токоведущими ламелями толщиной 1,2 мм. ЭС выполняется в двух исполнениях в зависимости от расположения. Десяти ламельные - для модулей, расположенных в зоне внешнего бланкета, позволяет пропускать ток силой до 41,4 кА. Общие габариты – 168 × 80 × 47 мм. Четырнадцать ламельные - для модулей на верхнем своде ВК и в зоне внутреннего бланкета, в которых возможно протекание тока значением до 137 кА. Общие габариты – 168 × 100 × 47 мм.

В соответствии с требованиями МО ИТЭР до начала серийного изготовления необходимо квалифицировать процесс изготовления конструкции ЭС и подтвердить работоспособность конструкции в условиях, характерных работе ИТЭР. Программа квалификации ЭС включает как изготовление, так и циклические механические испытания при повышенной температуре.

В рамках программы квалификации было изготовлено 11 ЭС. Механические циклические испытания выполнены в три стадии.

Стадия 1 соответствует режиму работы inductive I, стадия 2 и 3 соответствует срывам плазмы. После прохождения стадий 1 и 2 испытаний на всех ламелях отсутствуют разрушения и трещины, что удовлетворяет критериям приемки. После 3 стадии показано, что минимальный коэффициент запаса равен 2, а максимальный 5,25, и было разрушено не более 2-х ламелей при требуемом числе циклов 400, что удовлетворяет критериям приемки. По результатам квалификации внесены корректировки. Дополнительно изготовлено три ЭС бланкета ИТЭР из CuCrZr-бронзы и проведены механические циклические испытания. Соединители прошли стадии 1 и 2 испытаний без замечаний, трещин или разрушения ламелей не зафиксировано, что удовлетворяет критериям приемки ЭС. По окончании 3-ей стадии испытаний были зафиксированы трещины на всех ламелях, однако минимальный коэффициент запаса составил 7,5 при требуемом числе циклов 400, что удовлетворяет критериям приемки.

Специалисты АО «НИКИЭТ» завершили процесс квалификации ЭС модуля бланкета ИТЭР. По результатам квалификации подтверждена как возможность изготовления ЭС, так и его работоспособность при нагрузках, соответствующих режимам работы ИТЭР.

Работа выполнена в рамках договора №71-26до от 16 июня 2021 г между «ИТЭР-Центр» (Заказчик) и АО «НИКИЭТ» (Исполнитель), государственные контракты с ГК «Росатом» от 11.05.2021 г. № Н.4а.241.19.21.1038, от 14.02.2022 г. № Н.4а.241.19.22.1123 и от 18.01.2023 г. № Н.4а.241.19.23.1014.

КОНЦЕПЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОММУТАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ЭМС ТРТ

¹Латманизова Ю.Н., ¹Алексеев Д.И., ¹Манзук М.В., ²Микляев С.М., ¹Семенов А.И.,
¹Соленый А.А., ¹Гороховский Д.В., ¹Карпишин М.В., ¹Танаев А.В.

¹Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия

²Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: latmanizova.yuliya@sintez.niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.212

Международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР – уникальная электрофизическая установка, способная воспроизводить условия протекания контролируемой термоядерной реакции. В то же время установка ИТЭР является высокотехнологичным проектом, в рамках которого создается и обрабатывается множество различных технологических решений.

Разрабатываемая в настоящий момент установка ТРТ имеет очень схожую с токамаком ИТЭР конфигурацию электромагнитной системы, обусловленную требуемыми параметрами создаваемого магнитного поля, и состоит из: обмоток тороидального поля (16 шт.), обмотки индуктора (4 шт.), обмотки управления (6 шт.), корректирующих катушек (24 шт.) и обмотки горизонтального управляющего поля (4 шт.).

Для обеспечения режимов протекания токов в сверхпроводниковых обмотках магнитной системы установки ТРТ в соответствии с заданными сценариями предлагается разработать универсальный коммутационный комплекс на основе комплекса коммутационных аппаратов для системы электропитания сверхпроводниковой катушки центрального соленоида токамака ИТЭР.

Универсальный коммутационный комплекс состоит из следующих компонентов: система оперативной коммутации тока; система быстрого вывода энергии; защитный замыкатель; разъединитель.

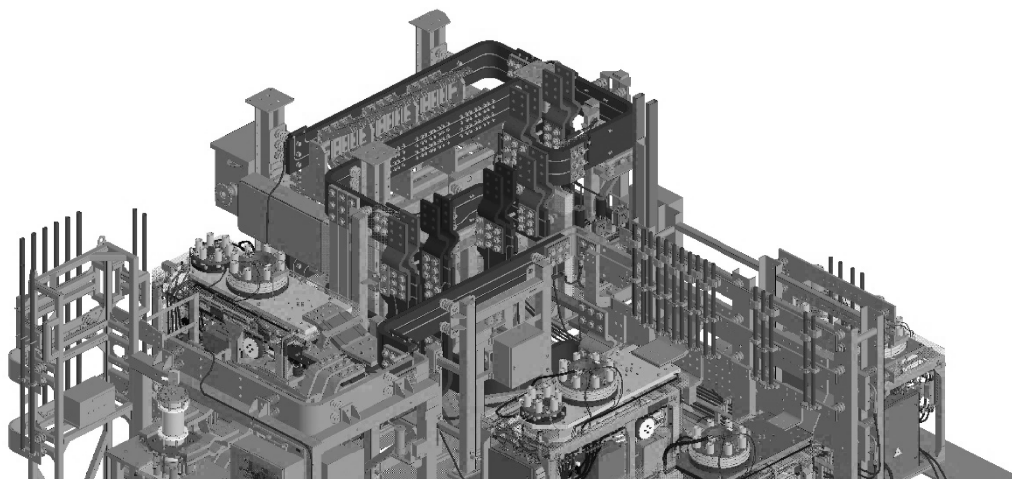


Рис. 1.

IN SITU ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ, СОДЕРЖАЩИХ БОР И ДРУГИЕ «ЛЕГКИЕ» ВКЛЮЧЕНИЯ, НА МИКРОННЫХ ГЛУБИНАХ НА ОСНОВЕ «СПЕКТРОСКОПИИ ОТРАЖЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ»

Афанасьев В.П., Лобанова Л.Г., Будаев В.П., Семенов-Шефов М.А., Федорович С.Д.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.213

Традиционными методами послойного анализа многокомпонентных мишеней являются Резерфордское обратное рассеяние и послойное распыление, сопровождающееся анализом компонентного состава с помощью Оже спектроскопии. Однако, первый метод не позволяет определять распределение «легкой» компоненты в «тяжелой»; второй метод изменяет состав образца в результате эффекта преимущественного распыления, также имеются трудности в определении скорости распыления многокомпонентных образцов.

Спектроскопия отраженных электронов (СОЭ) – метод, который находится на стадии своего становления и не получил широкой известности. Данную методику широко используют только три научные группы [1–3]. Метод СОЭ лишен всех недостатков, присущих указанным выше подходам. Метод прост в экспериментальной реализации, но требует нетривиальную технику расшифровки данных. За последние годы удалось значительно усовершенствовать технику расшифровки спектров отраженных электронов, что позволило повысить точность измерения послойных профилей [3].

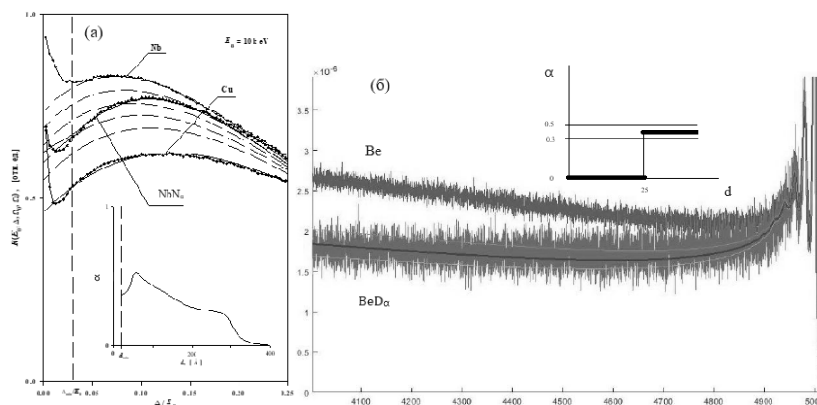


Рис. 1. Энергетические спектры электронов, отраженных от (а): Cu, Nb и NbN $_{\alpha}$, $E_0 = 10$ кэВ; (б): Be и BeD $_{\alpha}$, $E_0 = 5$ кэВ. Угол падения 0° , угол отражения 135° . На встроенных картинках представлены послойные профили N в Nb и D в Be.

Рис. 1 показывает, что значительное изменение сигнала отраженных электронов позволяет определить послойные профили имплантированной легкой примеси в массиве образца. Энергетические спектры измерены энергоанализатором с энергетическим разрешением 0.7% (а) и 0,03% (б). Столь значительное различие в возможностях энергоанализатора не повлияло на качество измерения профилей имплантированных атомов, и это связано с тем, что информация получается из континуума точек на куполе спектра. Определение компонентного состава мишеней в приповерхностных слоях выполняется на основе отработанных Оже и РФЭС методов. Представлен метод, позволяющий расширить возможности анализа образцов, представляющие распределение легкого материала в тяжелом на микрометровых глубинах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2023-0016).

Литература

- [1]. Niedrig H., Rau E.I. // Nucl. Instrum. Methods, 1998, 142, 523.
- [2]. Afanas'ev V.P. et.al. // J. Phys. Conf. Ser., 2020, 1713, 012001.
- [3]. Afanas'ev V.P. et. al. // J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom., 2016, 210, 16.

ИЗМЕНЕНИЕ ПЛАЗМОННЫХ ВОЗБУЖДЕНИЙ В УГЛЕРОДЕ И ВОЛЬФРАМЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Афанасьев В.П., Лобанова Л.Г., Будаев В.П., Федорович С.Д., Семенов-Шефов М.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.214

Углеродные материалы представляют широкий интерес в исследованиях физиков, химиков и материаловедов. Углеродосодержащие покрытия обладают целым набором полезных конструкционных характеристик. Коррозия углеродных покрытий под воздействием термоядерной плазмы приводит к возникновению углеводородных покрытий на деталях термоядерных установок, приводя к тритиевой проблеме [1]. Поверхность вольфрама под воздействием плазмы может переходить в состояние типа «пух». Возникает вопрос об изменении аллотропного вида вольфрама, происходящего в результате плазменной обработки.

Рассматриваются принципы анализа углеродных, углеродосодержащих, боросодержащих и вольфрамовых образцов методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Анализируются аллотропные разновидности материалов. Наряду со стандартными РФЭС подходами (XPS метод), основанными на рассмотрении пиков фотоэлектронов, вышедших в вакуум без неупругих потерь энергии, исследуется широкая область потерь энергии фотоэлектронов (PES метод). Строится аналитическая методика расшифровки РФЭС сигнала, основанная на малоугловом подходе.

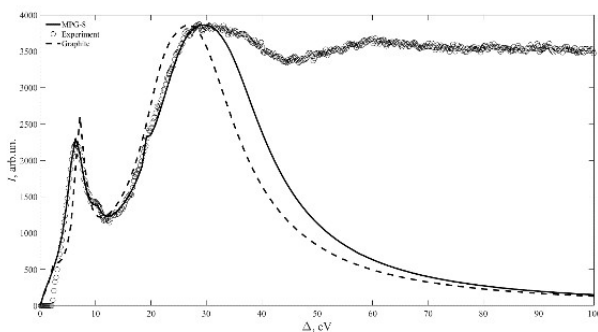


Рис. 1. Сечение неупругих потерь энергии МПГ-8, восстановленного из РФЭС спектра, и графита.

Рис. 1 показывает, что PES анализ позволяет однозначно определять аллотропный вид углерода. На рис. 1 также продемонстрировано, что сечение неупругих потерь энергии МПГ-8 после плазменной обработки идентично сечению графита. Отметим, что в [2] PES анализ позволил однозначно определить, что РФЭС спектр восстановленного оксида графена практически совпадает с РФЭС спектром МПГ-8, однако плотность полученного материала в несколько раз меньше плотности графита. Данный факт указывает на наномасштаб информации, получаемой на основе РФЭС анализа. В работе рассмотрены примеры идентификации образцов по области потерь энергии в РФЭС спектрах. Наличие примесей в углеродном образце приводит как к химическому сдвигу пика, так и к искажению сечения неупругих потерь энергии в области от 0 до 10 эВ – область $\pi+\sigma$ гибридизации практически не изменяется.

Представлены результаты РФЭС анализа вольфрамового «пуха». Показано, что структура плазмонных возбуждений в «пухе» значительно отличается от вольфрама. Продемонстрировано, что в результате контакта с атмосферой в «пухе» происходят более радикальные изменения, нежели в исходном образце вольфрама.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2023-0016).

Литература

- [1]. Rosanvallon S. et.al. // Fusion Sci. Tech., 2011, 60, 855.
- [2]. Afanas'ev V.P. et.al. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech., 2020, 14, 366.

ОТРАЖЕНИЕ ЛЕГКИХ ИОНОВ ОТ СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, В ТОМ ЧИСЛЕ, БОР И УГЛЕРОД. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

¹Афанасьев В.П., ¹Лобанова Л.Г., ¹Будаев В.П., ²Синельников Д.Н., ²Ефимов Н.Е.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия,

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.215

Взаимодействие легких ионов с энергией от сотен эВ до нескольких кэВ с твердыми телами обладает целым рядом особенностей: развитие радиационно стимулированной диффузии легкого компонента мишени; доминирование процесса распыления мишени восходящим отраженным потоком ионов. Отраженными от первой стенки ионами определяется процесс рециклинга в перспективных термоядерных установках. Из вышеуказанного следует, что подробная информация о процессах отражения легких ионов от стратифицированных поверхностей позволяет решить ряд проблем, связанных с первой стенкой.

В работе строится аналитическая модель процесса взаимодействия легких ионов со слоисто-неоднородными поверхностями. Представлена простая количественная модель описания спектров протонов, отраженных от k -го полубесконечного однородного материала - R_k [1]. Для описания отражения легких ионов от слоисто-неоднородной мишени: слой материала «1», толщина которого много меньше транспортной длины пробега в этом материале, на подложке материала «2», используется модель, представленная в [2]: $R_{12} = R_1 + t_1 \times (R_2 - R_1) \times t_1$. Аналогично строится модель отражения для k -слойной мишени. Развитая теория использована для интерпретации экспериментов по отражению ионов от слоисто-неоднородных мишеней, выполненных на большом масс-монохроматоре МИФИ.

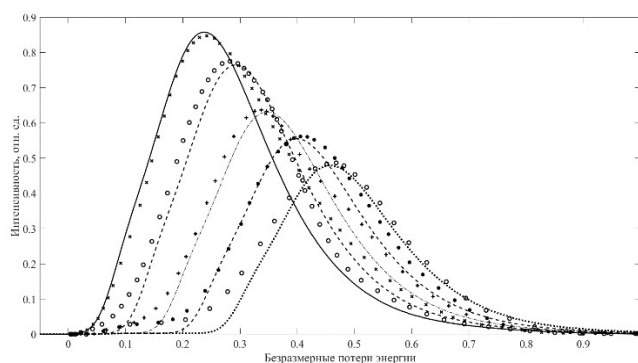


Рис. 1. Энергетические спектры протонов, отраженных от вольфрамового образца, покрытого слоями лития разной толщины. Угол падения 71° , угол отражения 109° . $E_0 = 25$ кэВ. Символы – эксперимент [3].

Рис. 1 демонстрирует удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных результатов. Толщины слоя лития определены на основе данных по средним потерям энергии на единицу длины, взятыми из NIST. Рассмотрены и проинтерпретированы экспериментальные данные слоисто-неоднородных мишеней, в которых присутствует бор и углеродосодержащие слои. Проведен критический обзор результатов исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FSWF-2023-0016).

Литература

- [1]. Afanas'ev V.P., Lobanova L.G., Shulga V.I. // J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech., 2023, 17, 78.
- [2]. Afanas'ev V.P., Naujoks D., // J. Phys. B. Cond. Mat., 1991, 84, 397.
- [3]. Bulgadaryan D.G., Sinelnikov D.N., Efimov N.E., Kurnaev V.A. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2020, 84, 742.

ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ТРТ

Миронова Е.Ю., Портоне С.С., Нагорный Н.В., Миронов А.Ю., Семёнов И.Б.,
Семёнов О.И.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.216

Для термоядерной установки Токамак с реакторными технологиями (ТРТ) осуществляется проектирование комплекса автоматизированных информационно-управляющих систем (АИУС). Комплекс необходим для поддержки режимов работы установки, управления группами диагностических и технологических систем, обеспечения хранения и работы с данным установки.

Для обеспечения интеграции информационно-управляющих систем, диагностических и технологических систем в единый комплекс систем для измерений физических параметров, мониторинга и управления технологическими и физическими процессами на этапе проектирования немаловажно внедрение единых подходов к обозначению технических и информационных объектов, использование средств совместного проектирования, системы управления документацией, средств моделирования, регламентирование инструментов и средств разработки. С учетом сложной доступности высокопроизводительных решений регистрации и обработки данных при централизованном проектировании требуется создать каталог таких решений для применения разработчиками установки. Создание каталогов разрешенного к использованию оборудования измерения и управления позволит сократить издержки на сопровождение проектирования и создания отдельных систем, интеграцию, эксплуатацию и обслуживание

Планирование инфраструктуры здания должно с запасом учитывать: систему бесперебойного электропитания, систему кабельных соединений, серверные помещения с поддержкой требуемых для оборудования окружающих условий, отдельное помещение для пультовой установки, последующую возможность интеграции систем мониторинга, оповещения, безопасности и контроля доступа.

Автоматизированные информационно-управляющие системы включают: центральную систему управления и центральную пультовую, систему блокировок и защит диагностического оборудования, систему информационной безопасности, систему обработки данных. АИУС ТРТ обеспечивает моделирование и подготовку диагностических данных для системы управления плазмой, локальные вычислительные сети для обмена данными, синхронизации, хранение данных.

В докладе рассмотрены подходы к проектированию АИУС ТРТ на основе опыта внедрения процессов разработки на передовых мировых и российских установках УТС исследований типа токамак.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» в рамках Государственного контракта № Н.4к.241.09.23.1060 от 17.04.2023 «НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023 – 2024 годов».

РАЗБОРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР

Монтак Н.В., Васильев В.А., Киселев Д.А., Пискарев П.Ю., Колесник М.С.

*Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: montak@sintez.niiefa.spb.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.217

Разборное соединение прототипа первой стенки (ППС) представляет собой соединение выходных патрубков каналов охлаждения ППС с оснасткой и трубопроводом системы подачи гелия под давлением стенда для вакуумных испытаний. Герметичность соединения обеспечивается системой уплотнительных колец, что позволяет достигнуть высоких показателей вакуума.

Цель работы заключается в исследовании разъемного соединения между патрубком системы подачи гелия и входными гидравлическими коннекторами ППС в процессе проведения цикла вакуумных испытаний гелием на герметичность при различных температурах. Для данного вида соединений традиционно используется сварка, что требует проведения последующей механической обработки. В связи с тем, что из-за специфики дизайна гидравлического коннектора ППС – традиционную обработку провести невозможно, нами было предложено использовать разъемное соединение, где наиболее существенный риск заключается в появлении недопустимого натекания через используемые уплотнения. Негерметичность будет приводить к ухудшению чувствительности течеискателя при испытаниях, а также суммируясь с натеканием через объект испытаний, будет приводить к ложной отбраковке последнего. Поэтому, в случае некачественного уплотнения, возникает необходимость проведения повторных испытаний. В этом случае, стратегия снижения риска заключается в использовании максимально надежной уплотнительной системы, которая обеспечит допустимый уровень натекания. Экспериментальное обоснование разработанной конструкции прототипа разъемного соединения производится на макетах, представляющих собой точную копию гидравлических коннекторов ППС.

Для проведения финальных испытаний разъемного соединения были выбраны металлические уплотнения двух производителей: HTMS (Бельгия) и Technetics (Франция-США). Оба вида уплотнений представляют собой металлическую пружину, заключенную в металлический корпус тороидального вида, с нанесённым мягким легкодеформируемым покрытием из серебра.

В АО «НИИЭФА» была разработана и обоснована конструкция разборного соединения с системой уплотнительных колец, а также была разработана установка для проведения вакуумных гелиевых испытаний масс-спектрометрическим методом течеискания.

В 2022 и начале 2023 года была проведена первая серия испытаний разборного соединения с использованием колец HTMS, а также опубликованы результаты этих испытаний. На текущий момент выполнен полный объем запланированных испытаний, а также проведен сравнительный анализ двух типов уплотнений, что позволило получить полную картину о целесообразности и работоспособности данного метода.

Работа выполнена во исполнение обязательств Российской Федерации по соглашению о поставках высокотехнологичной продукции в обеспечение натурального вклада Российской Федерации в проект ИТЭР в рамках договора № 107-21/01 от 18 октября 2021 года между ЧУ "ИТЭР-Центр" и АО "НИИЭФА".

