

**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»**

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

**L МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗВЕНИГОРОДСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И
УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ
ICRAF-2023**

20 – 24 марта 2023 г.

г. Звенигород

СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ

Финансовая поддержка:

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

Москва, 2023

УДК 533.9
PACS 52.20-52.75
ББК 22.333
М43

**L Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу
20 – 24 марта 2023 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов.
М.: АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2023 г. – 346 с.**

В сборник включены тезисы докладов по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, представленные на L 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 978-5-6042115-8-8

© АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН»
© Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
© Авторы, 2023

**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

**L International Zvenigorod Conference
on Plasma Physics and Controlled Fusion
ICPAF-2023**

March 20-24, 2023

Zvenigorod

BOOK OF ABSTRACTS

Financial Support

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

Moscow, 2023

PACS 52.20–52.75

**L International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion.
March 20-24, 2023, Zvenigorod. Book of Abstracts
Moscow: Science and Technology Center PLASMAIOFAN, 2022– pp. 346**

This book includes the abstracts on plasma physics and controlled fusion presented at the **L International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion** in 2023 (**ICPAF-2023**) 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, 2023

ISBN 978-5-6042115-8-8

Программный комитет

- Ильгисонис В. И. член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, Госкорпорация «Росатом», председатель
- 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
- 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»
- Гребенщиков С.Е. кандидат физико-математических наук, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН
- 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, 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, акционерное общество «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
Гаспарян Ю.М.	кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
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
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»
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 L Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС

Разделы, авторы и названия докладов	Страницы
ОБЗОРНЫЕ ДОКЛАДЫ	41-57
Иванов В.А. (<i>ИОФ РАН, г. Москва, Россия</i>) 50 ЛЕТ ИСТОРИИ МЕЖДУНАРОДНОЙ ЗВЕНИГОРОДСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ	41
^{1,2,3} Лисица В.С., ¹ Кузнецова Л.К., ^{1,2,3} Кукушкин А.Б. (¹ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, ² НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия, ³ МФТИ (НИУ), г. Москва, Россия) К 120-ЛЕТИЮ МИХАИЛА АЛЕКСАНДРОВИЧА ЛЕОНТОВИЧА	42
^{1,2,3} Кукушкин А.Б., ^{1,2,3} Лисица В.С. (¹ НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, ² НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия, ³ МФТИ (НИУ), г. Москва, Россия) К 100-ЛЕТИЮ ВЛАДИМИРА ИЛЬИЧА КОГАНА	43
Бахарев Н.Н., Балаченков И.М., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Забродский В.В., Ильясова М.В., Киселев Е.О., Корнев В.А., Курские Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Миронов М.И., Мирошников И.В., Петров Ю.В., Пономаренко А.М., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Токарев В.А., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е., Щеголев П.Б., Яшин А.Ю. (<i>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия</i>) ТРАНСПОРТ И ПОТЕРИ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ, ИНИЦИИРОВАННЫЕ ТОРОИДАЛЬНЫМИ АЛЬФВЕНОВСКИМИ МОДАМИ НА ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М/М2	44
¹ Минаев В.Б., ¹ Гусев В.К., ¹ Петров Ю.В., ¹ Сахаров Н.В., ² Багрянский П.А., ¹ Балаченков И.М., ¹ Бахарев Н.Н., ³ Бондарчук Э.Н., ¹ Варфоломеев В.И., ¹ Воронин А.В., ³ Воронова А.А., ¹ Дьяченко В.В., ¹ Горяинов В.А., ⁴ Жилин Е.Г., ¹ Жильцов Н.С., ¹ Ильясова М.В., ³ Кавин А.А., ¹ Киселев Е.О., ¹ Коновалов А.Н., ⁵ Коньков А.Е., ⁵ Корнев П.С., ¹ Корепанов П.А., ¹ Крикунов С.В., ¹ Курские Г.С., ³ Лобанов К.М., ¹ Мельник А.Д., ³ Минеев А.Б., ¹ Мирошников И.В., ¹ Новохацкий А.Н., ¹ Патров М.И., ⁶ Петров А.В., ⁶ Пономаренко А.М., ¹ Скрекель О.М., ¹ Солоха В.В., ² Соломахин А.Е., ³ Танчук В.Н., ¹ Тельнова А.Ю., ¹ Ткаченко Е.Е., ¹ Токарев В.А., ¹ Толстяков С.Ю., ¹ Тюхменева Е.А., ¹ Хилькевич Е.М., ¹ Хромов Н.А., ¹ Чернышев Ф.В., ¹ Шевелев А.Е., ² Шиховцев И.В., ¹ Шулятьев К.Д., ¹ Щеголев П.Б., ^{1,6} Яшин А.Ю. (¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ² ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ³ АО "НИИЭФА", г. Санкт- Петербург, Россия; ⁴ ООО Иоффе Фьюжн Текнолоджи, г. Санкт- Петербург, Россия; ⁵ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ⁶ СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия) ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ПЛАЗМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2	45
Шиховцев И.В. (<i>ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия</i>) РАЗРАБОТКА АТОМАРНЫХ ИНЖЕКТОРОВ В ИЯФ СО РАН	46
<u>Скалыга В.А.</u> , Голубев С.В., Изотов И.В., Выбин С.С., Киселёва Е.М., Поляков А.В., Разин С.В. (<i>ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия</i>) СИЛЬНОТОЧНЫЕ ЭЦР ИСТОЧНИКИ ПРОТОНОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ	47