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ ЕЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПРОТОТИПА ЭЛЕМЕНТА ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА УСТАНОВКЕ ПЛМ-М

^{1,2}Муравьева Е.А., ^{1,2}Кавыршин Д.И., ¹Будаев В.П., ¹Федорович С.Д., ^{1,2}Чиннов В.Ф.,
¹Чан К.В., ¹Мязин А.С.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.218

Обращенные к плазме элементы облицовки камеры термоядерного реактора будут подвергаться воздействию потока нейтронов, электромагнитному излучению, а также воздействию плазменных потоков высокой плотности, что приведет к деградации поверхности облицовки. На созданной в НИУ «МЭИ» установке ПЛМ (плазменный линейный мультикас) проводятся испытания материалов, перспективных для использования в качестве первой стенки, в близких к условиям реактора условиях в стационарном режиме в целях исследования эрозии прототипов первой стенки.

Параметры гелиевого плазменного разряда, используемого в установке ПЛМ: магнитное поле – до 0,03 Тл, в каспах – до 0,2 Тл, диаметр плазменного разряда – около 3,5 см, температура электронов – $1 \div 10$ эВ, плотность плазмы – $10^{12} \div 10^{13}$ см⁻³, потоки ионов гелия на испытываемые образцы – до 10^{22} м⁻²с⁻¹.

Плазменная установка ПЛМ оснащена оптической и зондовой системами диагностики плазмы. Монохроматор-спектрограф MS7504(i) позволяет регистрировать излучение плазмы в диапазоне длин волн от 200 до 1100 нм со спектральным разрешением 0,013 нм и пространственным ~ 100 мкм. Одновременно регистрируемый при этом спектральный интервал волн составляет 16,5 нм. На выходе монохроматора установлена ПЗС камера. С помощью монохроматора-спектрографа MS7504(i) в сочетании с оптоволоконным четырехканальным спектрометром AvaSpec выполняется регистрация оптических спектров излучения плазмы вблизи поверхности введенных в неё образцов конструкционных материалов.

С целью увеличения плотности энергии (моделирования воздействия ЭЛМов и срывов плазмы на стенку) были проведены измерения оптических спектров в зоне приповерхностной плазмы при дополнительном воздействии на поверхность мишени импульсов Nd:YAG лазера длительностью 10 нс с энергией 0,5 Дж на длине волны 1064 нм. Воздействие лазера практически не оказывает влияния на интенсивность гелиевых линий, при этом приводя к абляции поверхности образца и появлению в спектре линий атомарного вольфрама, интенсивность которых обратно пропорциональна регистрируемой интенсивности рассеянного лазерного излучения и растёт с каждым импульсом.

Вейвлет-преобразование зарегистрированного в гелиевой плазме установки ПЛМ сигнала зонда содержит информацию о турбулентных структурах. Доминирующее влияние оказывают структуры, связанные с временными масштабами 120 микросекунд. При действии лазерного импульса на материал происходит изменение свойств приповерхностной плазмы, наблюдается иерархичность турбулентных структур на масштабах от 10 до 500 мкс. Такое поведение типично наблюдается в турбулентности периферийной плазмы термоядерных установок и вызывается дальними корреляциями дрейфово-диссипативной (низкочастотной электростатической) турбулентности плазмы.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 21-79-10281.

Литература

- [1]. V.P. Budaev et al., The PLM Plasma Device for Tests of Tungsten with Powerful Stationary Heat Plasma Loads // Phys. Atom. Nuclei, 82, 1281–1291 (2019);
<https://doi.org/10.1134/S1063778819090023>.

СТАТУС РАЗРАБОТКИ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТА ИТЭР В 2023 ГОДУ

Нагорный Н.В., Портоне С.С., Миронов А.Ю., Миронова Е.Ю., Гужев Д.И., Николаев А.И., Нестеренко В.М., Авдюшкин Д.А., Михалев И.М., Арбузова Т.В., Семёнов О.И., Семёнов И.Б.

Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.219

Диагностический комплекс проектируемой установки ИТЭР будет включать множество измерительных систем, для каждой из которых потребуется производительная система сбора и обработки данных. Несмотря на различия принципов выполнения измерений диагностическими системами, все системы сбора и обработки данных имеют общие цели – сохранение информации, получаемой с помощью детекторов в полном объёме и с необходимой точностью, а также выполнение потоковой обработки экспериментальных данных, получение расчётных (измерительных) параметров и обеспечение обратной связи о состоянии плазмы для центральной системы управления установкой.

Большинство разрабатываемых в нашей стране систем сбора и обработки данных для диагностического комплекса установки ИТЭР приближаются к зачитам финальных технических проектов в Международной Организации ИТЭР, либо уже прошли этот этап и проходят подготовку к производству. Работы над финальным проектированием систем связаны не только с задачами по созданию соответствующей специализированной документации, но и с обширной работой по макетированию и прототипированию систем сбора данных, управления и их отдельных узлов, а также для подтверждения работоспособности и технических характеристик создаваемых решений. Активно ведётся разработка программного обеспечения, исполняемого на компьютерах систем и выполняющего задачи интеграции диагностического вычислительного оборудования и получения данных, а также конечных расчётов, упаковки, буферизации и передачи данных (с учётом особенностей взаимодействия с системой хранения данных установки ИТЭР).

В данной работе представлен обзор результатов работ над системами сбора и обработки данных в Проектном Центре «ИТЭР» и связанных организациях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» в рамках Государственного контракта № Н.4а.241.19.23.1014 от 18.01.2023 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовке к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОБДИРОЧНЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ АТОМНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ НА ИТЭР: РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ

¹Афанасьев В.И., ¹Мельник А.Д., ¹Миронов М.И., ²Мокеев А.Н., ¹Наволоцкий А.С.,
¹Несеневич В.Г., ¹Петров М.П., ¹Петров С.Я., ¹Чернышев Ф.В., ¹Шмитов Р.Ю.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,

²Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.220

Обдирочные мишени на основе тонких углеродных пленок являются критически важными элементами атомных анализаторов – приборов корпускулярной диагностики, создаваемых для реактора ИТЭР [1]. Они обеспечивают эффективное преобразование входящего потока атомов в поток заряженных частиц, которые затем разделяются по энергии и массе в электрическом и магнитном полях анализаторов. Конструктивно мишень представляет собой кольцевую рамку с закрепленной на ней мелкоструктурной медной сеткой, на которую нанесена углеродная пленка толщиной около 10 нм. Обдирочная мишень устанавливается на входе в анализатор, т.е. находится на оси прямого вакуумного канала, непосредственно соединенного с плазменным объемом. В условиях реактора ИТЭР она будет подвержена существенной радиационной нагрузке; кроме того, возможны механические воздействия, нарушающие целостность углеродной пленки. Поскольку изменение толщины или нарушение целостности мишени может повлечь за собой изменение эффективности регистрации потоков атомов, в анализаторах предусмотрена возможность оперативной замены рабочей мишени без нарушения вакуума с помощью специального механизма, содержащего дополнительно четыре запасные мишени [2]. Для определения необходимости замены мишени в состав комплекса анализаторов включены две системы контроля качества обдирочных мишеней. Одна из них основана на использовании компактного источника ионов, формирующего зондирующий пучок ионов гелия заданной интенсивности и энергии [3]. Другая система предназначена для оперативного визуального контроля целостности пленки с помощью радиационно-стойкой видеокамеры СТС-40М производства компании «ДИАКОНТ» [4]. В докладе представлены результаты, полученные в ходе разработки и испытаний данной системы. Рассмотрена ее конструкция и продемонстрирована возможность определения визуальных дефектов обдирочной мишени. Основное внимание уделено вопросу радиационной стойкости видеокамеры и применяемой светодиодной подсветки. Для этих устройств ожидаемые значения флюенса быстрых нейтронов на ИТЭР составят $\sim 5 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и $\sim 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Испытания, проведенные на пучке быстрых нейтронов, показали, что в таких радиационных условиях система визуального контроля качества обдирочных мишеней сохранит свою работоспособность.

Литература

- [1]. V.I. Afanasyev et al., Neutral particle analysis on ITER: present status and prospects // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A 621 (2010) 456.
- [2]. С.Я. Петров и др., Особенности конструкции системы диагностики по потокам атомов изотопов водорода для международного термоядерного реактора ИТЭР // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 1, с. 68.
- [3]. A.D. Melnik et al., Bench tests of a helium ion source for the neutral particle diagnostic system of the ITER tokamak // Rev. Sci. Instrum. 91 (12) (2020) 123301.
- [4]. https://www.diakont.ru/services/radiation_resistant_tv_systems/

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СБОРКИ ГИБКОЙ ОПОРЫ БЛАНКЕТА ИТЭР В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

¹Никулин Б.И., ¹Поддубный И.И., ¹Свириденко М.Н., ²Путрик А.Б.

¹Акционерное общество «НИКИЭТ», г. Москва, Россия

²Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.221

Бланкет реактора ИТЭР состоит из 440 модулей бланкета (МБ), каждый из которых закреплен на вакуумной камере (ВК) с помощью 4х сборок гибких опор (ГО), главным элементом которых является картридж, представляющий собой полый цилиндр с двумя фланцами: нижний соединяется с корпусом ВК, верхний – с защитным блоком (ЗБ). Для обеспечения электрической изоляции ГО от ВК используется электроизоляционное покрытие (ЭИП) на базе оксида алюминия.

Нормальный режим работы реактора представляет собой периодическую последовательность режимов импульса с нейтронным потоком на внутрикамерные компоненты в течение 450 с и паузы с нулевым энерговыделением в течение 1800 с (режим Inductive I). В данном режиме максимальная температура в сборке ГО достигает 189°C в центральном болте, тогда как в максимальная температура в картридже – 156°C.

При срывах плазмы в МБ индуцируются знакопеременные электромагнитные силы, действующие на картридж в осевом направлении, величиной, лежащей в диапазоне 500 – 600 кН, для двух сценариев срыва плазмы типа Fast VDE II и типа Slow VDE III. Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) картриджа, с учетом комбинации нагрузок в режимах Inductive I и Fast VDE II, показал, что конструкция картриджа удовлетворяет нормам статической и циклической прочности SDC-IC.

По требованию МО ИТЭР предварительное усилие затяга болта может варьироваться в диапазоне 600 – 1200 кН. Расчет НДС сборки ГО показал падение осевого усилия в режиме Inductive I с 600 кН до 504 кН, что при действии осевой силы 600 кН приводит к раскрытию стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж», из-за этого при циклическом режиме работы реактора существует вероятность разрушения ЭИП и перехода в аварийный режим работы бланкета, когда наведенный в МБ ток пойдет через опору.

В режиме Slow VDE III максимальная сила тока достигает 137 кА. Соответствующий омический нагрев, превышающий нейтронный на 4 порядка, в течение 300 мс приводит к сильному локальному возрастанию температуры картриджа до 966°C и среднему разогреву спиц до 600°C. Остывание картриджа с помощью механизма теплопроводности до рабочих температур происходит за 2250 с. Вследствие высокой разности температур между посадочным гнездом ВК, охлаждаемого водой при температуре 100°C, и картриджем, лучистый теплообмен между ними снижает время его охлаждения до 1500 с, однако данное значение остается существенным.

Протекание тока по спицам картриджа индуцирует собственное магнитное поле и, как следствие, электромагнитные силы, действующие в поперечном направлении. Однако их величина не превышает 250 Н, влияние на общее НДС оказывается незначительным. В свою очередь, величина поперечных сил, индуцированных тороидальной компонентой магнитного поля реактора со значением до 9 Тл, достигает 12,6 кН на одной спице, что сопоставимо с силой, приводящей к потере устойчивости картриджа в поперечном направлении.

Высокие температуры в течение длительного времени приводят к действию значительных термических напряжений, деградации теплофизических и механических свойств, что вкупе с индуцированными электромагнитными силами, действующими на спицы картриджа, могут привести к потере устойчивости картриджа, поэтому необходимо обеспечить предварительное усилие затяга болта сборки ГО, заведомо гарантирующее условие нераскрытия стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж».

ПЬЕЗО- И БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ АКТУАТОРЫ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ВАКУУМНОМ ОБЪЁМЕ ИТЭР

¹Панкратьев П.А., ¹Смирнова Е.П., ¹Гук Е.Г., ¹Раздобарин А.Г., ¹Медведев О.С.,
¹Елец Д.И., ¹Букреев И.М., ¹Толстяков С.Ю., ¹Чернаков А.П., ¹Климов В.Н.,
²Чернаков П.В., ³Кириенко И.Д., ³Модестов В.С., ¹Мухин Е.Е.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²ООО «Спектрал-Тех», г. Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.222

Внутри вакуумного объёма ИТЭР будут работать несколько десятков подвижных затворов, предотвращающих деградацию диагностических систем из-за напыления и распыления частицами из плазмы. Экстремальные, не встречающиеся в других установках, условия во внутривакуумном объёме ИТЭР, такие как высокие температуры и значительный флюенс нейтронов в совокупности с мощным магнитным полем, затрудняют применение электромагнитных приводов для перемещения затворов. Перспективным типом приводов считаются пьезодвигатели на основе высокотемпературной пьезокерамики. В докладе будут представлены два типа актуаторов, разработанных для диагностик томсоновского рассеяния и контроля эрозии, работающих на двух различных принципах: пьезодвигатель и биметаллический актуатор.

Эксплуатация пьезодвигателей в условиях ИТЭР затруднена из-за высоких доз облучения быстрыми нейтронами ($>0,1$ МэВ) и гамма-квантами ($>0,1$ МэВ), а также высоких рабочих температур, которые могут приводить к ослаблению и потере пьезоэлектрических свойств у используемых в моторе материалов. Компьютерное моделирование предсказывает флюенсы порядка 10^{19} см⁻² для быстрых нейтронов и гамма-квантов в предполагаемом месте установки привода шторки диагностики томсоновского рассеяния в ИТЭР за всё время его эксплуатации. Проведенные ранее испытания ультразвукового пьезомотора показали, что некоторые из существующих высокотемпературных пьезокерамик способны выдерживать необходимые дозы облучения [1, 2]. Данный мотор обладает низким крутящим моментом и высокой скоростью вращения, а разработанный редуктор позволяет увеличить спектр выполняемых мотором задач.

Был изготовлен прототип затвора из стеклокерамики MACOR с комбинированной системой работы актуатора, состоящего из биметаллических пластин, соединённых переключкой и позволяющего работать в условиях вакуума как при наличии, так и в отсутствие магнитного поля. В отсутствие магнитного поля актуатор приходит в движение благодаря нагреванию биметаллических элементов при помощи пропускания через них тока порядка 20 А. Цикл открытия/закрытия затвора в этом режиме составляет около 5 мин. В присутствии магнитного поля актуатор приводится в движение благодаря силе Ампера, и время его срабатывания составляет несколько секунд. Для актуатора такого типа разработана система фиксации в открытом и закрытом положении, основные компоненты которой работают на том же принципе, что и основной актуатор. Проведена адаптация конструкции актуатора для использования в диагностике контроля эрозии. В докладе представлены результаты испытаний данного затвора, включая испытания сейсмостойкости, удовлетворяющие требованиям ИТЭР.

Литература

- [1]. Mukhin E.E. et al. // Fusion Eng. Des. 176, 113017 (2022).
- [2]. Мухин Е.Е. и др. // Письма в ЖТФ 48 (23), 6 (2022).

ИЗМЕРЕНИЯ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЕВ РАЗРЯДОВ ИТЭР ПРИ ПОМОЩИ КОЛЛИМИРОВАННОГО НЕЙТРОННОГО СПЕКТРОМЕТРА

Панкратенко А.В., Кормилицын Т.М., Ревякин П.А.,
Семенов Т.И., Кащук Ю.А.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: a.pankratenko@iterrf.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.223

В данной работе представлены результаты моделирования отклика нейтронного спектрометра в составе диагностики «Анализатор атомов перезарядки ИТЭР» (ААП). Рассмотрены несколько сценариев разрядов в D- и DT-плазме, а также проведена валидация алгоритма вычисления ионной температуры на основе отклика нейтронного спектрометра.

В состав комплекса ААП входит нейтронная ловушка; на ее фронтальной части размещен узел перемещения нейтронного спектрометра (НС) [1]. В состав НС входят два детектора: на основе органического сцинтиллятора – стильбена и искусственного монокристалла алмаза, выращенного CVD-методом. Регистрация нейтронов в первом детекторе происходит при помощи упругого рассеяния на ядрах водорода H. Спектрометр отличается большей чувствительностью и планируется к использованию в разрядах с D-плазмой. Регистрация нейтронов в алмазном детекторе происходит при помощи пороговой реакции $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}$; данный детектор планируется использовать в сценариях с большим нейтронным выходом. Более детальное описание работы детекторов приведено в [2, 3].

Моделирование нейтронного транспорта проводилось при помощи различных расчетных кодов. Нейтронный поток в точке размещения спектрометра рассчитывался методами Монте-Карло в рамках нейтронного анализа экваториального порта №11 [4], а отклик детекторов – при помощи кода GEANT4 [5]. По характеристикам модельных спектров проводилась оценка ионной температуры плазмы.

В ходе работы проверен алгоритм восстановления ионной температуры из данных детекторов. Результаты анализа показывают, что для D-сценариев нейтронный поток в месте расположения НС недостаточен для точной работы алмазного детектора, но достаточен для D–T сценариев. Детектор на основе стильбена из-за высокой чувствительности может быть перегружен в D–T-сценариях. Кроме того, для корректного восстановления ионной температуры необходимо учитывать вклад нейтронов, образованных фракцией надтепловых ионов. Полученные результаты согласуются с результатами других исследований [1].

Работа выполнена в рамках исполнения государственного контракта НИОКР «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году» по Государственному контракту № Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 г.

Литература

- [1]. Afanasyev V.I. et al., (2022). Development of the NPA based diagnostic complex in ITER // Journal of Instrumentation, 17 (7). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/07/C07001>.
- [2]. Kaschuck Y.A. et al. (2002). Fast neutron spectrometry with organic scintillators applied to magnetic fusion experiments. In NIM: A (V. 476).
- [3]. Krasilnikov A.V. et al. (2002). Study of D-T neutron energy spectra at JET using natural diamond detectors // Nucl. Instrum. Meth. A 476, 500.
- [4]. 55.QB - Neutron shielding, nuclear loads and radiation damage calculations and analyses (ITER_D_YTXP4Q v1.3).
- [5]. Agostinelli S. et al. (2003). GEANT4 - A simulation toolkit. In NIM: A, 506 (3), 250–303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).

ВЛИЯНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ВОЗБУЖДЕНИЯ ОТ ЭНЕРГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ИТЭР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Павлова Г.С., Тугаринов С.Н., Шабашов А.Ю., Звонков А.В.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: g.pavlova@iterrf.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.224

На токамаке ИТЭР планируется проводить измерения параметров плазмы с помощью диагностики «Активная спектроскопия» [1, 2]. Эта диагностика позволяет определить концентрацию легких ионов в плазме, их температуру и скорость движения с помощью анализа спектра излучения перезарядки, возникающего при прохождении через плазму высокоэнергетического пучка нейтральных атомов.

Профиль спектральной линии активной перезарядки, по которой и определяются параметры плазмы, может искажаться из-за влияния различных эффектов, таких как, например, эффект гало [3] и зависимость скоростного коэффициента возбуждения перехода от энергии взаимодействия атома пучка и иона плазмы (в англоязычной литературе этот эффект называется cross-section effect) [4]. Влияние эффекта cross-section становится заметным в тех случаях, когда температура плазмы сопоставима с энергией инжектируемого в плазму пучка, и уже нельзя предполагать, что энергия столкновения иона плазмы и атома пучка равна энергии пучка. Из-за того, что скоростной коэффициент возбуждения перехода зависит от энергии столкновения частиц, для тепловых ионов, имеющих разные скорости, вероятность перезарядиться на атоме пучка и излучить фотон различается. Поэтому доплеровский профиль спектральной линии активной перезарядки может искажаться, что приводит к возникновению дополнительной погрешности при определении параметров плазмы.

В этой работе с помощью моделирования в кодах SOS [5] и FIDASIM [6] были оценены погрешности, вносимые эффектом cross-section в измерение параметров плазмы с учётом эффекта гало. Моделирование проводилось для диагностической системы CXRS Edge токамака ИТЭР. Было получено, что в некоторых случаях эффект может привести к увеличению наблюдаемой скорости в несколько раз и понижению наблюдаемой температуры на 15%.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014 "Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году".

Литература

- [1]. Fonck R.J., Darrow D.S., and Jaehnig K.P. // Phys. Rev., 1984, A 29, 3288.
- [2]. Isler R.C. // Plasma Phys. Controlled Fusion, 1994, 36, 171.
- [3]. Hogan J.T. // Journal of Nuclear Materials, 1982, 111 & 112, 413–419.
- [4]. Howell R.B. et al. // Review of Scientific Instruments, 1988, 59 (8), 1521–1523.
- [5]. Von Hellermann M. et al. // Atoms, 2019, 7, 30.
- [6]. Geiger B. et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion, 2020, 62, 105008.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ТОКАМАКЕ Т-11М С ПОМОЩЬЮ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ РЕФРАКТОМЕТРИИ В ЛИТИЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

^{1,3}Петров В.Г., ²Лазарев В.Б., ²Агеев А.В., ²Мурачев М.М., ^{1,2}Джурик А.С.,
²Лешов Н.В.

¹Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: vpetrov1952@yandex.ru

²Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, Россия,
e-mail: v_lazarev@triniti.ru

³Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез – международные проекты», г. Москва, Россия,

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.225

В докладе представлена система измерения плотности, реализованная на токамаке Т-11 М на основе дифференциальных рефрактометров (ДР) с зондированием на обыкновенной волне, и описаны первые результаты, полученные с ее помощью в литиевых экспериментах [1] на токамаке Т-11М. В дополнение к существующему каналу рефрактометра, который измерял среднюю электронную плотность по центральной хорде -1 см, в последнее время были добавлены еще 2 канала, измеряющие линейную плотность по 2-м боковым хордам -9 см и +7 см. Дополнительные каналы также выполнены на основе дифференциального рефрактометра, с зондированием плазмы микроволнами в области частот около 140 ГГц. При этом положение боковых хорд зондирования можно менять от разряда к разряду, что позволяет, таким образом, в принципе проводить измерения профиля электронной плотности за несколько разрядов. Центральный канал используется при этом для контроля средней электронной плотности в течение разряда. Физические основы работы дифференциального рефрактометра, заключающиеся в измерении времени задержки микроволнового сигнала, прошедшего через плазму, были изложены ранее в работах [2, 3]. Время задержки сигнала в плазме при этом определяется по формуле:

$$\Delta t_{gr,0} = \frac{d\varphi(\omega,z)}{d\omega} \approx \frac{\Delta\varphi_1(\omega_1,z) - \Delta\varphi_2(\omega_2,z)}{\Delta\omega} = \frac{\Delta\varphi_{12}}{\Delta\omega}, \quad (1)$$

где $\varphi(\omega, z)$ – фаза зондирующей волны, ω – циклическая частота зондирующей волны, индексы 1 и 2 относятся соответственно к 1-й и 2-й волне дифференциального рефрактометра. В дифференциальном рефрактометре плазма зондируется двумя волнами с близкими частотами ω_1 и ω_2 , и измеряется набег фазы между двумя волнами при прохождении их через плазму. Формула (1) справедлива в приближении геометрической оптики, при зондировании плазмы микроволнами с частотами выше плазменной (в случае обыкновенной волны). В ДР разность частот выбирается таким образом, чтобы измеряемая разность фаз не превышала 2π , таким образом обеспечивается однозначность измерений плотности.

Аналогичный принцип измерений, но с применением амплитудной модуляции (АМ) и с зондированием микроволнами на необыкновенной волне в области прозрачности плазмы ИТЭР, будет использоваться и на установке ИТЭР [4], на токамаке ТРТ возможно использование ДР схемы с разными зондирующими частотами [5].

Рассчитаны калибровочные кривые рефрактометра (зависимости времени задержки «фазового набега» от среднечордовой плотности плазмы). Приведены первые результаты измерений средней плотности на токамаке Т-11 М в ходе литиевых экспериментов.

Работа проведена в рамках контракта с Госкорпорацией «Росатом» от 14.04.2022 № Н.4к.241.09.22.1061.

Литература

- [1]. Васина Я.А. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, вып. 3, с 65 – 73.
- [2]. Петров В.Г., и др. // ПТЭ, № 2, 2006. С. 99 – 104.
- [3]. Петров В.Г., и др. // Физика плазмы, т. 32, № 4, 2006. С. 346 – 351.
- [4]. Петров В.Г., и др. Расширение возможностей HFS-рефлектометра ИТЭР измерениями в режиме рефрактометра. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLII/E.html#Sekcija%20E_
- [5]. Вершков В.А. и др. Измерения электронной плотности плазмы в рефрактометрии TRT // Физика плазмы, 2022, том 48, № 8, с. 731 – 746.

ЗАЩИТА ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ПОТОКА ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ С ПОМОЩЬЮ НЕОНОВОЙ ГАЗОВОЙ ЗАВЕСЫ

^{1,2}Пушина А.В., ^{1,3}Бурмистров Д.А., ¹Гаврилов В.В., ^{1,2}Лиджигоряев С.Д.,
^{1,2}Позняк И.М., ^{1,2}Топорков Д.А.

¹Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Москва, округ Троицк, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия

³Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.226

Защита материалов от воздействия мощных плазменных потоков представляет несомненный интерес для решения широкого класса фундаментальных и прикладных задач. Так, например, полученные экспериментальные данные могут представлять интерес для разрабатываемой концепции диссипативного дивертора ИТЭР, в рамках которой предполагается, что энергия, поступающая из плазменного шнура в область дивертора, будет рассеиваться в виде излучения инжектируемых примесей, таких как азот или неон [1]. При этом необходимо экспериментально определить эффективность газовой защиты и получить сравнительные данные о том, какая из примесей более предпочтительна [2]. В работе представлены результаты исследования влияния неоновой газовой завесы на экранировку вольфрамовой мишени при воздействии на неё мощного потока водородной плазмы, а также сравнение эффективности азотной [3] и неоновой газовой защиты.

Плазменный поток со скоростью $(4 \div 6) \times 10^7$ см с⁻¹ и энергосодержанием около 50 кДж создавался импульсным электродинамическим ускорителем МК-200 (ГНЦ РФ ТРИНИТИ). В качестве плазмообразующего газа использовался водород. Плазменный поток транспортировался в продольном магнитном поле с индукцией $1 \div 2$ Тл. Сверхзвуковая газовая струя неона направлялась вдоль поверхности вольфрамовой мишени плоским соплом Лавала [3]. Максимальная плотность в газовой завесе достигала 2×10^{17} см⁻³ при толщине ≈ 5 см и ширине ≈ 15 см. Вольфрамовая мишень с размерами 120×140 мм и толщиной 8 мм располагалась на расстоянии 20/40 мм от центральной плоскости газовой завесы в зависимости от условий эксперимента.

Для регистрации пространственного распределения мягкого рентгеновского излучения плазмы, образующейся при взаимодействии водородного плазменного потока с вольфрамовой мишенью и газовой завесой, использовалась многокадровая МКП-камера. Для регистрации спектров излучения плазмы в диапазоне длин волн $1 \div 70$ нм с пространственно-временным разрешением применялся спектрометр с пропускающей дифракционной решеткой. Для измерения поглощенной мишенью энергии и анализа ее распределения по поверхности мишени использовался многоканальный термодарный калориметр. Абсолютная мощность излучения примишенной плазмы измерялась фотодиодами ФДУК-8УВС. Для определения динамики температуры на поверхности мишени использовался инфракрасный пирометр.

Литература

- [1]. Пшенов А.А., Кукушкин А.С., Крашенинников С.И. // Физика плазмы, 2020, т. 46, № 6, с. 483.
- [2]. Pitts R.A. et al. // Nuclear Materials and Energy, 2019, vol. 20, 100696.
- [3]. Лиджигоряев С.Д., Бурмистров Д.А., Гаврилов В.В., Костюшин В.А., Позняк И.М., Пушина А.В., Топорков Д.А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия Термоядерный синтез, 2023, т. 46, № 2, с. 63 – 71.

ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ АТОМОВ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ДЕТЕКТОРОВ

¹Родионов Н.Б., ¹Артемьев К.К., ¹Красильников А.В., ¹Мещанинов С.А.,
¹Родионова В.П., ¹Трапезников А.Г., ²Дравин В.А.

¹Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,

e-mail: n.rodionov@iterrf.ru

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,

e-mail: valeridravin@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.227

Диагностический комплекс токамака с реакторными технологиями (ТРТ) [1] должен обеспечить безопасность работы установки, разработку и оптимизацию плазменных термоядерных технологий квазистационарного разряда плазмы с выходом на термоядерное зажигание, и проводить измерения параметров и характеристик термоядерной плазмы во всем диапазоне их изменения в разрядах ТРТ [2].

Результаты, получаемые из анализа измеренных энергетических спектров высокоэнергичных атомов, покидающих в результате процессов перезарядки плазменный объем, имеют важное значение для изучения поведения быстрых ионов и формирования режимов работы ТРТ.

В данной работе представлен прогресс в разработке системы диагностики высокоэнергичных атомов плазмы ТРТ на основе алмазных спектрометрических детекторов. Уточнены размещение системы в вакуумной камере ТРТ и проведены оценки ожидаемых спектров высокоэнергичных атомов в местах установки детекторов.

Так как плазменный объем термоядерной установки является источником смешанных радиационных полей, а алмазный детектор способен регистрировать все виды ионизирующих излучений, для описываемой системы предложено использовать тонкопленочные (толщина гомоэпитаксиальной пленки 10 – 50 мкм) алмазные структуры, синтез которых выполнен в Частном учреждении «ИТЭР-Центр» [3]. Использование таких структур позволит снизить регистрацию нейтронного и гамма – излучений [4], являющихся фоновыми для описываемой диагностической системы.

Продемонстрирована возможность спектрометрии высокоэнергичных частиц разной массы в диапазоне энергий 75 – 700 кэВ на ускорителе тяжелых ионов в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

Работа выполнена в рамках государственного контракта от 17.04.2023 г. № Н.4к.241.09.23.1059, заключенного между Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» и Частным учреждением «ИТЭР-Центр».

Литература

- [1]. Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г. // Физика плазмы, 2021, Т. 47, С. 970.
- [2]. Кашук Ю.А., Коновалов С.В., Красильников А.В. // Физика плазмы, 2022, Т. 48, С. 1159.
- [3]. Красильников А.В., Родионов Н.Б., Большаков А.П., Ральченко В.Г., Вартапетов С.К., Сизов Ю.Е., Мещанинов С.А., Трапезников А.Г., Родионова В.П., Амосов В.Н., Хмельницкий Р.А., Кириченко А.Н. // Журнал технической физики, 2022, Т. 92, Вып. 4, С. 596 – 603.
- [4]. Родионов Н.Б., Амосов В.Н., Артемьев К.К., Мещанинов С.А., Родионова В.П., Хмельницкий Р.А., Дравин В.А., Большаков А.П., Ральченко В.Г. // Атомная энергия, 2016, Т. 121, Вып. 2, С. 98.

ТРЕБОВАНИЯ К ПОСТАВКЕ ВЕРХНИХ ПАТРУБКОВ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ТОКАМАКА ИТЭР

¹Саврухин П.В., ²Кузьмин Е.Г., ²Кедров И.В., ¹Брыксин Д.А., ¹Кирнев Г.С.

¹Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,

²Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия.

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.228

В соответствии с соглашением с Международной Организацией ИТЭР (МО ИТЭР), Российская Федерация обеспечивает поставку верхних патрубков и верхних уплотнительных фланцев вакуумной камеры реактора ИТЭР. Основным поставщиком изготавливаемого оборудования является АО «НИИЭФА», обеспечивающее весь комплекс опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ, необходимых для поставки патрубков в соответствии со сроками, согласованными МО ИТЭР.

Верхние патрубки ИТЭР представляют собой цельносварную двухслойную оболочку из аустенитной нержавеющей стали с внутренними каналами водяного охлаждения [1]. Из-за присутствия радиоактивных продуктов и конструкции с водяным охлаждением, вакуумная камера ИТЭР, включая патрубки, является оборудованием, важным для безопасности реактора (SIC/PIC) класса 1 и классифицируется Ядерным регулятором Франции (ASN) как ядерное оборудование, работающее под давлением (NPE). Изготовление патрубков осуществляется в соответствии с требованиями системы менеджмента качества (СМК) МО ИТЭР (класс QC-1) и вакуумными требованиями (класс VQC-1A). На всех стадиях жизненного цикла оборудования верхних патрубков выполняются требования безопасности Приказа о ядерном оборудовании, работающем под давлением (ESPN). Проектирование, изготовление и испытания элементов патрубков проводятся в соответствии с кодами и правилами RCC-MR 2007 [2]. Контроль соответствия требованиям безопасности на всех этапах изготовления патрубков (от проектирования до финальной приемки) осуществляется Частным учреждением ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», МО ИТЭР, а также независимым Согласованным Нотифицированным Органом (СНО АНБ «Винкоте»).

В качестве основных конструкционных материалов элементов верхних патрубков, по результатам всесторонних НИОКР, выполненных при участии АО «НИИЭФА», определены специальные аустенитные стали 316L(N)-IG и 304L, изготавливаемые по спецификациям МО ИТЭР. Изготовление и поставка материалов, используемых для патрубков, и изготовление патрубков представляют собой сложный технологический процесс, и производятся в несколько этапов, в соответствии с Планами изготовления и контроля (MIP), под надзором «Проектного центра ИТЭР», МО ИТЭР, СНО АНБ Винкоте и Ядерного регулятора Франции. Проверка всех технологических процедур, применяемых в процессе изготовления материалов и патрубков, проводится как до начала процесса изготовления, так и по окончании производства, на основе Отчетов по окончании производства (EMR) и Процедур технической приемки (FAT) на площадках заводов изготовителей.

Транспортировка изготовленных патрубков осуществляется Частным учреждением ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», в соответствии с Планами перевозки (TP) под контролем МО ИТЭР и СНО АНБ Винкоте. Окончательная приемка изготовленного оборудования (SAT) осуществляется на площадках сборки секторов вакуумной камеры ИТЭР в Корею и Италию и на площадке сборки вакуумной камеры МО ИТЭР.

В настоящий момент завершено изготовление всех верхних патрубков вакуумной камеры ИТЭР и продолжаются работы по изготовлению уплотнительных фланцев.

Литература

- [1]. Yuri Utin, Alexander Alekseev, Carlo Sborchia et. al. Fusion Engineering and Design, V. 98–99, October 2015, p. 1643–1647.
- [2]. RCC-MR 2007 Design and Construction Rules for Mechanical components of nuclear installations edited by AFCEN, <http://afcenc.com/en/publications/rcc-mrx/69/rcc-mr-2007>.

СВОЙСТВА КЕРАМИКИ КАРБИДА БОРА, СЕРИЙНО ПОСТАВЛЯЕМОЙ В ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПОРТЫ ИТЭР ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ ЗАЩИТЫ

^{1,2,4}Шошин А.А., ^{1,4}Бурдаков А.В., ¹Иванцовский М.В., ^{1,2,4}Полосаткин С.В.,
^{1,2}Суляев Ю.С., ^{1,4}Семенов А.М., ¹Гавриленко Д.Е., ^{1,2}Таскаев С.Ю.,
^{1,2}Касатов Д.А., ³Овсиенко А.И., ³Румянцев В.И., ⁵Кравцов Д.Э., ⁵Сорокина Н.В.

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: shoshin@inp.nsk.su

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³ООО Вириал, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

⁵Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.229

Для обеспечения эффективной внутривакуумной нейтронной защиты в портах строящегося во Франции экспериментального термоядерного реактора ИТЭР было предложено использовать керамику карбида бора (B_4C). При жестком ограничении на массу порт-плаггов и требуемого уровня радиационной защиты, керамика карбида бора имеет преимущество благодаря низкой плотности и эффективному поглощению как быстрых, так и медленных нейтронов.

Были проведены тесты различных видов керамики B_4C нескольких российских производителей, чтобы подтвердить соответствие керамики жестким требованиям Организации ИТЭР к материалам в вакуумной камере реактора.

Были проведены активационные тесты керамики с использованием как медленных, так и быстрых нейтронов, которые генерировались на тандем-ускорителе для бор-нейтронозахватной терапии рака в ИЯФ СО РАН [1]. Также керамика была подвергнута длительному воздействию быстрых нейтронов с флюенсом 10^{14} нейтронов/см² для изучения деградации механических свойств и демонстрации устойчивости к растрескиванию.

По результатам тестов сделан вывод об удовлетворении спеченной керамики карбида бора всем требованиям ИТЭР, и начато её серийное производство на ООО Вириал.

Производство керамики должно соответствовать утвержденной Организацией ИТЭР спецификации на изготовление керамики ITER_D_457ТВН и чертежам ITER_D_X2GWTZ.

Проведены тесты свойств серийно поставляемой для экваториально порта №11 и верхнего порта №7 керамики карбида бора, которые показали ее соответствие предъявляемым требованиям.

Литература

- [1]. A. Shoshin, A. Burdakov, M. Ivantsivskiy et al., Test results of boron carbide ceramics for ITER port protection // Fusion Engineering and Design, 168 (2021).

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ТРЕБОВАНИЙ К УПРАВЛЕНИЮ ДОКУМЕНТАЦИЕЙ И ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ИЗДЕЛИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК КЛАССА МЕГАСАЙЕНС

Смирнов П.В., Кадыргулов А.А., Каклюгина Н.А., Курганов В.Е., Пташкина А.Н., Семенов Е.В., Сульдин В.А., Портоне С.С.

Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.230

Системы управления жизненным циклом продукта и всей документацией (PLM) применяются для управления современными проектами, имеющими разветвлённую структуру работ. Эти системы позволяют хранить документацию и управлять ею в единой среде, создавать общую глубоко интегрированную цифровую модель проекта и осуществлять планирование и контроль работ.

В настоящий момент поставщики организации ИТЭР используют различные программные продукты для выполнения конструкторских работ. При этом нормативная база, а также среда хранения документации, оказались не готовы к обработке всех данных. Изначальное отсутствие единого решения по хранению и управлению документацией привело к использованию набора различных баз данных, информацию из которых довольно трудно собрать в едином ключе. В работе показаны текущее положение дел в проекте ИТЭР в контексте управления данными и рассмотрены вопросы, касающиеся будущих российских проектов строительства термоядерных установок.

Одной из задач являлся анализ доступных на настоящий момент отечественных PLM-решений, способных решить вопросы управления консолидированной информацией. Ключевыми требованиями к единой PLM системе для проектов установок класса мегасайенс на данный момент являются:

- создание единой базы конструкторских и инженерных документов с поддержкой связей между документами и реализацией единого жизненного цикла изделия с возможностью проведения всех процедур;
- создание структур разбивки проекта (структура требований, функциональная, геометрическая, зональная, структура работ и т.д.);
- осуществление работы с данными различных САПР, возможности интеграции с ними;
- создание единой цифровой модели установки и быстрый доступ к текущему состоянию проектирования установки для отслеживания выполнения планов;
- управление проектом на основе требований, что обеспечивает уменьшение количества ошибок и незапланированных изменений, декомпозиция технического задания в систему требований;
- введение единых правил и требований к разработке, хранению и управлению конструкторской и инженерной документацией в проекте.

Учитывая опыт ИТЭР, авторы работы уверены в том, что система PLM, способная обеспечить управление проектом в полном объёме, должна быть внедрена на его начальной стадии.

Работа выполнена в рамках государственного контракта с Госкорпорацией «Росатом» от 22.03.2023 № Н.4к.241.09.23.1036 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в Российской Федерации. Этап 2023 – 2024 годов».

ФИНАЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ОПОРНЫХ РАМ ВЕРХНИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПОРТОВ 02 И 08 УСТАНОВКИ ИТЭР

^{1,4}Соломатин Б.Н., ^{1,4}Бурдаков А.В., ³Буслаков И.В., ²Высоких Ю.Г.,
¹Гавриленко Д.Е., ^{1,5}Грищенко А.М., ¹Иванцовский М.В., ²Кравцов Д.Э.,
³Логинов И.Н., ³Модестов В.С., ²Портнов Д.В., ¹Селезнев П.А., ¹Серемин В.В.,
²Сорокина Н.В., ¹Суляев Ю.С., ¹Шабунин Е.В., ³Шагниев О.Б., ¹Шиянков С.В.,
^{1,4}Шошин А.А.

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: B.N.Solomatin@inp.nsk.su

²Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: d.kravtsov@iterrf.ru

³Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vmodestov@spbstu.ru

⁴Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: a.a.shoshin@inp.nsk.su

⁵Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: a.v.burdakov@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.231

За 2024 год был достигнут большой прогресс в разработке финальных проектов устройств для размещения диагностического оборудования в верхних портах №02 и №08 установки ИТЭР. Диагностические порты являются составляющими строящегося крупнейшего в мире термоядерного реактора, аналогов которого не существует, следовательно, они станут уникальной разработкой, впервые создаваемой для жестких эксплуатационных условий.

Все вакуумные опорные рамы в диагностических портах ИТЭР являются главной конструкцией, обеспечивающей доставку и удержание диагностик в порт-камере установки. Около портовая опорная рама обеспечивает крепление передней части диагностик непосредственно около вакуумной камеры и отвечает за точность позиционирования диагностик относительно окон вакуумной камеры. С другой стороны, на опорной раме около портового пространства располагается биологическая защита, обеспечивающая снижение дозы наведенной радиации в порт-камере до требуемого уровня. Опорная рама порт-камеры устанавливается независимо от опорной рамы около портового пространства и обеспечивает точность их взаимного позиционирования. На опорной раме порт-камеры располагается регистрирующая аппаратура диагностик с радиационной защитой, обеспечивающей уменьшения уровня радиации до уровня, требуемого для стабильной работы электронной аппаратуры.

На этапе разработки 2024 года были выполнены следующие работы:

- доработаны трехмерные модели опорных рам в около портовом пространстве и опорных рам в порт-камере для верхних портов № 02 и № 08;
- проведены нейтронные расчеты для оценки остаточной дозы наведенной радиации;
- проведен расчет стрессов, возникающих в конструкции под действием механических и сейсмических нагрузок;
- подготовлен пакет документов для защиты финального проекта конструкций опорных рам.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МОЩНОГО ИСТОЧНИКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В РЕЖИМЕ ДЛИТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Сотников О.З., Бельченко Ю.И., Гаврисенко Д.Ю., Горбовский А.И., Санин А.Л.,
Шиховцев И.В.

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: O.Z.Sotnikov@inp.nsk.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.232

В рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера разрабатывается атомарный инжектор мегаэлектронвольтового диапазона энергий для нагрева плазмы, основанный на ускорении и нейтрализации пучка отрицательных ионов водорода. В инжекторе использован многоапертурный источник с генерацией плазмы высокочастотным разрядом и поверхностно-плазменным механизмом генерации отрицательных ионов водорода [1].

В докладе описываются результаты проведенных в 2023 г. работ по модернизации источника и его систем питания для получения пучка отрицательных ионов с энергией более 100 кэВ, током более 1 А и длительностью импульса до 20 с. Проведены испытания различных защитных экранов высокочастотного драйвера источника [2], исследованы их тепловые режимы и условия стабильной (без срывов в дуговой разряд) работы ВЧ разрядов мощностью до 65 кВт. Приводятся экспериментальные данные по эффективности получения пучка отрицательных ионов водорода и зависимости характеристик пучка от мощности, вкладываемой в ВЧ драйвер для различных напряжений на электродах ионно-оптической системы.

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Литература

- [1]. O. Sotnikov, A. Ivanov, Yu. Belchenko, A. Gorbovsky, P. Deichuli, A. Dranichnikov, I. Emelev, V. Kolmogorov, A. Kondakov, A. Sanin and I. Shikhovtsev, Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices // Nuclear Fusion, 2021, 61, 116017.
- [2]. Д.Ю. Гаврисенко, И.В. Шиховцев, Ю.И. Бельченко, А.И. Горбовский, А.А. Кондаков, О.З. Сотников, А.Л. Санин, В.А. Воинцев, Р.А. Финашин, Сравнительный анализ высокочастотных плазменных драйверов с различными защитными экранами для атомарных инжекторов с многосекундной длительностью импульса // Физика плазмы, 2023, 49, 964 – 974.

СТАТУС ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОЕКТА ИТЭР

¹Устинов А.Л., ²Денисов Г.Г., ²Еремеев А.Г., ¹Красильников А.В., ³Попов Л.Г.,
³Тай Е.М., ²Фокин А.П.

¹ Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, e-mail: a.ustinov@iterrf.ru

²Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия, e-mail:
aeremeev@ipfran.ru

³НПП ГИКОМ, г. Нижний Новгород, Россия, e-mail: tai@gyscom-nn.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.233

Электронно-циклотронная система наряду с ионно-циклотронной и нейтральными пучками входит в число систем дополнительного нагрева проекта ИТЭР. В проекте было запланировано использовать 24 гиротрона с выходной мощностью около 1 МВт каждый, два блока ионно-циклотронного нагрева по 20 МВт и два источника нейтральных пучков по 16 МВт с энергией атомов до 1 МэВ. Все системы считались перспективными не только для нагрева компонент плазмы, но и для генерации или поддержания тороидального тока. Для электронно-циклотронной системы (ЭЦ) ставились дополнительные функции по пробою и стартовому формированию плазмы, а также подавлению МГД неустойчивостей, что предполагало использования гиротронов в частотном режиме до 5 кГц. Необходимо отметить, что упомянутые перспективы были связаны с ожиданиями успешного развития образцов техники для всех трех методов и возможности их применения для целей термоядерной плазмы. Однако, к настоящему моменту из всех методов только гиротроны достигли запланированных параметров. Поэтому, а также в связи с изменением материала первой стенки реактора на вольфрам планируется увеличить мощность гиротронного комплекса в 2 раза к первому этапу работы ИТЭР (Augmented First Plasma) и далее к следующей фазе(DT1) довести общее количество гиротронов до 72. Электронно-циклотронная система функционально состоит из высоковольтных источников (HVPS), гиротронов удаленных на расстояние более 100 м в область слабых рассеянных полей токамака, линий передачи (TL) и формирователей излучения(Launcher Equatorial, Upper), расположенных в экваториальном и верхних патрубках токамака. Высоковольтные источники и гиротронные комплексы с системой управления расположены в здании В15, линии передачи проходят по зданию 13, примыкающему к зданию токамака В11. Высоковольтные источники, каждый на 2 гиротрона (с выходной мощностью до 6 МВт) находятся в ответственности Европы и Индии в равных долях. Поставка гиротронов, которая включает установку и настройку оборудования, распределена между Японией – 8 шт., РФ – 8 шт., Европой – 6 шт. и Индией – 2шт. Линию передачи в сборочных элементах готовит США. Формирователи излучения в плазму в ответственности Европы. Вся инфраструктура комплекса находится в ответственности Европы. В 2024 г. планируется начать монтаж основного оборудования ЭЦ системы. Приведем основные технические характеристики гиротронов производства НПП ГИКОМ: мощность на выходе алмазного окна не менее 1 МВт, частота 170 ГГц, к.п.д. не менее 50% (реально до 57%), содержание моды HE11 на входе в линию передачи не менее 95%, длительность импульса не менее 1000 с с надежностью более 95% и др.

Работа выполнена на средства Госконтрактов ГК Росатом.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ, ИСПЫТАНИЯ И ПОСТАВКА КАТУШКИ ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ ПФ1 ДЛЯ ПРОЕКТА ИТЭР

¹Устинов А.Л., ²Бурсииков А.С., ³Вадатурский В.В., ²Медников А.А.,
¹Красильников А.В., ²Родин И.Ю.

¹Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, г. Москва, Россия,
e-mail: a.ustinov@iterrf.ru

²Акционерное общество "НИИЭФА им. Д.В. Ефремова", г. Санкт-Петербург, Россия

³Акционерное общество "СНСЗ", г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.234

Сверхпроводниковая электромагнитная система (ЭМС) установки ИТЭР состоит из центрального соленоида, 18 тороидальных, 6 полоидальных и 18 корректирующих катушек. Конструкция и подходы к изготовлению полоидальных катушек разработаны международной организацией (МО) ИТЭР. Обмотка изготовлена из Nb-Ti обмоточных проводов типа «кабель в оболочке» с циркуляционным охлаждением. Силовая оболочка проводов квадратного сечения изготовлена из аустенитной нержавеющей стали 316LN. Катушки ПФ2-ПФ5 изготовлены и поставлены европейским агентством ИТЭР (F4E). Для их изготовления на площадке строительства ИТЭР во Франции было построено здание B55 с набором технологического оборудования. Катушка ПФ6 изготовлена в Китае.

За изготовление и поставку катушки ПФ1 отвечала РФ. Соглашение о поставке с МО ИТЭР было подписано в марте 2011 года. Требования качества предусматривали квалификацию используемых материалов, технологий и персонала с изготовлением и испытанием большого числа образцов и макетов, а также испытания критических узлов и катушки ПФ1 в сборе. Наряду с методами неразрушающего контроля, таких как ультразвук, рентген, испытания на герметичность и др., применялись методы разрушающего контроля квалификационных образцов сварных соединений и изоляции после вакуумно-нагнетательной пропитки (ВНП).

Катушка ПФ1 состоит из 8 двухслойных галет, изготовленных методом двухзаходной намотки [1]. Каждая галета содержит 2 намоточные длины обмоточного сверхпроводника по 400 метров каждая. Всего использовано 16 длин. Для комплексной квалификации технологий была изготовлена макетная галета из проводов с кабелями из медной проволоки. Провода изготовлены кооперацией Российских и Европейских организаций.

Посередине каждой намоточной длины сварены вводы гелия, используемого для криогенного обеспечения катушки. Многослойная витковая электроизоляция галет из стекло- и полиимидной лент накладывалась в процессе намотки. Намотка и изолирование галет производились в помещении 8-го класса чистоты. Изоляция галет усилена посредством ВНП эпоксидной смолой горячего отверждения. Пропитанные галеты укладывались в стопку через прокладки из стеклоткани. На стопку галет накладывалась многослойная корпусная изоляция из стеклоткани. Для соединения в обмотку выводные концы галет оснащались концевыми конструкциями - короб с крышкой, изготовленными из биметаллической плиты медь-нержавеющая сталь. Разделанные концы сверхпроводящих кабелей каждой галеты запаены в коробка и образуют полуконтакты, герметичность которых обеспечена приваркой крышек. В коробка герметично сварены трубки контура гелиевого охлаждения. Полуконтакты соседних галет объединены в низкоомные электрические контакты. Всего в катушке ПФ1 8 внутригалетных и 7 межгалетных электрических контакта, а также 2 терминальных полуконтакта для соединения с фидерами питания. Входные и выходные гелиевые трубки контактов через высоковольтные развязки объединены во входной и выходной коллекторы. Корпусная изоляция обмотки ПФ1 усилена ВНП эпоксидной смолой горячего отверждения. Высоковольтная прочность обмотки квалифицирована испытаниями по кривой Пашена [2].

Литература

- [1]. Mednikov A.A. et al., Experience in PF1 dummy pancake manufacturing on the mobile facility for winding and VPI of large-scale superconductive magnets // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016. V. 26. № 4. p. 7400977.
- [2]. Ilin Y. et al., Completion and Factory Acceptance Test of ITER PF1 Coil – MT-28 conference.

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СРЕДНЕХОРДОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В ДИАГНОСТИКЕ РЕФРАКТОМЕТРИЯ ИТЭР

^{1,2,3}Владимиров И.А., ^{1,3}Шелухин Д.А., ⁴Демедецкая Я.А., ^{1,3}Вершков В.А.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Москва, Россия

³Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез – международные проекты», г. Москва, Россия,

⁴Союз Купера по развитию науки и искусства, Нью-Йорк, США

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.235

Одной из основных диагностических задач, стоящих перед системой “Рефлектометрия со стороны сильного поля ИТЭР” (55.F9), является оценка среднечордовой электронной плотности. Для решения этой задачи в диагностику был добавлен дополнительный канал рефлектометрии, расположенный в экваториальном порту (EP#08) напротив антенных систем рефлектометра на стороне сильного поля [1]. Основной физический принцип рефлектометрии сходен с интерферометрией [2]. Зондирование плазмы будет производиться с использованием необыкновенной волны (X-волны) в окне прозрачности между частотами нижней отсечки X-волны и циклотронной частотой. Близость рабочих частот к границам области прозрачности не позволяет прибегнуть к известному в интерферометрии выражению, связывающему набег фазы прошедшей волны со среднечордовой плотностью. Зависимость показателя диэлектрической проницаемости от локальных значений параметров плазмы не позволяют использовать для интерпретации данных диагностики аналитические соотношения. В данной работе был предложен алгоритм восстановления среднечордовой электронной плотности для рефлектометрической диагностики ИТЭР с использованием нейронных сетей. Для решения задачи использовались расчеты измеряемых параметров с помощью синтетической диагностики в ожидаемых сценариях ИТЭР с тороидальным полем 5,3 Тл [3, 4]. На основе полученных значений была построена база данных и проведено обучение нейронной сети. Так как и измеряемые величины (время распространения сигнала по плазме) и параметр плазмы (интегральная плотность) являются интегральными параметрами, можно ожидать, что подход на основе нейронных сетей может обеспечить требуемую ИТЭР точность измерений.

В ходе анализа было показано, что для целевых разрядов максимальная и среднеквадратичная ошибки не превышают 1% на квазистационарной стадии разряда (в области значений тока плазмы, составляющих 90% максимального тока). Время работы алгоритма в среднем составляет около 150 нс, что существенно меньше требуемого времени реакции диагностики при измерениях в режиме реального времени (1 мс). Предлагаемый подход на основе нейронных сетей допускает дальнейшее совершенствование путем обучения на основе реальных данных, полученным во время разрядов на установке ИТЭР, что повышает их адаптивность и точность. Разработанные подходы могут быть использованы для решения задач, связанных с рефлектометрической диагностикой на установках нового поколения.

Данная работа выполнена в рамках работ по госконтрактам № Н.4а.241.19.23.1014 и 17706413348230000070/12-23/01. Все работы по диагностике Рефлектометрия со стороны сильного поля ИТЭР выполнены по заказу Росатома.

Литература

- [1]. Вершков В.А., Солдатов С.В., Шелухин Д.А., Уразбаев А.О., ПТЭ. 2004. № 2. с. 54.
- [2]. Petrov A.A. & Petrov V.G. (2003). Time-of-flight refractometry for robust line integral electron density measurements and control in ITER. // Rev. Sci. Instrum, 74 (3), 1465–1468.
- [3]. Casper T., Gribov Y., Kavin A., Lukash V. et al. “Development of the ITER baseline inductive scenario” // Nucl. Fusion 54 (2014) 013005 (9pp).
- [4]. Kim S., Data and information associated with Corsica plasma scenarios, ITER IDM UID R4FT8D, 2017.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ ФАЗЫ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ

Змитренко Н.В.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,

e-mail: zmitrenko@imamod.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.236

Современные физические установки управляемого термоядерного синтеза, а также ускорительные системы во многом основываются на использовании «холодных» обмоток для создания сильного магнитного поля. Такие катушки, изготовленные из сверхпроводящих материалов, и, в особенности, из высокотемпературных их модификаций, представляют собой основу устройств, обеспечивающих создание магнитного поля в системах термоядерного синтеза (ИТЭР) или в ускорительных системах (БАК). Надёжность таких систем напрямую зависит от применяемых материалов и качества изготовления сверхпроводящих кабелей. Нарушение условий транспортировки тока (превышение критических значений тока, магнитного поля или температуры) влечёт за собой в таком участке кабеля прекращение сверхпроводящего режима и возникновение нормальной, омической фазы прохождения тока. При этом выделяемое тепло может привести к сгоранию этой части кабеля и выходу из строя всей системы. В данной работе численно анализируются режимы этого «аварийного» перехода сверхпроводящего состояния проводника в нормальное. Предложена математическая модель описания такого процесса. В практически важных случаях температура растёт в этих случаях в режиме с обострением. Принципиальным является вопрос – при каких параметрах и свойствах материалов этот режим будет сопровождаться локализацией тепла (тогда это приведёт к разрушению проводника), а при каких нормальная фаза будет распространяться по длине проводника, не приводя к критическому увеличению температуры.

FINAL DESIGN CHALLENGES OF THE ITER DIVERTOR NEUTRON FLUX MONITOR

¹Кормилицын Т.М., ¹Обудовский С.Ю., ¹Кашук Ю.А., ¹Юхнов Н.М.,
¹Воробьев В.А., ¹Джурик А.С., ¹Панкратенко А.В., ¹Фридрихсен Д.С.,
¹Степанов С.Б., ¹Портнов Д.В., ²Гавриленко Д. Е., ²Иванцовский М.В.,
²Бурдаков А.В., ³Мартазов Е.С., ³Парышкин Ю.А., ³Федоров В.А.

¹Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, t.kormilitsyn@iterrf.ru

²Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.237

В работе обсуждается прогресс в разработке диагностики Диверторный Монитор Нейтронного Потока (ДМНП, англ. - Divertor Neutron Flux Monitor – DNFM) ИТЭР. Концепция диагностики полного выхода быстрых нейтронов и термоядерной мощности токамака ИТЭР основана на необходимости проведения измерений с беспрецедентным динамическим диапазоном, временным разрешением и точностью. Для этого в качестве основного конструктивного решения было предложено использовать 3 идентичные (дублирующие) подсистемы, каждая из которых состоит из 6 независимых секций камеры деления с варьируемым количеством и изотопным составом делящегося материала. ДМНП – один из ключевых компонентов комплекса нейтронной диагностики ИТЭР, который должен быть абсолютно калиброван. Калибровка ключевых нейтронных диагностик планируется к осуществлению путём размещения источника быстрых нейтронов внутри вакуумной камеры после сборки токамака.

В докладе представлен обзор текущего этапа проектирования и обоснование технических решений, принятых для этой диагностики. Анализ структурной целостности подтверждает соответствие ДМНП суровым условиям вакуумной камеры ИТЭР, включая сейсмические, тепловые, электромагнитные и радиационные нагрузки. Особое место в этом обзоре занимает система сбора данных ДМНП и аспекты ее интеграции с CODAS. Сигналы каждой камеры деления измеряются несколькими трактами с целью значительного расширения динамического диапазона измерений, что также повышает надежность и отказоустойчивость диагностики. Также обсуждаются аспекты радиационной устойчивости электроники, расположенной в порт-камерах ИТЭР. Стратегия многоступенчатой калибровки, предусмотренная для диагностики ДМНП, включает определение характеристик коммерчески-доступных ИКД в условиях облучения быстрыми DD и DT нейтронами, заводскую калибровку детекторных узлов и, наконец, определение характеристик на площадке токамака после сборки.

Проект ДМНП приближается к стадии производства, и текущая работа обобщает основные вызовы и пути их преодоления для устойчивой работы этой диагностики по определению термоядерной мощности токамака-реактора ИТЭР.

Работа выполнена в рамках государственного контракта №Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 года на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

ДОКЛАДЫ ПОСТДЕДЛАЙН

POSTDEADLINE PAPERS

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВЫХ РАВНОВЕСНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ И СЦЕНАРИЯ ДЛЯ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД С ПОМОЩЬЮ КОДА TOKSCEN

^{1,2}Сычугов Д.Ю., ¹Рыжаков Д.В., ¹Андреев В.Ф., ¹Балашов А.Ю., ¹Горбунов А.В.,
^{1,3}Кирнева Н.А., ¹Кислов Д.А., ¹Ноткин Г.Е., ¹Сушков А.В., ¹Тарасян К.Н.,
¹Шелухин Д.А., ¹Хайрутдинов Э.Н.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
e-mail: sychugov@cs.msu.ru

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.238

К концу 2023 г. в рамках энергетического пуска на термоядерной установке токамак Т-15МД (Россия, НИЦ «Курчатовский институт») [1] проведены две экспериментальные кампании. Для получения равновесных магнитных конфигураций и обеспечения устойчивых сценариев разряда была проведена серия расчетов по коду TOKSEN.

Основной задачей осенней кампании было получение разряда с током плазмы в диапазоне сотен килоампер. Для этого предварительно был проведен численный анализ разрядов весенней пуско-наладочной кампании. На основании моделирования разрядов с неустойчивым равновесием плазмы по вертикали [2] получены соотношения для токов в секциях индуктора CS1, CS2 и CS3 и управляющих обмотках PF2-PF5, позволяющие обеспечить устойчивость плазмы по вертикали при использовании различных комбинаций токов в секциях индуктора и полоидальных обмотках. Расчеты проведены с учетом актуальных ограничений на токи в обмотках управления. Была проанализирована чувствительность результатов численных расчетов к положению плазменного шнура и внутренней индуктивности плазмы, которые являются входными параметрами при решении задачи равновесия. Показано, что изменение внутренней индуктивности плазмы для скинированного и пикированного распределения тока слабо влияет на токи в обмотках.

В результате моделирования отработана методология формирования устойчивого по вертикали плазменного шнура, сценария роста тока плазмы, контроля расстояния между шнуром и стенками вакуумной камеры и управления его перемещениями. Показано, что для обеспечения устойчивости плазмы по вертикали в течение всей длительности импульса, необходимо обеспечить выполнение соотношения $(I(PF3) + I(PF4))/(I(PF2) + I(PF5)) > 2$ на всей стадии разряда ($I(PF2)$ - $I(PF5)$ – токи в соответствующих обмотках управления). При получении разрядов с током плазмы >100 кА и длительностью 600 мс и больше необходимо было обеспечить оптимальное положение плазменного шнура по горизонтали, чтобы уменьшить взаимодействие плазмы со стенкой на стороне сильного магнитного поля. В результате расчетов получены соотношения токов, позволившие решить все поставленные задачи в ходе экспериментов.

В данной работе приводятся результаты сравнения экспериментов с расчетами, в том числе с теми, которые были сделаны заранее и носили характер прогноза. Работы велись как на стадиях подготовки, так и при реализации экспериментов, что позволило оперативно корректировать сценарии разряда с учетом текущей экспериментальной информации. Был получен большой опыт отработки и реализации сценариев разрядов на токамаке Т-15МД.

Работа проведена в рамках выполнения Государственного задания НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Khvostenko P.P. et al. Current status of tokamak T-15MD // Fusion Engineering and Design. 2021. Т. 164. С. 112211.
- [2]. Сычугов Д.Ю. и др. // Труды факультета вычислительной математики и кибернетики им. М.В. Ломоносова, т.75, с. 2 – 20. Изд. МАКС Пресс Москва, 2023.

АНАЛИЗ СПЕКТРОВ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД НА СТАДИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПУСКА

¹Рыжаков Д.В., ¹Шестаков Е.А., ^{1,2}Идеал Р.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Ryzhakov_DV@nrcki.ru

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.239

Спектрометрия мягкого рентгеновского излучения на токамаке используется для анализа функции распределения электронов в плазме, определения состава и количества тяжелых примесей, определения электронной температуры и ее профиля.

В ходе первых экспериментов на токамаке Т-15МД [1] осенью 2023 года были получены первые результаты измерений спектральной плотности интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Измерения проводились с помощью многоканального спектрометра мягкого рентгеновского излучения (МСМР) на базе Si(Li) детектора в диапазоне энергий излучения 2 – 20 кэВ [2]. Спектрометр располагается в экваториальной плоскости токамака, при этом хорда наблюдения детектора проходит в горизонтальном направлении под углом 7,5° через центр вакуумной камеры.

Основной особенностью разрядов токамака Т-15МД во время энергетического пуска является использование СВЧ излучения как для инициализации пробоя, так и для нагрева плазмы. Из анализа полученных спектров следует, что в плазменных разрядах функция распределения электронов плазмы по скоростям не может быть описана только максвелловской функцией распределения. Как правило, форма спектра позволяет предполагать максвелловское распределение электронов плазмы по скоростям с некоторой долей надтепловых электронов. В разрядах, где тепловая компонента спектра может быть надежно отделена от надтеплого спектра, электронная температура плазмы составляет 1,5 – 3,5 кэВ в зависимости от условий и стадии разряд. Анализ надтепловой части излучения говорит о развитии пучков ускоренных электронов, что дополнительно подтверждается измерениями надтеплого и жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 30 кэВ – 10 МэВ [3].

Так же показано присутствие в спектре характеристических линий тяжелых примесей, соответствующих линиям аргона (после подготовки камеры тлеющим разрядом в аргоне) и компонентам нержавеющей стали – марганец, хром, ванадий и железо, что свидетельствует об интенсивном взаимодействии плазмы и ускоренных электронов с внутрикамерными компонентами.

Литература

- [1]. Хвостенко П.П. и др. Экспериментальная установка токамак Т-15МД // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1, с. 15 – 38.
- [2]. Трухин В.М. и др. Цифровая обработка сигналов полупроводникового рентгеновского детектора // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 1 с. 78 – 85.
- [3]. Шестаков Е.А и др. Диагностика надтеплого и жесткого рентгеновского излучения на токамаке Т-15МД. — В сб.: XX Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы». Сочи, 2023.

ПЕРВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПЛОТНОСТИ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-15МД

¹Асадулин Г.М., ¹Бельбас И.С., ¹Горшков А.В., ^{1,2}Панфилов Д.С.,
¹Толпегина Ю.И.

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.240

В 2023 году на токамаке Т-15МД была введена в действие тангенциальная система томсоновского рассеяния [1]. Основу новой диагностической системы (ТР) составляет 100-Гц Nd:YAG лазер, выдающий в импульсе до 3 Дж энергии на первой гармонике, $\lambda = 1064$ нм. Лазер позволяет проводить измерения на протяжении всего плазменного разряда, при его длительности до 10 секунд, с временным интервалом в 10 мс. Лазерное излучение вводится в камеру токамака в экваториальной плоскости. Система сбора рассеянного излучения расположена в экваториальном патрубке установки. Рассеянный свет собирается под углами от 11 до 56 градусов в зависимости от пространственной точки. В основе системы регистрации лежат полихроматоры на интерференционных фильтрах [2], ранее проходившие испытания [3] в составе диагностики томсоновского рассеяния токамака Т-10 [4]. Система регистрации состоит из 10 полихроматоров, которые позволяют проводить измерения в 10 пространственных точках от внутренней до внешней периферии плазмы.

В работе представлены первые результаты измерений электронной температуры и плотности. Профили температуры и плотности зарегистрированы по 6 пространственным каналам от $R = 0,81$ м до $R = 2$ м. В области $R > 2$ м, вероятно, параметры плазмы находились за пределами измеримого диагностикой диапазона. В импульсе с рекордной длительностью 2 с диагностика обеспечивала измерения в течение всего разряда. Показано, что в этом импульсе при токе плазмы в 190 кА и мощности дополнительного СВЧ нагрева в 1 МВт на квазистационарной стадии разряда температура плазмы достигала 2,5 кэВ.

Литература

- [1]. Асадулин Г.М., Бельбас И.С., Горшков А.В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 2.
- [2]. Kurskiev G.S. et al. // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, 2020, Volume 963, 163734.
- [3]. Асадулин Г.М. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 1.
- [4]. Asadulin G.M., Bel'bas I.S., Gorshkov A.V. // Fusion Eng. and Design. 2022. V. 177. 113066.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА ТОКАМАКЕ T-15МД

¹Сарычев Д.В., ¹Соловьев Н.А., ¹Диас-Михайлова Д.Е., ¹Плоскирев Е.Г.,
²Орловский Д.А., ¹Сергеев Д.С.

¹Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, г. Москва, Россия,
e-mail: dmvsar@yandex.ru

²Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.241

В качестве датчиков радиационных потерь (РП) на токамаке T-15МД используются тепловые пироэлектрические детекторы (характеризуются постоянством чувствительности во всех спектральных диапазонах, но при этом относительно малым отношением «сигнал-шум» и невысоким быстродействием) [1, 2], а также полупроводниковые фотодиоды AXUV (Absolute eXtreme Ultra Violet), обладающие высокими быстродействием и чувствительностью, но имеющие заметную неоднородность на кривой спектральной чувствительности в существенном для излучения в токамаке диапазоне энергий квантов $\sim 7 - 100$ эВ. В пусковую кампанию на T-15МД были установлены две оборудованные детекторами обоих типов камеры-обскуры, наблюдающие плазму в полоидальных сечениях – одна из точки в экваториальной плоскости в сечении, близком к лимитерам, и вторая с наклоненного под 55° к экватору направления в удаленном от лимитеров сечении.

Следует отметить, что в использованном в ходе пусковой кампании режиме пробоя и поддержания плазмы с помощью гиротрона, несмотря на наличие сетки для защиты от СВЧ излучения, для пиродетекторов экваториальной системы сигнал от излучения гиротрона всегда значительно превышал ожидаемый сигнал РП плазмы. В то же время оказалось возможным использовать сигналы этих детекторов в качестве монитора эволюции доли непоглощенной плазмой СВЧ мощности. При этом для наклонной системы, где использовались две защитные сетки, в разрядах с существенным поглощением плазмой СВЧ мощности и достаточно высоким уровнем РП удалось получить профили излучения плазмы по данным пиродетекторов. Для детекторов AXUV влияние СВЧ излучения на сигналы оказалось несущественным.

В докладе анализируется зависимость полученных профилей РП плазмы от режима разряда (с высоким/ низким поглощением СВЧ мощности), временная эволюция профилей РП в ходе разряда, соотношение РП в сечениях вблизи и вдали от лимитеров. Приведены оценки значения полной мощности РП плазмы по данным детекторов двух типов.

Литература

- [1]. А.Г. Алексеев, В.В. Забродский, Д.В. Сарычев, Н.А. Соловьев, А.В. Сушков // Физика плазмы, 2022, том 48 № 12, с. 1–10.
- [2]. V.A. Vershkov, D.V. Sarychev, G.E. Notkin et al. // Nucl. Fusion, 2017, 57, 102017.

СТРУКТУРА И ВОЗМОЖНОСТИ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

¹Капралов В.Г., ²Дремин М.М., ²Крылов С.В., ¹Сергеев В.Ю., ²Трубников А.С.

¹*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: v.kapralov@spbstu.ru*

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Dremin_MM@nrcki.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.242

Системы инжекции газовых струй и макрочастиц используются для проведения исследований практически на всех современных установках с горячей плазмой. Они позволяют решать технологические задачи и выполнять диагностические исследования [1, 2]. В докладе рассматривается инжекционный комплекс, разработанный в СПбПУ, структура и основные возможности составляющих его систем.

Инжекционный комплекс включает аппаратуру для различных вариантов инжекции газа: стационарный газовый клапан, подвижный газовый клапан и пьезоклапан. Для инжекции макрочастиц разработаны инжектор топливных макрочастиц, инжектор примесных макрочастиц, инжектор литиевых макрочастиц. Дополнительно для инжектора топливных макрочастиц разработаны узлы коммутатора каналов инжекции и устройство для хордовой инжекции макрочастиц, а также микроволновые весы для бесконтактного измерения массы макрочастиц и система предсказания событий в плазменном шнуре для запуска систем инжекции.

Инжектор топливных макрочастиц позволяет осуществлять ввод основной компоненты плазмы (изотопов водорода), а также с помощью устройства для хордовой инжекции формировать транспортный барьер и инициировать переход в режим улучшенного удержания [3], проводить исследования поперечного переноса с помощью создаваемых возмущений [4] и вызывать пикирование профиля плотности плазмы. Также система хордовой инжекции позволяет исследовать ко- и контр-инжекцию макрочастиц по отношению к вращению плазмы. Применение коммутатора каналов предоставляет возможность осуществить ввод топлива со стороны сильного поля, что существенно повышает эффективность инжекции, а также выполнять инжекцию в область дивертора и Х-точки, в том числе с целью формирования режима отрыва. Инжектор примесных макрочастиц позволяет исследовать перенос примесей в плазме [5].

Подвижный газовый клапан позволяет разместить источник сверхзвуковой струи на границе плазменного шнура, что повышает эффективность инжекции и уменьшает задержку поступления газа в плазму. Мощная газовая инжекция может применяться для гашения плазменного разряда и для подавления пучков убегающих электронов во время срыва плазмы [6].

Описываемый инжекционный комплекс и его составляющие планируются для использования на действующих и планируемых термоядерных установках РФ – Т-15МД, Глобус-М2, ТРТ.

Работы поддержаны ГК Росатом и Минобрнауки России в рамках Федерального проекта 3 (U3), проект №FSEG-2023-0018 «Разработка и создание систем струйной и пеллет инжекции с повышенными производительностью и ресурсом».

Литература

- [1]. Kuteev V.V., et al. // Fusion Technology. 1994. v. 26. № 3 part 2. p. 642.
- [2]. Pégourié B., Review: Pellet injection experiments and modelling // Plasma Phys. Control. Fusion. IOP Publishing, 2007. V. 49, № 8. P. R87–R160.
- [3]. Капралов В.Г., и др. // Письма в Журнал технической физики. 1995. Т. 21. № 6. С. 57.
- [4]. Sergeev V.Yu., et al. // Plasma and Fusion Research, 2019. Vol. 14, 3402121.
- [5]. Egorov S.M., et al. // "Proc 13 Int Conf Plasma Phys Controlled Nucl Fusion Res" 1991, 599.
- [6]. Dremin M.M., et al. // Problems of Atomic Science and Tech., Ser. Th. Fusion, 2012, 4, 58.

ПРОГРЕСС В РАЗРАБОТКЕ ВНК ИТЭР

Немцев Г.Е., Ревякин П.А., Жаров А.С., Степанов С.Б., Голачев В.М., Нагорный Н.В.,
Гужев Д.И., Юхнов Н.М.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: G.Nemtsev@iterrf.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.243

В работе представлен обзор диагностической системы токамака ИТЭР Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК). ВНК – многоканальный нейтронный коллиматор, предназначенный для измерения пространственного распределения интенсивности нейтронного источника.

Разработка Вертикальной нейтронной камеры находится на завершающем этапе разработки – начало производства запланировано в 2024 году.

Проведён нейтронно-физический анализ диагностики – рассчитано пространственное распределение источников радиационного нагрева конструкции ВНК, а также динамика активности компонентов диагностики и пространственное распределение мощности эквивалентной дозы излучения. Завершена разработка блока детектирования быстрых нейтронов, состоящего из 4 детекторов – двух полупроводниковых алмазных детекторов и двух ионизационных камер деления с радиатором на основе ^{238}U . Успешно выполнены испытания детекторов в условиях, приближенных к реальным условиям работы. Экспериментально определено влияние условий эксплуатации на энергетическое разрешение детекторов и на их чувствительность к быстрым нейтронам. Изготовлены и испытаны макеты основных критических элементов диагностической системы. Завершается разработка системы сбора данных ВНК, позволяющая измерять плотность потока нейтронов на детекторе в реальном времени с 1 мс разрешением в широком динамическом диапазоне. Проверена эффективность алгоритма восстановления профиля плазменного нейтронного источника для разных сценариев из базы данных ИТЭР. Был выполнен анализ экранирования полей нейтронного и гамма-излучений защитным шкафом электроники предварительного усиления ВНК.

На основании результатов проделанной работы в 2024 году в Международной Организации ИТЭР предполагается проведение одного из этапов защиты финального проекта ВНК

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.23.1014 от 18 января 2023 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2023 году».

Литература

- [1]. Bertalot L. et al., (2015) Concept Design and Integration Aspects of ITER Vertical Neutron Camera // *Proceedings of Science*.

КАЛОРИМЕТР-ЗОНД ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ИСТЕКАЮЩЕГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В БЕЗЭЛЕКТРОДНОМ ПЛАЗМЕННОМ РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Костриченко И.А., Брагин Е.Ю., Гусев С.С.

Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.244

Безэлектродный плазменный ракетный двигатель (БПРД) является разновидностью электрических ракетных двигателей, одной из отличительных особенностей которого является высокая плотность мощности, что в перспективе позволит использовать его для межпланетных перелетов. Принципиально БПРД состоит из трех блоков. В первом (геликонном источнике плазмы) по средствам поглощения рабочим телом вводимой ВЧ мощности происходит создание холодного плазменного потока. Во втором блоке созданный плазменный поток попадает в зону нагрева на ионном-циклотронном резонансе, где дополнительная ВЧ энергия вкладывается в циклотронное движение ионов. Третий блок представляет из себя магнитное сопло, которое формируется естественным образом на торце магнитной системы. Именно в нём в условиях спадающего магнитного поля происходит преобразование вращательной энергии ионов в энергию их продольного движения, которая и даёт нам основной вклад в скорость истекающего потока и тягу двигателя. Стоит задача исследования истекающего из БПРД плазменного потока. В данной работе предлагается использовать калориметр/зонд для оценки его параметров.

Калориметр для «улавливания» всего плазменного потока, а значит всей его энергии, должен представлять собой идеально черное тело, попадая в которое частицы плазменного потока, претерпевая множественные соударения со стенками, передают ему всю свою тепловую энергию, измерив которую, получаем мощность, переносимую плазменным потоком. Подав на корпус калориметра большой отрицательный потенциал относительно земли и измеряя текущий через него ток, получим полный ионный ток плазменного потока. Поделив одно на другое, получим среднюю энергию ионов.

Спроектирован и изготовлен калориметр следующей конструкции: он представляет собой медный цилиндр, радиус которого чуть больше радиуса плазменного шнура в месте измерения, дно калориметра выполнено в виде конуса, обращенного вершиной вовнутрь. Такая форма служит для того, чтобы частица, попавшая в калориметр, ударилась как минимум два раза о его стенки и отдала ему большую часть своей энергии. Таким образом, энергия теплового потока преобразуется в тепловую энергию калориметра, изменение которой мы и регистрируем. Так же такая конструкция обеспечивает достаточную откачку «погибшего» на стенках потока из калориметра.

Подключив калориметр по схеме одиночного зонда Ленгмюра, можно использовать его для измерения полного ионного тока плазмы. Учитывая высокие значения измеряемых токов, требуется использование мощного источника питания и специальной измерительной схемы. В нашем случае измерительная схема была реализована на основе датчика ACS715.

Калориметр/зонд также можно использовать для калибровки других плазменных диагностик. В данной работе мы использовали его для калибровки подвижного двойного зонда Ленгмюра.

МОДЕЛЬ TRT 2023, ЯДЕРНО-РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ. (8Т, 5МА С ЗАЩИТОЙ ПОРТОВ)

Портнов Д.В., Афанасенко Е.С., Высоких Ю.Г., Кашук Ю.А.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,
e-mail: d.portnov@iterrf.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.245

Были выполнены расчеты ядерно-радиационных нагрузок на конструктивные элементы установки, а также нейтронных полей в местах расположения диагностик для обновленной модели токамака TRT [1]. Выполнено сравнение с результатами, полученными в [2]. Для снижения нагрузок на внешних обводах катушек тороидального поля в модели добавлено заполнение портов и макет диагностической первой стенки в экваториальных портах. В модели был применен нейтронный источник, рассчитанный для равновесного состояния плазмы (дейтерий, $B_0 = 8$ Т, $I = 5$ МА, $T_i = 21$ кэВ, $n_e = 9.4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$) с полным выходом нейтронов $\approx 10^{17} \text{ с}^{-1}$.

В результате работы были получены распределения нейтронных и мгновенных фотонных полей, энерговыделения, мгновенной мощности дозы. Распределения были получены как обзорные – в кубе, объемлющем установку, так и более детальные в пространствах размещения портов и тороидальной катушки. Один из портов (№ 12) модели представлял коллиматор для нейтронной диагностики. Получены также интегральные значения нагрузок в критических элементах установки, в первую очередь, вакуумной камере и тороидальной катушке.

Была рассчитана активация конструкции токамака для предполагаемого сценария облучения.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4к.241.09.23.1060 от 17.04.2023 на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы "НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023 – 2024 годов".

Литература

- [1]. Красильников А.В., Коновалов С.В. и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики // Физика плазмы, 2021, том 47, № 11, с. 970 – 985.
- [2]. Портнов Д.В., Высоких Ю.Г., Кашук Ю.А., Родионов Р.Н. Токамак с реакторными технологиями (TRT): предварительный анализ ядерного энерговыделения в катушках тороидального поля // Физика плазмы, 2021, Т. 47, Т. 12: Токамак с реакторными технологиями (TRT)..

ПЛАЗМЕННАЯ АКТИВАЦИЯ ПИТАТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ ПРИ МИКРОКЛОНАЛЬНОМ РАЗМНОЖЕНИИ

^{1,2}Хатуева М.Д., ^{1,2}Гудкова В.В., Е.М. ¹Кончечков Е.М.

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, 1032216553@pfur.ru

²Российский университет дружбы народов, г.Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.246

Широкомасштабно развивается применение низкотемпературной плазмы газового разряда в сельском хозяйстве. Образующиеся при воздействии на жидкость активные формы кислорода и азота способны интенсифицировать рост растений, а также помочь при борьбе с фитопатогенами. Одними из ключевых и легко регистрируемых долгоживущих форм являются H_2O_2 , NO_2^- , NO_3^- .

В работе рассматривается воздействие источника плазмы, созданного на основе пьезотрансформатора [1], на питательную среду (агар). Данная среда используется при микроклональном размножении в производстве здорового посадочного материала растений.

В качестве оценки плазменного воздействия мы измеряли концентрации пероксида водорода, нитрит- и нитрат- ионов (рис. 1а, б). Обработка не отвердевшего агара перед высадкой в него растений проводилась в течение 2,5 – 7,5 минут, варьировался объем обрабатываемого раствора 20 – 40 мл. Измерение концентраций проводилось при 70°C с помощью спектрофотометрических методов (FOX и Griess) по спектрам поглощения (на длинах волн 560 и 525 нм соответственно)

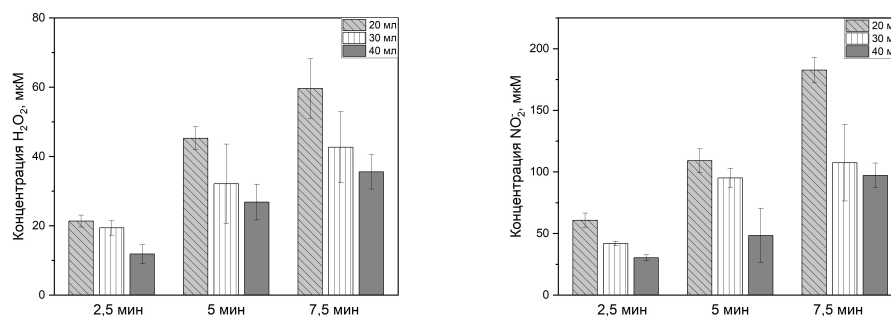


Рис. 1. Зависимость концентрации пероксида водорода (а), концентрации нитрит-ионов (б) от времени воздействия источником плазмы и объема обрабатываемой жидкости.

Литература

- [1]. L.V. Kolik et al. Study of characteristics of the cold atmospheric plasma source based on a piezo transformer // Russian Physics Journal, V. 62, No. 11, March, 2020.

ДИАГНОСТИКА ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА ИТЭР (СТАТУС РАБОТ)

¹Мухин Е.Е., ¹Толстяков С.Ю., ¹Баженов А.Н., ¹Бочаров И.В., ¹Букреев И.М.,
¹Варшавчик Л.А., ¹Дохтаренко Д.В., ¹Дмитриев А.М., ^{1,2,3}Елец Д.И., ¹Ермаков Н.В.,
¹Жильцов Н.С., ¹Курский Г.С., ¹Коваль А.Н., ⁴Корнев А.Ф., ⁴Макаров А.М., ⁵Богачев
Д.Л., ¹Александров С.А., ¹Николаев А.В., ¹Бочарников В.А., ¹Марчий Г.В., ¹Медведев
О.С., ¹Николаенко К.О., ¹Минбаев М., ¹Панкратьев П.А., ^{1,2}Раздобарин А.Г.,
¹Смирнов Г.В., ¹Самсонов Д.С., ¹Григорьева О.А., ¹Соловей В.А., ¹Снигирев Л.А.,
¹Старовойтов Е.А., ¹Терещенко И.Б., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Гук Е.Г., ¹Климов В.Н.,
¹Смирнова Е.П., ¹Сотников А.В., ⁵Чернаков П.В., ¹Чернаков А.П., ⁶Мокеев А.Н.,
⁷Модестов В.И., ⁷Кириенко И.Д., ⁷Жадковский А.А.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,

²Санкт-Петербургский государственный университет, Физический факультет,
г. Санкт-Петербург, Россия,

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия,

⁴ООО «Лазеры и оптические системы», г. Санкт-Петербург, Россия,

⁵ООО «Спектрал-Тех», г. Санкт-Петербург, Россия,

⁶Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия,

⁷Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Физико-
механический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.247

В 2023 году велись работы по подготовке первого, второго и третьего этапов защиты финального проекта (FDR-1, FDR-2 и FDR-2) диверторного томсоновского рассеяния (ДТР). Подготовка FDR-1 вышла на финальную стадию, подготовленная документация загружена на IDM в конце 2023 года. Объектом FDR-1 диагностики ДТР являются все диагностические компоненты, расположенные на диверторных кассетах 21 и 22 нижнего порта № 8, включая: систему пассивной защиты устройства ввода лазерного излучения – устройство газодинамической защиты; нижние и верхние бленды для экранирования телесного угла системы сбора рассеянного излучения от свечения поверхности нагретой внутренней диверторной мишени; ловушку лазерного излучения на кассете #21.

В частности, конструкция ловушки лазерного излучения, которая предусматривает десять отражений лазерного излучения от молибденовых зеркал с постепенным ослаблением плотности мощности лазерного излучения, разрабатывалась с учетом требований процесса установки кассеты, обеспечения доступа при приварке ловушки к кассете и обеспечения требований температурной развязки молибденовых зеркал относительно стальных корпусов внутри самой ловушки. Особое внимание было уделено термоинтерфейсу между изделиями и кассетой, а также разгрузка сварных соединений. Для разработанных конструкций был проведен полный набор прочностных анализов в ANSYS, учитывающих все возможные комбинации нагрузок для нормального режима работы токамака, а также для режима, учитывающего возможные инциденты в ходе работы.

Развитие работ по подготовке FDR-2 заключалось в продолжении работ по конструкции внутривакуумных зеркал и защите / чистке от напыления первого зеркала.

В рамках подготовки FDR-3 был разработан ряд документов системы CODAC.

КВАЛИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ВНУТРИКАМЕРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ БЛАНКЕТА ИТЭР

¹Чебурова А.В., ¹Козлов С.А., ¹Хомяков С.Э., ¹Поддубный И.И., ¹Свириденко М.Н.,
²Беликов А.И., ²Колесник Л.Л., ³Шер Е.С., ³Ульяницкий В.В., ⁴Путрик А.Б.

¹Акционерное общество «НИКИЭТ», г. Москва, Россия

²ООО «Электровакуумные технологии», г. Москва, Россия

³ООО «СТЗП», г. Новосибирск, Россия

⁴Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.248

В рамках реализации соглашений о поставке внутрикамерных компонентов (ВКК) на площадку ИТЭР, АО «НИКИЭТ» при поддержке представителей российского малого бизнеса выполняет работы по изготовлению поставочных компонентов ИТЭР, включающему нанесение покрытий различного функционального назначения. В данной статье приводится описание двух технологий нанесения покрытий, прошедших квалификацию Международной Организации ИТЭР (МО ИТЭР): электроизоляционного покрытия (ЭИП) и антифрикционного покрытия (АФП).

Электроизоляционное покрытие (ЭИП) предназначено для обеспечения электрической изоляции элементов крепления модулей бланкета ИТЭР. Для нанесения ЭИП используется детонационный метод, разработанный ООО «Сибирские технологии защитных покрытий», а в качестве материала ЭИП используется оксид алюминия (Al_2O_3) с адгезионным подслоем из NiCr. С целью подтверждения качества и работоспособности ЭИП были проведены квалификационные испытания, включающие измерение толщины подслоя и покрытия, измерение объемного сопротивления, проверку прочности сцепления ЭИП с материалом подложки, измерение пористости ЭИП и анализ его химического состава. Все вышеуказанные испытания проведены по утвержденным МО ИТЭР процедурам для проверки нанесенного ЭИП на соответствие установленным критериям приемки.

Антифрикционное покрытие (АФП) предназначено для уменьшения коэффициента трения с целью обеспечения требований к усилию затяга резьбовых элементов ВКК. В качестве материала АФП выбран дисульфид молибдена MoS_2 , нанесенный методом магнетронного распыления в вакууме. Технология нанесения разработана АО «НИКИЭТ» совместно с ООО «Электровакуумные технологии». Технология нанесения АФП также прошла все стадии квалификации: измерение толщины нанесенного покрытия; измерение шероховатости после нанесения; визуальный контроль АФП; ряд трибологических испытаний и серию испытаний на закручивание/откручивание.

В настоящей статье обобщены результаты квалификации для каждого из указанных выше покрытий, приведены результаты испытаний и выводы по дальнейшей оптимизации разработанных технологий и их адаптации к последующему серийному изготовлению внутрикамерных компонентов бланкета с покрытиями различного функционального назначения для поставки на площадку ИТЭР.

Работа выполнена по государственному контракту с ГК «Росатом» от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014

СТАТУС РАЗРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СОБИРАЮЩИХ ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР

¹Терещенко И.Б., ¹Самсонов Д.С., ¹Мухин Е.Е., ²Капустин Ю.В., ³Маринин Г.В.,
³Терентьев Д.В., ⁴Пискарев Д.В., ⁴Маханьков Н.А., ⁵Патрикеев В.Е., ⁶Солк С.В.,
⁷Худолей А.Л., ⁷Кумейша П.Н., ¹Марчий Г.В., ⁸Королева А.В., ¹Толстяков С.Ю.,
¹Снигирев Л.А., ⁹Городецкий А.Е., ⁹Залавутдинов Р.Х., ⁹Маркин А.В., ⁹Буховец В.Л.,
¹⁰Чернаков П.В., ¹¹Мокеев А.Н.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

³Русские Технологии, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Акционерное общество «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия

⁵Акционерное общество ЛЗОС, г. Лыткарино, Россия

⁶Акционерное общество НИИ ОЭП, Сосновый Бор, Россия

⁷Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

⁸Институт химии СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

⁹Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва, Россия

¹⁰ООО «Спектрал-Тех», г. Санкт-Петербург, Россия

¹¹Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.249

Собирающие системы оптических диагностик ИТЭР содержат значительное количество внутривакуумных зеркал, которые должны обладать высокой оптической стабильностью к условиям воздействия нейтронных потоков (макс.) $2,25 \times 10^{12} \text{ см}^{-1}\text{с}^{-1}$, термоциклирования 70 – 180°C, вибрационных нагрузок, загрязнения отражающей поверхности продуктами эрозии первой стенки – W, Be и их соединениями, аварийного прорыва пара (SI) 30 – 250°C при RH более 90%. Система сбора рассеянного излучения ДТР состоит из 7 крупногабаритных внутривакуумных зеркал линейным размером от 360 до 720 мм и изготовленных из нержавеющей стали 316L(N)-IG. Оптическая схема системы сбора предполагает 5 последовательных отражений, поэтому для достижения приемлемого оптического коэффициента передачи более 50% необходимо, чтобы коэффициент отражения каждого из зеркал в диапазоне 500 – 1100 нм был выше 90%. Качество передачи рассеянного излучения определяют такие характеристики зеркал, как стабильность формы и пространственного положения и спектральные характеристики диффузного и зеркального отражений. Выбор нержавеющей стали 316L(N)-IG в качестве материала зеркал и разработанная конструкция крепления позволили снизить нежелательные деформации оптической поверхности зеркала при прикладываемых нагрузках. Поскольку отражение нержавеющей стали составляет ~60 – 70%, то необходимо формировать высокоотражающее оптическое покрытие. Серебро обладает наибольшей отражательной способностью в видимой и ближней ИК области, однако оно подвержено коррозии при воздействии ионов H^+ и OH^- , присутствующих в водяном паре. В качестве типа защиты отражающего слоя Ag выбран барьерный – формирование тонкого многослойного диэлектрического покрытия, полной толщиной не более 30 нм. Проведенные эксперименты показали, что при одинаковой полной толщине защитного покрытия увеличение количества интерфейсов в защитном покрытии уменьшает падение отражения после экспозиции в паре, и при 5 слоях оно практически отсутствует.

На характеристику диффузного отражения зеркал оказывает влияние качество подготовки поверхности перед напылением. Проведено сравнение образцов из нержавеющей стали 316L(N)-IG малого размера, поверхность которых образована абразивным полированием, магнитореологическим полированием, а также алмазным точением слоя меди, присоединенного к нержавеющей стали методом горячего изостатического прессования.

Доклад подготовлен как отчет о работе для Организации ИТЭР (контракт Росатома № Н.4а.241.19.22.) и поддержан ФТИ им Иоффе (государственное задание РФ 0034–2019–0001).

РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА СОГЛАСОВАНИЯ ВЧ МОЩНОСТИ ЧИСТЯЩЕГО РАЗРЯДА ДЛЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ В ВАКУУМНОМ ОБЪЕМЕ ИТЭР

Минбаев М.Э., Самсонов Д.С., Смирнов Г.В., Резанов Д.А., Мухин Е.Е.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.250

Эффективный и контролируемый вклад мощности в ВЧ разряд для очистки внутривакуумных зеркал ИТЭР от загрязнения продуктами распыления первой стенки токамака достигается при согласовании импедансов источника, подводящей линии и цепи нагрузки. Импеданс цепи нагрузки определяется реактивными элементами, неизбежно вносимыми конструкцией узла первого зеркала, а также самим ВЧ разрядом [1]. Для уменьшения поглощения активной ВЧ мощности в протяженной подводящей линии ранее [2] предложено размещать в непосредственной близости от первого зеркала согласующее устройство (СУ) в виде Г-образного четырехполосника (рис. 1а).

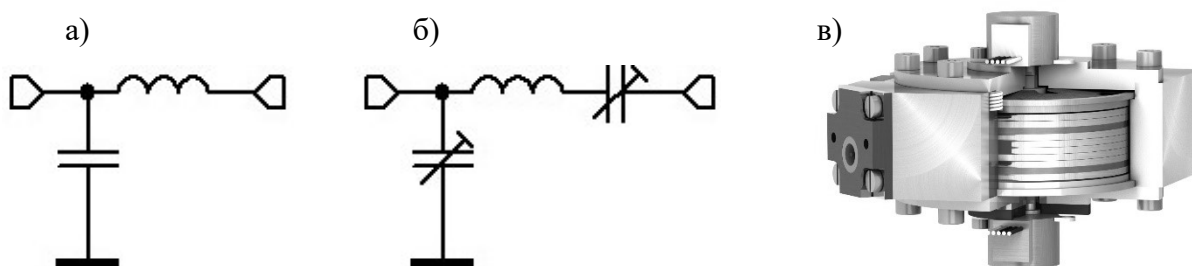


Рисунок 1. ВЧ предсогласующее устройство для применения в ИТЭР: а) Г-образная неподстраиваемая схема; б) схема с подстроечными элементами; в) общий вид конструктивного исполнения.

Экспериментальная работа с неподстраиваемым СУ выявила ряд его недостатков, связанных с тем, что точка его оптимальной настройки зависит от параметров рабочей точки разряда (давление и сорт газа, частота, мощность), а выбор ее положения ограничен точностью изготовления и сборки деталей СУ. Точная настройка такого СУ крайне трудоемка, поскольку требует развакуумирования разрядной камеры и разборки его корпуса. Настройка при этом происходит без прямого контроля результата.

Перечисленные трудности можно преодолеть путем введения в цепь подстроечных элементов (рис. 1б). Конструктивная реализация такого решения серьезно осложняется ограниченным выбором материалов для применения внутри вакуума ИТЭР из-за жестких условий эксплуатации.

Разработанная конструкция подстраиваемого СУ (рис. 1в) представляет собой структуру из уложенных друг над другом слоев металлической фольги, разделенных слоями диэлектрика. Некоторые слои металла подвижны и являются обкладками двух подстроечных конденсаторов. Радиочастотный расчет и оптимизация трехмерной структуры проводились при помощи полноволнового конечно-элементного моделирования.

Литература

- [1]. Самсонов Д.С. Питание системы ВЧ очистки первых зеркал оптических диагностик ИТЭР // Тезисы докладов XX всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы». Сочи, 18 – 22 сентября 2023 г. (с. 106 – 108).
- [2]. Резанов Д.А., Орешко И.В., Самсонов Д.С., Мухин Е.Е. Согласующее устройство в составе системы ВЧ очистки узла первых зеркал оптической диагностики ИТЭР // Сборник тезисов докладов XIII конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение». Москва, 07 – 09 декабря 2022 г. (с. 87 – 90).

СТАТУС РАБОТ ПО ИНТЕГРАЦИИ НИЖНЕГО ПОРТА № 08, ВЕРХНИХ ПОРТОВ №№ 04 – 06 ТОКАМАКА ИТЭР

Сениченков В.А., Кудряшов П.С., Емельянов А.В., Андреев Е.А., Мухин Е.Е.

*Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,
Vasily.Senichenkov@mail.ioffe.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.251

В задачи интеграции оборудования диагностических портов токамака ИТЭР входит обеспечение размещения, функционирования и обслуживания диагностических систем, обеспечение нейтронной защиты и структурной целостности несущих конструкций, обеспечение герметичности вакуумного оборудования и устойчивости к воздействию тепловых, сейсмических и электромагнитных нагрузок. Нижний порт № 08 располагается в зоне дивертора, несущие конструкции для диагностик должны соответствовать требованиям обслуживания манипулятором диверторных кассет за счет использования устройств транспортировки и фиксации конструкций. Верхние порты №№ 04 – 06 токамака ИТЭР не содержат сложных диагностических систем и предназначены для установки защитных модулей нейтронной защиты, в задачи интеграции также входят проработки подключения инженерных коммуникаций.

Разработаны основные несущие конструкции для размещения диагностического оборудования диагностики томсоновского рассеяния и монитора эрозии дивертора, а также элементы транспортировки, установки и фиксации в Нижнем порту № 08. С учетом необходимости учитывать требования оптических диагностик по установке, точности юстировок была проведена разработка и сборка стендовой базы для макетирования хода диагностического лазерного излучения на оптических стендах интеграционной площадки ФТИ им А.Ф.Иоффе.

В 2023 году для задач интеграции нижних портов №08 были разработаны макеты конструктивных элементов фиксации передней диагностической рамы, проведены испытания макета передней диагностической рамы для подтверждения технических решений по транспортировке и фиксации на диверторных рельсах. Подготовлена документация для прохождения защиты технического проекта (FDR). Планируется проведение испытаний элементов фиксации и транспортировки при тепловых нагрузках в соответствии с условиями эксплуатации на токамаке ИТЭР.

В рамках работ по интеграции верхних портов были проработаны конструктивные элементы защитных модулей и интерфейсов подключения инженерных коммуникаций, подтвержденные расчетами сейсмических, тепловых и электромагнитных нагрузок, а также воздействия нейтронного излучения. Проведена защита технического проекта (FDR) №№ 04 – 06 токамака ИТЭР. Планируется проведение анализа технологичности применяемых конструктивных решений и разработка документации для подготовки производства.

СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ ИТЭР: СТАТУС И ПЛАН РАБОТ НА 2024 ГОД

¹Шестаков Е.А., ²Алексеев А.Г., ²Вуколов Д.К., ²Горшков А.В., ¹Коновалов Г.М.,
²Орловский И.И., ²Морозов А.А., ²Андреев Е.Н., ²Асадулин Г.М., ²Ахтырский С.В.,
²Храменков А.В., ²Вуколов К.Ю., ²Карпушов И.Д., ²Качкин А.Г., ²Проценко Д.Е.,
²Рогов А.В., ²Капустин Ю.В.

¹Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, e.shestakov@iterrf.ru

²Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез – международные проекты», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.252

Спектроскопия водородных линий ИТЭР входит в список базовых диагностик, требуемых для запуска установки на этапе получения первой плазмы, и играет основную роль (Primary role) в измерении таких параметров как потоки изотопов водорода и примесей из первой стенки, регистрацию ELM мод и L–H-переходов с высоким пространственным и временным разрешением. Диагностика включает 3 оптических канала, обеспечивающих обзор первой стенки как со стороны сильного, так и со стороны слабого магнитного поля, расположенных в экваториальном порту № 11 (два полоидальных канала) и в экваториальном порту № 12 (тангенциальный канал). Описание основных подсистем диагностики приведено в 0, 0.

Согласно исходным планам МО на первом этапе физического пуска, планировавшегося в 2025 году, требовалась полная установка всего внутривакуумного оборудования и упрощенная система регистрации. В результате этого, разработка и изготовление внутривакуумных компонент диагностики велась в условиях предельно сжатых сроков и постоянно меняющихся требований к интерфейсам, пространственным ограничениям и сопроводительной документации. Техническое (финальное) проектирование этих внутривакуумных узлов проводилось одновременно с непрерывным уточнением интерфейсных ограничений и нагрузок в течение 2017 – 2020 гг. Защита финального проекта (FDR) этих компонент состоялась в феврале 2021 г, и дальнейшая работа по доработке и утверждению проекта, подготовке и экспертизе производственной документации, квалификации спецпроцессов, испытанию прототипов и т.п. была проведена в предельно сжатые сроки. Основная часть деталей внутривакуумных компонент была изготовлена в 2022 г., сборка и испытания, начатые в 2023 году, планируются к завершению в 2024-м.

В 2023 году концепция поставки компонент на площадку ИТЭР поменялась. На текущий момент требования к поставке упрощенной конфигурации к первой плазме снято одновременно с переносом срока запуска ИТЭР. Поэтому основные усилия в 2024 году и последующих годах будут связаны с разработкой вневакуумных компонентов.

В докладе представлены основные результаты работ по проектированию, изготовлению и испытаниям компонент диагностики, суммирован накопленный опыт, определены дальнейшие планы по разработке диагностики.

Литература

- [1]. A. Gorshkov et al. // Fusion Engineering and Design 146 (2019), 329 – 335.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.061>.
- [2]. 55.E2_System_Design_Description_(DDD), ITER_D_74SPFY v.1.1.

ПРИМЕНЕНИЕ КОДА OPENMC ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ТОКАМАКЕ TRT

Афанасенко Е.С., Портнов Д.В., Высоких Ю.Г., Кашук Ю.А.

*Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, e.afanasenko@iterrf.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.51.2024.1.1.253

С появлением токамаков с высоким нейтронным выходом проведение нейтронно-физического анализа при проектировании конструкции токамака становится необходимостью. Планирование экспериментов и интерпретация полученных результатов требует знания ядерно-радиационных нагрузок. Моделирование переноса нейтронного и гамма-излучений в конструктивных элементах установки позволяет получить распределения нейтронных и гамма-полей, рассчитать мощность источников радиационного энерговыделения, оценить динамику активации конструкций, что важно при проектировании сверхпроводниковых катушек, биологической защиты, систем охлаждения, нейтронных и гамма диагностик плазмы.

OpenMC (Open Monte-Carlo) [1] является одним из расчётных кодов, предназначенных для моделирования процессов переноса ионизирующих излучений в трёхмерной геометрии методом Монте-Карло [2] и предоставляет весь функционал, необходимый для решения вышеуказанных задач. OpenMC является программным комплексом с открытым исходным кодом. Это упрощает его применение, позволяет вносить изменения в код, тем самым развивая данный проект, наращивая его качество силами широкого круга разработчиков и пользователей, а также позволяет модифицировать его под специальные задачи.

В работе проведён нейтронно-физический анализ модели токамака TRT [3], адаптированной для работы с кодом OpenMC. В качестве источника нейтронов рассматривалось пространственное распределение, соответствующее разряду дейтериевой плазмы с ионной температурой 21 кэВ, электронной плотностью $9,4 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и полной интенсивностью нейтронного излучения плазмы 10^{17} н/с . В результате были получены пространственное распределение плотности потоков нейтронного и гамма-излучений, плотность источников радиационного нагрева в конструктивных элементах токамака. Проведено сравнение результатов моделирования в ключевых точках с другим транспортным кодом, широко используемым в термоядерных исследованиях. Получено хорошее согласие результатов моделирования между двумя кодами, что говорит о больших перспективах работы с кодом OpenMC в будущем как для задач проекта TRT, так и для других установок УТС.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № Н.4к.241.09.23.1060 от 17.04.2023 на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы "НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023-2024 годов".

Литература

- [1]. Paul K. Romano, Nicholas E. Horelik, Bryan R. Herman, Adam G. Nelson, Benoit Forget, and Kord Smith, "OpenMC: A State-of-the-Art Monte Carlo Code for Research and Development," *Ann. Nucl. Energy*, 82, 90–97 (2015).
- [2]. Бусленко, Н.П. Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация на цифровых вычислительных машинах // Ю.А. Шрейдер. М.: Физматгиз, 1961.
- [3]. Красильников А.В., Коновалов С.В. и др. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики // *Физика плазмы*, 2021, том 47, № 11, с. 970 – 985.

СПИСОК АВТОРОВ**А**

| | |
|-------------------|-------------------------|
| Абдуллина Г.И. | 60 |
| Абрамов И.А. | 207 |
| Абрамов И.С. | 167, 175 |
| Абдрашитов А.Г. | 120 |
| Абушаев Т.Р. | 220 |
| Авдюшкин Д.А. | 268 |
| Агапов М.Н. | 152 |
| Агеев А.В. | 109, 274 |
| Акунец А.А. | 149, 152 |
| Александров В.В. | 148, 154 |
| Александров С.А. | 298 |
| Александров С.Е. | 116 |
| Александрова И.В. | 152 |
| Алексеев А.Г. | 303 |
| Алексеев Д.И. | 251, 261 |
| Алиев Ю.М. | 145 |
| Аммосов Я.М. | 55, 110 |
| Анашкин И.О. | 49 |
| Ананьев С.С. | 136 |
| Андреев В.Ф. | 49, 67, 70, 135, 289 |
| Андреев Г.И. | 212 |
| Андреев С.Е. | 195, 201 |
| Андреев Е.А. | 302 |
| Андреев Е.Н. | 303 |
| Андрианова Р.Р. | 56, 107 |
| Анисимов Д.А. | 208, 237 |
| Анпилов А.М. | 244, 247 |
| Антонов П.А. | 109 |
| Ануфриев Е.А. | 57 |
| Апфельбаум Е.М. | 168 |
| Арбузова Т.В. | 268 |
| Аржанников А.В. | 209, 231 |
| Аристова Н.А. | 227 |
| Артемьев К.В. | 242, 247 |
| Артемьев К.К. | 276 |
| Асадулин Г.М. | 49, 58, 291, 303 |
| Асеев А.С. | 67 |
| Аскинази Л.Г. | 60 |
| Асташинский В.М. | 40 |
| Атлуханов М.Г. | 209 |
| Афанасенко Е.С. | 296, 304 |
| Афанасьев В.И. | 269 |

| | |
|----------------|---------------|
| Афанасьев В.П. | 262, 263, 264 |
| Ахметов Э.Р. | 49, 102 |
| Ахтырский С.В. | 303 |

Б

| | |
|-------------------|---------------------------------|
| | 39, 47, 85, 117 |
| Багрянский П.А. | 117 |
| Баженов А.Н. | 298 |
| Бай А.А. | 146 |
| Байдин И.С. | 226 |
| Бакшт Е.Х. | 193 |
| Балакин А.А. | 82 |
| | 47, 59, 92, 133 |
| Балаченков И.М. | 133 |
| | 49, 78, 135, 289 |
| Балашов А.Ю. | 289 |
| Баркалов К.Е. | 61 |
| Баронова Е.О. | 140 |
| Баско М.М. | 148 |
| Баткин В.И. | 101, 115 |
| Батукаев Т.С. | 169, 188 |
| | 47, 59, 83, 84, 92, 133, 134 |
| Бахарев Н.Н. | 134 |
| Бахтин В.П. | 245, 246 |
| Бегишев Р.А. | 49 |
| Безверхняя Д.М. | 151 |
| Белавский А.В. | 120 |
| Беликов А.И. | 299 |
| Белов А.М. | 49, 78 |
| Белокуров А.А. | 60 |
| Бельбас И.С. | 49, 58, 291 |
| Бельков С.А. | 51 |
| Бельченко Ю.И. | 255, 281 |
| Билера И.В. | 169, 172 |
| Битюрин В.А. | 217 |
| Бобырь Н.П. | 248 |
| Богачев Д.Л. | 298 |
| Богачев Н.Н. | 195 |
| Богданкевич И.Л. | 201 |
| Богданов С.А. | 170 |
| Бойков Д.С. | 189 |
| Болотов Я.К. | 144, 155, 226 |
| Болховитинов Е.А. | 142, 160 |
| Большаков А.П. | 204 |
| Бондарчук Э.Н. | 49, 84, 106 |
| Бондарь А.В. | 84 |

| | |
|-------------------|---|
| Борзосеков В.Д. | 131, 196, 222, 244, 247 |
| Борисенко Н.Г. | 149 |
| Борщеговский А.А. | 49, 62, 76, 100, 102 |
| Бочарников В.А. | 238, 252 |
| Бочаров А.Н. | 217 |
| Бочаров И.В. | 298 |
| Бочарова Е.В. | 61 |
| Бочарников В.А. | 238, 252, 298 |
| Бочкарев С.Г. | 147 |
| Брагин Е.Ю. | 181, 248, 295 |
| Браницкий А.В. | 148, 154 |
| Брантов А.В. | 147 |
| Бруль А.В. | 68, 120 |
| Брыксин Д.А. | 277 |
| Будаев В.П. | 63, 86, 208, 215, 237, 262, 263, 264, 267 |
| Букреев И.М. | 271, 298 |
| Булейко А.Б. | 245, 246 |
| Бульчев Н.А. | 41 |
| Бунин Е.А. | 191, 192 |
| Буторин П.С. | 221 |
| Бурдаков А. В. | 253, 256, 278, 280, 286 |
| Бурмистров Д.А. | 275 |
| Бурмистров Д.Е. | 243 |
| Бурсиков А.С. | 283 |
| Буслаков И.В. | 280 |
| Буторин П.С. | 221 |
| Бутусов Е.В. | 141 |
| Бухарский Н.Д. | 213 |
| Буховец В.Л. | 300 |
| Быков А.Г. | 245, 246 |
| Быченков В.Ю. | 147 |
| Бычков В.Л. | 211, 212, 235 |
| Бычков Д.В. | 211, 235 |

В

| | |
|------------------|--------------------------|
| Вавилин К.В. | 216 |
| Вадатурский В.В. | 283 |
| Вадимов Н.А. | 55, 110, 130 |
| Варфоломеев В.И. | 47, 83, 84, 92, 106, 133 |
| Варшавчик Л.А. | 238, 252, 298 |
| Васильев В.А. | 266 |
| Васильева О.Б. | 171 |

| | |
|--------------------|-------------------|
| Васильков Д.Г. | 131 |
| Васина Я.А. | 109 |
| Ваулин Д.Н. | 235 |
| Вафин И.Ю. | 196 |
| Вахрушев Р.В. | 68, 72, 120 |
| Велиев П.В. | 164 |
| Вербицкая К.С. | 260 |
| Вергунова Г.А. | 151 |
| Вертков А.В. | 132 |
| Вершков В.А. | 94, 111, 132, 284 |
| Виницкий Е.А. | 55, 110, 130 |
| Виноградов Н.П. | 193 |
| Вихарев А.Л. | 170 |
| Вихрев В.В. | 139, 162 |
| Вичев И.Ю. | 151 |
| Владимиров И.А. | 94, 111, 284 |
| Воинцев В.А. | 255 |
| Волков Л.С. | 197 |
| Волков Р.В. | 160 |
| Волынец А.Л. | 220 |
| Воробьев В.А. | 259, 286 |
| Воробьев М.С. | 198 |
| Воробьев С.О. | 231 |
| Воронин А.В. | 47, 73, 92 |
| Воронова Е.В. | 196, 222 |
| Воронова А.А. | 84 |
| Воскобойников Р.В. | 72 |
| Вуколов Д.К. | 303 |
| Вуколов К.Ю. | 303 |
| Высоких Ю.Г. | 280, 296, 304 |
| Вячеславов Л.Н. | 253 |

Г

| | |
|-----------------|--------------------|
| Гавриленко Д.Е. | 256, 278, 280, 286 |
| Гаврилов В.В. | 275 |
| Гаврилова Д.А. | 171 |
| Гаврилова М.А. | 171 |
| Гаврисенко Д.Ю. | 255, 281 |
| Гайсин А.Ф. | 200 |
| Галицын Д.Д. | 238, 252 |
| Гамов В.В. | 72 |
| Гаранин С.Г. | 51 |
| Гасилов В.А. | 146 |
| Гасилов М.А. | 176, 184 |
| Гашигуллин К.А. | 200 |

| | |
|-------------------|---|
| Глинов А.П. | 218 |
| Глинский В. В. | 174 |
| Глявин М.Ю. | 44 |
| Гожев Д.А. | 147 |
| Голачев В.М. | 294 |
| Головин А.П. | 218 |
| Голубев А.А. | 161 |
| Голубев М.С. | 176, 182, 184 |
| Голубев С.В. | 167, 175 |
| Голубков Г.В. | 235 |
| Голубков М.Г. | 235 |
| Гончаров Е.С. | 179 |
| Горбачёв А.М. | 170 |
| Горбовский А.И. | 255, 281 |
| Горбунов А.В. | 49, 57, 289 |
| Горлова Д.А. | 232 |
| Городецкий А.Е. | 300 |
| Гороховский Д.В. | 261 |
| Горшков А.В. | 49, 58, 291, 303 |
| Горяинов В.А. | 47 |
| Горяинов В.Ю. | 73, 92 |
| Господчиков Е.Д. | 44, 66, 74, 75, 82, 108, 119, 167, 175, 207 |
| Грабовский Е.В. | 148, 154 |
| Грашин С.А. | 49 |
| Гребенщикова М.М. | 239 |
| Григорьев А.Н. | 231 |
| Григорьева О.А. | 298 |
| Грицук А.Н. | 148, 154 |
| Гришина И.А. | 95, 96 |
| Грищенко А.М. | 256, 280 |
| Громов А.И. | 149 |
| Громова А.В. | 49 |
| Грушин А.С. | 151 |
| Губанова А.И. | 76, 208 |
| Губкин М.К. | 215, 237 |
| Гудкова В.В. | 242, 243, 244, 247, 297 |
| Гужев Д.И. | 268, 294 |
| Гук Е.Г. | 271, 298 |
| Гусаков Е.З. | 48, 99, 124, 128 |
| Гусев В.К. | 47, 59, 83, 84, 92, 133, 134 |
| Гусев С.С. | 248, 295 |

| | |
|------------------|---------------------------------|
| Гусейн-заде Н.Г. | 243, 244 |
| Гуськов С.Ю. | 141, 144, 146, 151, 153, 163 |
| Гуторов К.М. | 236 |

Д

| | |
|---------------------|---------------|
| Давыденко В.И. | 120 |
| Давыдов А.М. | 242, 244, 247 |
| Данилов А.В. | 67 |
| Двинин С.А. | 220 |
| Девятков В.Н. | 198 |
| Дедов А.В. | 215 |
| Дейчули Н.П. | 68 |
| Дейчули П.П. | 68, 120 |
| Дембовский Д.В. | 143 |
| Демедецкая Я.А. | 284 |
| Дементьев Н.С. | 135 |
| Демченко Н.Н. | 153 |
| Денисов Г.Г. | 282 |
| Деркач В.Н. | 51 |
| Джигайло Н.Т. | 109 |
| Джурик А.С. | 109, 274, 286 |
| Дзлиева Е.С. | 176, 182, 184 |
| Диас Михайлова Д.Е. | 49, 219, 292 |
| Длугач Е.Д. | 69, 257 |
| Дмитриев А.М. | 298 |
| Дмитриев Е.О. | 213 |
| Днестровский Ю.Н. | 67, 70, 79 |
| Добровольская А.С. | 217 |
| Докука В.Н. | 56, 107 |
| Долгова К.В. | 71, 91 |
| Донец А.Е. | 245, 246 |
| Дорофеюк А.А. | 241 |
| Дохтаренко Д.В. | 298 |
| Драбинский М.А. | 55, 110, 130 |
| Дравин В.А. | 276 |
| Драничников А.Н. | 120 |
| Дрёмин М.М. | 49, 293 |
| Дрозд А.С. | 49, 104 |
| Дубиницкий А.Ф. | 49 |
| Дудин В.С. | 216 |
| Дудник Ю.Д. | 171 |
| Дьяченко В.В. | 84, 128 |

Е

| | |
|--------------|----------|
| Егорова Е.Н. | 248 |
| Елец Д.И. | 271, 298 |

| | |
|----------------|---------------------|
| Елисеев Л.Г. | 55, 78, 110, 130 |
| Емелев И.С. | 214 |
| Емельянов А.В. | 302 |
| Еремеев А.Г. | 282 |
| Ерёмин В.А. | 61 |
| Ерискин А.А. | 155 |
| Ермаков Н.В. | 71, 298 |
| Есиналин А.А. | 199 |
| Ефимов Н.Е. | 264 |

Ж

| | |
|-----------------|--|
| Жадковский А.А. | 298 |
| Жарков М.Ю. | 132 |
| Жаров А.С. | 294 |
| Желтухин В.С. | 199, 200, 239 |
| Жилин Е.Г. | 47 |
| Жильцов В.А. | 192, 248 |
| Жильцов Н.С. | 47, 59, 71, 92, 126, 133, 134, 298 |
| Жубр Н.А. | 60 |
| Жуков В.И. | 201 |

З

| | |
|-------------------|----------|
| Задириев И.И. | 216 |
| Заклецкий З.А. | 244 |
| Залавутдинов Р.Х. | 300 |
| Запретилина Е.Р. | 50 |
| Звонков А.В. | 273 |
| Зворыкин В.Д. | 164 |
| Земцов И.В. | 49, 100 |
| Зенкова О.А. | 133 |
| Зецер Ю.И. | 179 |
| Зими́на М.А. | 243, 247 |
| Змиевская Г.И. | 240 |
| Змитренко Н.В. | 285 |
| Зорин А.В. | 109 |
| Зотов И.В. | 135 |
| Зубарев П.В. | 72, 120 |

И

| | |
|---------------|---------------|
| Иваненко С.В. | 47 |
| Иванов В.А. | 241 |
| Иванов И.А. | 101, 115, 129 |
| Иванов И.Е. | 219 |
| Иванов К.А. | 160, 232 |

| | |
|------------------|-----------------------|
| Иванов О.П. | 142 |
| Иванова И.П. | 227 |
| Иванцовский М.В. | 256, 278, 280, 286 |
| Игонькина Г.Б. | 80, 135 |
| Идеал Р. | 290 |
| Изарова А.Д. | 78 |
| Изотов И.В. | 44, 75 |
| Ильин И.С. | 49 |
| Ильинский Д.И. | 229 |
| Ильясова М.В. | 47 |
| Инжеваткина А.А. | 77, 121, 127, 129 |
| Иосилевский И.Л. | 180 |
| Ирзак М.А. | 124 |
| Ишков Т.А. | 191, 192 |

К

| | |
|-----------------|---------------------------|
| Кавеева Е.Г. | 91 |
| Кавин А.А. | 47, 71, 84, 92, 106 |
| Кавыршин Д.И. | 86, 208, 215, 237, 267 |
| Кадыргулов А.А. | 279 |
| Казаков Е.Д. | 177, 189 |
| Казеев М.Н. | 191 |
| Каклюгина Н.А. | 279 |
| Калинин П.В. | 209 |
| Камин Д.В. | 191, 192, 248 |
| Камолова Т.И. | 241 |
| Калмыков С.Г. | 221 |
| Кандауров И.В. | 253 |
| Канцырев А.В. | 161 |
| Капралов В.Г. | 221, 293 |
| Капустин Ю.В. | 300, 303 |
| Карасев В.Ю. | 176, 182, 184 |
| Карасев П.А. | 221 |
| Карпишин М.В. | 261 |
| Карпов А.В. | 49, 86, 215, 237 |
| Карпушов И.Д. | 303 |
| Карташева А.А. | 236 |
| Карфидов Д.М. | 201 |
| Касатов Д.А. | 278 |
| Касатов А.А. | 253 |
| Касьянова Н.В. | 79, 96 |
| Качкин А.Г. | 49, 80, 303 |

| | |
|-------------------|------------------------------|
| Кашук Ю.А. | 254, 259, 272, 286, 296, 304 |
| Каюмов Р.Р. | 200 |
| Квасков В.С. | 103, 135 |
| Кедров И.В. | 84, 277 |
| Ким Д.А. | 151 |
| Кириенко И.Д. | 271, 298 |
| Кирий Н.П. | 202 |
| Кирнев Г.С. | 277 |
| Кирнева Н.А. | 49, 58, 289 |
| Киселев Д.А. | 266 |
| Киселев Е.О. | 47, 59, 83, 91, 92, 133, 134 |
| Кислов Д.А. | 49, 289 |
| Кичик М.Г. | 257 |
| Климов В.Н. | 271, 298 |
| Климов Н.С. | 236 |
| Князев А.В. | 196, 222 |
| Коваль А.Н. | 71, 116, 298 |
| Коваль Н.Н. | 42, 198 |
| Кожевников А.В. | 121 |
| Кожурин А.А. | 87 |
| Козерук А.А. | 259 |
| Козин И.А. | 164 |
| Козлов В.Ф. | 191 |
| Козлов С.А. | 260, 299 |
| Колесник Л.Л. | 299 |
| Колесник М.С. | 266 |
| Колесников Д.С. | 161 |
| Колесников Е.Ю. | 85 |
| Колесниченко К.С. | 72 |
| Колик Л.В. | 243 |
| Кологривов А.А. | 142, 151, 160 |
| Кондаков А.А. | 255 |
| Конин А.Ю. | 84 |
| Коновалов А.Н. | 128 |
| Коновалов Г.М. | 258, 303 |
| Кончечков Е.М. | 243, 244, 247, 297 |
| Коньков А.А. | 86, 208, 237 |
| Конькова А.С. | 243 |
| Коньжев М.Е. | 241 |
| Константинов В.М. | 256 |
| Корешева Е.Р. | 152 |
| Кормилицын Т.М. | 254, 259, 272, 286 |
| Корнев А.Ф. | 298 |

| | |
|-------------------|---|
| Корнев В.А. | 60 |
| Корнев К.Н. | 220 |
| Корнеев Ф.А. | 213 |
| Коробко Д.Д. | 221 |
| Коробцев С.В. | 192, 248 |
| Королева А.В. | 300 |
| Костриченко И.А. | 248, 295 |
| Котельников И.А. | 114 |
| Кочетов С.Н. | 225 |
| Кочин В.А. | 49 |
| Кравец Е.М. | 72 |
| Кравцов Д.Э. | 256, 278, 280 |
| Кралькина Е.А. | 212, 216 |
| Красильников А.В. | 46, 52, 276, 282, 283 |
| Квасков В.С. | 103, 135 |
| Крашевская Г.В. | 169 |
| Кривошеев А.Н. | 88 |
| Крикунов С.В. | 47, 92 |
| Крохалев О.Д. | 55, 110 |
| Крупин В.А. | 49 |
| Крыжановский А.К. | 124, 128 |
| Крылов С.В. | 58, 293 |
| Кувшинов И.Р. | 149 |
| Кудашев М.С. | 104 |
| Кудрявцева А.М. | 84, 106 |
| Кузнецов В.Е. | 171 |
| Кузнецова Л.К. | 49 |
| Кузьмин Е.Г. | 277 |
| Кузьмин Е.И. | 178 |
| Куклин К.Н. | 101, 115, 209 |
| Кукушкин А.Б. | 89, 90, 97 |
| Кукушкин К.А. | 91, 126 |
| Куличенко А.А. | 90 |
| Кумейша П.Н. | 300 |
| Курганов В.Е. | 279 |
| Куриленков Ю.К. | 144 |
| Курские Г.С. | 47, 59, 71, 83, 84, 92, 116, 126, 133, 134, 298 |
| Кутузов Д.С. | 187 |
| Кучугов П.А. | 141, 153 |

Л

| | |
|--------------|----------|
| Лабусов А.Н. | 84, 106 |
| Лазарев В.Б. | 109, 274 |

| | |
|-------------------|-------------------------------|
| Латманизова Ю. Н. | 251, 261 |
| Лашкина Ю.С. | 88 |
| Лебедев С.В. | 37, 60 |
| Лебедев Ю.А. | 169, 172, 188, 194 |
| Лебо И.Г. | 150, 157 |
| Левин И.В. | 49 |
| Леженникова Д.А. | 248 |
| Летунов А.А. | 196, 222 |
| Лешов Н.В. | 109, 274 |
| Лиджигоряев С.Д. | 275 |
| Лизунов А.А. | 113, 114, 119 |
| Лисица В.С. | 181 |
| Лисовой П.Д. | 49, 93, 105, 112, 122, 123 |
| Лобаев М.А. | 170 |
| Лобанова Л.Г. | 262, 263, 264 |
| Лобачев А.М. | 256 |
| Лобок М.Г. | 147 |
| Логвиненко В.П. | 196, 222 |
| Логинов А.А. | 94, 111 |
| Логинов И.Н. | 256, 280 |
| Логунов А.А. | 220 |
| Лоза О.Т. | 245, 246 |
| Ломов А.А. | 140 |
| Лосева Т.В. | 179 |
| Лубяко Л.В. | 108, 119 |
| Лукаш В.Э. | 87 |
| Лукашевский М.В. | 86, 215, 237 |
| Лукьянов В.В. | 111 |
| Лукьянов К.С. | 236 |
| Лутченко А.В. | 49 |
| Лучкин А.Г. | 199 |
| Лыков В.А. | 143 |
| Лысенко С.Е. | 67, 70 |
| Люблинский И.Е. | 132 |
| Ляхов А.Н. | 179 |

М

| | |
|-----------------|----------|
| Макаров А.М. | 298 |
| Макаров М.А. | 209 |
| Манзук М.В. | 251, 261 |
| Маринин Г.В. | 300 |
| Маркин А.В. | 300 |
| Мартазов Е. С. | 286 |
| Мартыненко Ю.В. | 225, 229 |
| Мартынова И.А. | 180 |

| | |
|-----------------|--|
| Мартьянов А.К. | 204 |
| Марчий Г.В. | 298, 300 |
| Маслаков И.Д. | 178 |
| Мастюк Д.А. | 231 |
| Маханьков Н.А. | 300 |
| Машункин М.В. | 49 |
| Медведев О.С. | 271, 298 |
| Медников А.А. | 50, 283 |
| Мейстер А.К. | 113, 117 |
| Мельник А.Д. | 47, 92, 269 |
| Мельников А.В. | 55, 70, 79, 110, 130 |
| Мельников Н.А. | 115 |
| Мещанинов С.А. | 276 |
| Мещеряков А.И. | 95, 96 |
| Микляев С. М. | 251, 261 |
| Минаев В.Б. | 47, 59, 83, 84, 92, 106, 126, 133, 134 |
| Минашин П.В. | 97 |
| Минбаев М.Э. | 298, 301 |
| Мингалеев А.Р. | 159 |
| Минеев А.Б. | 47, 49, 84, 92 |
| Мирнов С.В. | 98, 109, 132 |
| Миронов А.Ю. | 265, 268 |
| Миронов М.И. | 269 |
| Миронова Е.Ю. | 265, 268 |
| Мирошников И.В. | 47, 59, 83, 84, 92, 133, 134 |
| Мисников В.Е. | 223, 225, 229 |
| Митрофанов К.Н. | 148, 154 |
| Михайлов М.И. | 81 |
| Михалев И.М. | 268 |
| Модестов В.С. | 256, 271, 280, 298 |
| Модяев А.Л. | 49 |
| Мозговой А. | 155 |
| Моисеев Д.В. | 72 |
| Мокеев А.Н | 269, 298, 300 |
| Мокеев М.А. | 198 |
| Мокшин А.В. | 173 |
| Молчанов Д.С. | 111 |
| Монтак Н.В. | 266 |
| Морозов А.А. | 303 |
| Морозов В.А. | 109 |
| Морозова М.Б. | 182, 184 |

| | |
|-----------------|--|
| Моряков И.В. | 244, 247 |
| Москаленко И.В. | 187 |
| Москвин П.В. | 198 |
| Муравьева Е.А. | 236, 267 |
| Мурахтин С.В. | 72 |
| Мурачев М.М. | 274 |
| Мурсенкова И.В. | 224 |
| Мустафин Н.А. | 49 |
| Мухин Е.Е. | 47, 71, 116, 134, 238, 252, 271, 298, 300, 301, 302 |
| Мязин А.С. | 267 |
| Мялтон Т.Б. | 49 |

Н

| | |
|-----------------|---------------------|
| Наволоцкий А.С. | 269 |
| Нагель М.Ю. | 225 |
| Нагель Н.Н. | 181, 187 |
| Наговицын А.А. | 99 |
| Нагорный Н.В. | 265, 268, 294 |
| Немец А.Р. | 49, 58, 100, 132 |
| Немцев Г.Е. | 294 |
| Несеневич В.Г. | 269 |
| Нестеренко В.М. | 268 |
| Неудачин С.В. | 100, 102 |
| Нечаев К.А. | 212 |
| Никитенко С.А. | 238, 252 |
| Никишин А.В. | 101, 115 |
| Николаев А.В. | 49 |
| Николаев А.В. | 299 |
| Николаев А.И. | 268 |
| Николаенко К.О. | 71, 298 |
| Никонов А.М. | 216 |
| Никулин Б.И. | 270 |
| Никулин В.А. | 61 |
| Никулин В.Я. | 155 |
| Новиков В.Н. | 49, 102 |
| Новиков Д.С. | 124, 128 |
| Новиков Л.А. | 176, 182, 184 |
| Новохацкий А.Н. | 47, 71, 92, 134 |
| Ноткин Г.Е. | 49, 289 |
| Нугаев И.Р. | 196 |
| Нургалиев М.Р. | 49, 70 |

О

| | |
|-----------------|---------------|
| Образцов И.С. | 49 |
| Обрезков О.И. | 223, 225, 229 |
| Обудовский С.Ю. | 254, 259, 286 |
| Овсиенко А.И. | 278 |
| Огинов А.В. | 144, 155, 226 |
| Олейник Г.М. | 148, 154 |
| Ольховская О.Г. | 189 |
| Онуфриев С.В. | 233, 234 |
| Орешонок В.В. | 68 |
| Орлов М.Ю. | 177 |
| Орловский Д.А. | 292 |
| Орловский И.И. | 303 |
| Отрощенко В.Г. | 109 |

П

| | |
|------------------|--|
| Павлов В.Н. | 102 |
| Павлов С.И. | 176, 182, 184 |
| Павлова Г.С. | 273 |
| Панкратенко А.В. | 254, 272, 286 |
| Панкратьев П.А. | 271, 298 |
| Панфилов Д.С. | 49, 58, 291 |
| Панченко А.Н. | 193 |
| Паркевич Е.В. | 164, 183, 226 |
| Паршутин Е.В. | 260 |
| Парышкин Ю.А. | 286 |
| Пастухов А.В. | 149 |
| Пастухов В.П. | 38 |
| Патрикеев В.Е. | 300 |
| Патров М.И. | 47, 83, 92, 133 |
| Пенязьков О.Г. | 40 |
| Перваков К.С. | 149 |
| Перегудов Д.В. | 237 |
| Петров А.В. | 47, 92, 126 |
| Петров В.Г. | 274 |
| Петров М.П. | 269 |
| Петров С.Я. | 269 |
| Петров Ю.В. | 47, 59, 71, 83, 84, 92, 106, 126, 133, 134 |
| Петров Ю.В. | 109 |
| Петрова Н.П. | 109 |
| Пивоваров П.А. | 204 |
| Пикуз С.А. | 142, 156, 159 |
| Пименов И.С. | 49, 76, 100, 102, 105 |

| | |
|-------------------|----------------------------|
| Пинженин Е.И. | 113, 119 |
| Пискарев Д.В. | 300 |
| Пискарев И.М. | 227 |
| Пискарев П.Ю. | 266 |
| Плоскирев Е.Г. | 292 |
| Поддубный И.И. | 260, 270, 299 |
| Подковыров В.Л. | 236 |
| Позняк И.М. | 275 |
| Полосаткин С.В. | 115, 116, 278 |
| Полякова В.А. | 243, 247 |
| Пономарев И.В. | 157 |
| Пономаренко А. М. | 47, 59, 83, 91, 92, 126 |
| Попов А.Ю. | 48, 99 |
| Попов В.А. | 253 |
| Попов Л.Г. | 282 |
| Попов Н.А. | 228 |
| Попов С.С. | 209 |
| Портнов Д.В. | 280, 286, 296, 304 |
| Портоне С.С. | 265, 268, 279 |
| Поступаев В.В. | 101, 115 |
| Потапов В.Н. | 142 |
| Пришвицын А.С. | 109 |
| Приходько В.В. | 113, 114 |
| Протас Р.В. | 231 |
| Проценко Д.Е. | 303 |
| Пташкина А.Н. | 279 |
| Пузырев В.Н. | 151 |
| Пустовитов В.Д. | 65 |
| Путрик А.Б. | 260, 270, 299 |
| Пушина А.В. | 275 |

Р

| | |
|-----------------|----------|
| Раваев А.А. | 245, 246 |
| Радищев Д.Б. | 170 |
| Раздобарин А.Г. | 271, 298 |
| Разуменко Д.В. | 60 |
| Ральченко В.Г. | 204 |
| Ращенко В.В. | 68, 120 |
| Ревякин П.А. | 272, 294 |
| Резаева А.Д. | 244 |
| Резанов Д.А. | 301 |
| Ровенских А.Ф. | 101, 115 |
| Рогов А.В. | 303 |
| Рогожин В.И. | 245, 246 |

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Рогозин К.А. | 86, 103, 135, 208, 215, 237 |
| Родин И.Ю. | 50, 84, 106, 283 |
| Родионов А.А. | 144, 155, 226 |
| Родионов Н.Б. | 276 |
| Родионова В.П. | 276 |
| Рожанский В.А. | 71, 91 |
| Рой И.Н. | 49, 76, 102, 105 |
| Романников А.Н. | 49 |
| Романова В.М. | 158, 159 |
| Рошаль А.Г. | 251 |
| Рукина Ю.И. | 225, 229 |
| Румянцев В.И. | 278 |
| Рупасов А.А. | 142, 160 |
| Рыжаков В.В. | 148, 154 |
| Рыжаков Д.В. | 49, 67, 135, 289, 290 |
| Рыжанков И.С. | 256 |
| Рыжков Г.А. | 253 |
| Рябов В.А. | 226 |

С

| | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| Саакян А.Т. | 151 |
| Савватимский А.И. | 233, 234 |
| Савельев А.Б. | 232 |
| Савельев Т.А. | 136 |
| Савельев-Трофимов А.Б. | 160 |
| Савин А.Ю. | 199 |
| Савинов С.А. | 203 |
| Савинов С.Ю. | 156 |
| Саврухин П.В. | 49, 93, 105, 112, 122, 123, 277 |
| Садовничий Д.Н. | 177 |
| Сазонов А.С. | 224 |
| Самойлов И.С. | 144 |
| Самсонов Д.С. | 298, 300, 301 |
| Самцов Д.А. | 209, 231 |
| Сандалов Е.С. | 209 |
| Санин А.Л. | 255, 281 |
| Саранча Г.А. | 55, 78, 104, 110, 130 |
| Сарычев Д.В. | 49, 132, 292 |
| Сасин М.Э. | 221 |
| Сатунин С.Н. | 241 |

| | |
|--------------------|--|
| Сафронов А.А. | 171 |
| | 47, 59, 71, 83, 84, 92, 106, 126, 133, 134 |
| Сахаров Н.В. | 260, 270, 299 |
| Свириденко М.Н. | 89 |
| Сдвиженский П.А. | 102 |
| Севастьянов С.А. | 256, 280 |
| Селезнев П.А. | 251, 261 |
| Семенов А.И. | 278 |
| Семенов А.М. | 279 |
| Семенов Е.В. | 272 |
| Семенов Т.И. | 262, 263 |
| Семенов-Шефов М.А. | 265, 268 |
| Семёнов И.Б. | 265, 268 |
| Семёнов О.И. | 302 |
| Сениченков В.А. | 71 |
| Сениченков И.Ю. | 57, 88, 221, 293 |
| Сергеев В.Ю. | 49, 58, 104, 292 |
| Сергеев Д.С. | 256, 280 |
| Серемин В.В. | 160 |
| Сивко А.И. | 101, 115 |
| Сидоров Е.Н. | 195 |
| Симончик Л.В. | 264 |
| Синельников Д.Н. | 209, 231 |
| Синицкий С.Л. | 44 |
| Скалыга В.А. | 45, 131 |
| Скворцова Н.Н. | 161 |
| Скобляков А.В. | 115 |
| Сковородин Д.И. | 88 |
| Скоков В.Г. | 56, 107 |
| Скопинцев Д.А. | 47, 92, 133 |
| Скрекель О.М. | 116 |
| Скуратов Е.Н. | 164 |
| Смазнова Х.Т. | 60 |
| Смирнов А.И. | 49 |
| Смирнов В.В. | 298, 301 |
| Смирнов Г.В. | 38 |
| Смирнов Д.В. | 279 |
| Смирнов П.В. | 177, 189 |
| Смирнова А.Р. | 271, 298 |
| Смирнова Е.П. | 188 |
| Смирнова К.В. | 118 |
| Смоляков А.И. | 119 |
| Смолякова О.Б. | 298, 300 |
| Снигирев Л.А. | |

| | |
|------------------|---------------------------|
| Соколов А.С. | 196 |
| Соколов Л.В. | 143 |
| Соколов М.М. | 80, 135 |
| | 108, 113, 114, 117 |
| Солдаткина Е.И. | 251, 261 |
| Соленый А.А. | 300 |
| Солк С.В. | 47, 71, 92, 116, 298 |
| Соловей В.А. | 49, 58, 292 |
| Соловьёв Н.А. | 256, 280 |
| Соломатин Б.Н. | 47, 66, 82, 108, 113, 119 |
| Соломахин А.Л. | 151 |
| Соломянная А.Д. | 47, 83, 92, 133, 134 |
| Солоха В.В. | 68 |
| Сорокин А.В. | 43 |
| Сорокина Е.А. | 256, 278, 280 |
| Сорокина Н.В. | 211 |
| Сороковых Д.Е. | 298 |
| Сотников А.В. | 255, 281 |
| Сотников О.З. | 190, 248 |
| Спицын А.В. | 238, 252, 298 |
| Старовойтов Е.А. | 151 |
| Стародуб А.Н. | 231 |
| Старостенко Д.А. | 209 |
| Степанов В.Д. | 211, 212, 235 |
| Степанов И.Г. | 190 |
| Степанов Н.О. | 286, 294 |
| Степанов С.Б. | 196 |
| Степахин В.Д. | 49, 135 |
| Степин А.В. | 219 |
| Стрелков В.В. | 219 |
| Стрелков П.С. | 177 |
| Стрижаков М.Г. | 77, 121, 127, 129 |
| Ступишин Н.В. | 279 |
| Ступишин Н.В. | 256, 278, 280 |
| Субботин Д.И. | 177 |
| | 220 |
| Судников А.В. | 191, 192 |
| Сульдин В.А. | 49, 103, 135, 289 |
| Суляев Ю.С. | 49, 289 |
| Сунчугашев К.А. | |
| Сурконт О.С. | |
| Сухов А.Е. | |
| | |
| Сушков А.В. | |
| Сычугов Д.Ю. | |

Т

| | |
|-------------------|--|
| Тай Е.М. | 282 |
| Тактакишвили И.М. | 244 |
| Танаев А.В. | 261 |
| Танчук В.Н. | 84 |
| Тарасенко В.Ф. | 193 |
| Тарасян К.Н. | 49, 289 |
| Таскаев А.С. | 256, 278 |
| Татаринов А.В. | 194 |
| Тельнова А.Ю. | 47, 59, 83, 92, 133, 134 |
| Тебекин В.И. | 49, 93, 105, 112, 122, 123 |
| Теплова Н.В. | 83, 124, 128 |
| Терентьев Д.В. | 300 |
| Терещенко И.Б. | 298, 300 |
| Тиликин И.Н. | 142, 155, 156, 159 |
| Тимофеев И.В. | 174 |
| Тимохин В.М. | 57 |
| Тимченко Н.Н. | 125 |
| Титов А.Ю. | 172, 194 |
| Ткаченко Е.Е. | 47, 71, 92, 133, 134, 298 |
| Ткаченко С.И. | 189 |
| Токарев В.А. | 47, 83, 92, 133 |
| Токарев А.Ю. | 126 |
| Толкачев Д.В. | 260 |
| Толкачев М.С. | 77, 121, 127, 129 |
| Толпегина Ю.И. | 49, 57, 291 |
| Толстяков С.Ю. | 47, 71, 92, 116, 133, 134, 271, 298, 300 |
| Топорков Д.А. | 275 |
| Трапезников А.Г. | 276 |
| Трофимов В.А. | 84 |
| Трошин Г.А. | 124, 128 |
| Трубников А.С. | 293 |
| Тугаринов С.Н. | 273 |
| Тукачинский А.С. | 60 |
| Тюхменева Е.А. | 47, 83, 92, 133, 134 |

У

| | |
|-----------------|-----|
| Ульяницкий В.В. | 299 |
| Урвачев Е.М. | 179 |

| | |
|------------------|----------------------|
| Усачёнок М.С. | 195 |
| Устинов А.Л. | 282, 283 |
| Устиновский Н.Н. | 164 |
| Устюжанин В. О. | 77, 121, 127, 129 |

Ф

| | |
|-----------------|--|
| Файрушин И.И. | 173 |
| Федоров В.А. | 286 |
| Федорова И.А. | 204 |
| Федорович С.Д. | 86, 208, 215, 237, 262, 263, 267 |
| Федотов П.В. | 204 |
| Федянин А.О. | 150 |
| Филатов О.Г. | 84, 106 |
| Филимонова Е.А. | 217 |
| Филипенко Д.Р. | 97 |
| Филиппов С.В. | 47 |
| Финашин Р.А. | 255 |
| Фирсов А.А. | 197 |
| Фокин А.П. | 282 |
| Франк А.Г. | 203 |
| Фридрихсен Д.С. | 254, 286 |
| Фролов А.А. | 145 |
| Фролов А.Ю. | 139, 162 |
| Фролов И.Н. | 148 |

Х

| | |
|------------------|------------------------------|
| Хайрутдинов Р.Р. | 56, 87, 107 |
| Хайрутдинов Э.Н. | 49, 56, 80, 107, 135, 289 |
| Ханаева Р.А. | 81 |
| Харлачев Д.Е. | 202 |
| Харчев Н.К. | 55, 110, 130, 131 |
| Хатуева М.Д. | 243, 297 |
| Хвостенко А.П. | 49 |
| Хвостенко П.П. | 49 |
| Хилькевич Е.М. | 47 |
| Хильченко А.Д. | 72 |
| Химич Д.В. | 143 |
| Химченко Л.Н. | 46 |
| Хирьянова А.И. | 183, 226 |
| Хирьянов Т.Ф. | 226 |
| Хомяков С.Э. | 299 |
| Храменков А.В. | 93, 105, 112, |

| | |
|---------------|------------------------|
| | 122, 303 |
| Хромов Н.А. | 47, 83, 91, 92, 133 |
| Худолей А.Л. | 300 |
| Хусаинов Т.А. | 82, 108 |

Ц

| | |
|---------------|----------|
| Цымбалов И.Н. | 160, 232 |
|---------------|----------|

Ч

| | |
|--------------------|---------------------------|
| Чан Куанг В. | 86, 208, 215, 237, 267 |
| Чебурова А.В. | 299 |
| Черепанов Д.Е. | 253 |
| Черкез Д.И. | 190 |
| Чернаков А.П. | 271, 298 |
| Чернаков П.В. | 271, 298, 300 |
| Черноизюмская Т.В. | 221 |
| Черноштанов И.С. | 64, 121, 127 |
| Чернышев Ф.В. | 47, 92, 269 |
| Чесноков А.В. | 178 |
| Чилин М.С. | 208, 237 |
| Чиннов В.Ф. | 267 |
| Чирков А.Ю. | 139, 162 |
| Чувакин П.А. | 66 |
| Чудеснов А.И. | 49 |
| Чудин Н.В. | 38 |
| Чукашев Н.В. | 65 |

Ш

| | |
|-------------------|--|
| Шабашов А.Ю. | 273 |
| Шабунин Е.В. | 256, 280 |
| Шагалкин Ю.В. | 51 |
| Шагниев О.Б. | 280 |
| | 44, 66, 70, 74, 75, 82, 108, 119, 167, 175 |
| Шалашов А.Г. | |
| Шапотковский Н.В. | 102 |
| Шарафеева С.Р. | 256 |
| Шаров И.А. | 221 |
| Швыдкий Г.В. | 216 |
| Шевелев А.Е. | 47 |
| Шевчук С.Л. | 225, 229 |
| Шелегеда И.А. | 55, 110 |
| Шелковенко Т.А. | 142, 156, 159 |
| | 49, 94, 111, 132, 284, 289 |
| Шелухин Д.А. | |
| Шемахин А.Ю. | 185 |

| | |
|-------------------|--|
| Шер Е.С. | 299 |
| Шергин Д.А. | 60 |
| Шереметьев К.Ю. | 177 |
| | 49, 93, 105, 112, 122, 123, 290, 303 |
| Шестаков Е.А. | |
| Шин В.И. | 198 |
| Ширяев В.Н. | 171 |
| | 47, 178, 255, 281 |
| Шиховцев И.В. | |
| Шиянков С.В. | 256, 280 |
| Шмигельский Е.А. | 113, 114 |
| Шмитов Р.Ю. | 269 |
| | 253, 256, 278, 280 |
| Шошин А.А. | |
| Шпаков К.В. | 155, 226 |
| Шпатаковская Г.В. | 186 |
| Шувалова Л.К. | 60 |
| Шулятьев К.Д. | 47, 92 |
| Шуровский Д.О. | 181, 187 |
| Шутов А.В. | 164 |
| Шутьев О.Л. | 223, 225, 229 |
| Шушлебин А.Н. | 143 |

Щ

| | |
|--------------|---------------------------------|
| Щеголев П.Б. | 47, 59, 83, 84, 92, 133, 134 |
| Щербак А.Н. | 109 |

Э

| | |
|--------------|----------|
| Эпштейн И.Л. | 172, 194 |
|--------------|----------|

Ю

| | |
|------------|----------|
| Юхнов Н.М. | 286, 294 |
| Юров В.Ю. | 204 |

Я

| | |
|-------------|----------------------------|
| Яницын Д.В. | 176 |
| Яшин А.Ю. | 47, 59, 83, 91, 92, 126 |
| Яхин Р.А. | 141, 146, 163 |

ООО «Издательство МБА»
Москва, ул. Рождественка,
д.12/1, стр.1, оф. 8-11.
Тел.:(495)726 31 69
e-mail: izmba@yandex.ru

Составитель и заказчик
АО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН
Подписано в печать 01.02.2024
Печать офсетная.
Бумага офсетная 65г/м²
Тираж 500 экз.
Заказ № 109