- ¹Василяк Л.М., ²Кудрявцев Н.Н., ³Костюченко С.В. (¹ОИВТ РАН, г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Москва, Россия; ³НПО "ЛИТ", г. Москва, Россия) 48
СОЗДАНИЕ МОЩНЫХ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДЫ И ВОЗДУХА
- Аржанников А.В. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 49
РЕЛАКСАЦИЯ КИЛОАМПЕРНОГО РЭП В ПЛАЗМЕ - 50 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ
- ^{1,2}Андреев Н.Е. (¹ОИВТ РАН, г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Москва, Россия) 50
ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
- Хазанов Е.А., Шайкин А.А., Костюков И.Ю., Гинзбург В.Н., Мухин И.Б., Яковлев И.В., Соловьев А.А., Кузнецов И.И., Миронов С.Ю., Коржиманов А.В., Буланов Д.Н., Шайкин И.А., Кочетков А.А., Кузьмин А.А., Мартьянов М.А., Ложкарев В.В., Стародубцев М.В., Литвак А.Г., Сергеев А.М. (ИИФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия) 51
ПРОЕКТ XCELS: УНИКАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СВЕТА, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ
- Химченко Л.Н., Красильников А.В. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 52
ИТЭР. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ УРОКИ
- ^{1,2,3}Глазырин С.И., ^{1,3}Урвачев Е.М., ^{3,1}Блинников С.И. (¹ВНИИА им. Н.Л. Духова», г. Москва, Россия; ²ФИАН, г. Москва, Россия; ³НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 53
СВЕРХНОВЫЕ КАК СРЕДСТВО ИЗУЧЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ
- Красильников А.В., Коновалов С.В., Кашук Ю.А. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 54
СТАТУС РАЗРАБОТКИ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ
- Анашкин И.О., ¹Бондарчук Э.Н., Горбунов А.В., Земцов И.В., Кирнева Н.А., Ковалишин А.А., Кочин В.А., Крупин В.А., Лавренюк П.И., Левин И.В., Лутченко А.В., ¹Минеев А.Б., Модяев А.Л., Мустафин Н.А., Николаев А.В., Ноткин Г.Е., Пименов И.С., ²Романников А.Н., Рой И.Н., Соколов М.М., Сушков А.В., Хайрутдинов Э.Н., Хвостенко А.П., Хвостенко П.П., Чудеснов А.И., Чудновский А.Н. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ¹НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия; ²ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия) 55
СТАТУС ТОКАМАКА Т-15МД
- Норман Г.Э., Сайтов И.М. (ОИВТ РАН, г. Москва, Россия; НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия; МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия) 56
ПЛАЗМЕННЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД
- Gryaznevich M. (Tokamak Energy Ltd., Abingdon, UK) 57
SPHERICAL TOKAMAK PATH TO FUSION – HISTORY AND THE NEXT STEP

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»**

61-141

- Коробко Д.Д., Тимохин В.М., Сергеев В.Ю., Богданов А.М. (СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия) 61
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЕВОЙ СТРУИ С
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ ТОКАМАКА
- Ануфриев Е.А., Сергеев В.Ю., Тимохин В.М., Шаров И.А. (СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия) 62
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ
ТОКАМАКА «ГЛОБУС-М2» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЖЕКЦИИ
НЕЙТРАЛЬНОГО ГЕЛИЯ
- Полозова П.А., Баткин В.И., Беклемишев А.Д., Иванов И.А., Куклин К.Н.,
Куркучев В.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф. (ИЯФ СО РАН, г.
Новосибирск, Россия) 63
УПРАВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОМ ПЛАЗМЫ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ
МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-NB
- Баркалов Е.Е., Баркалов К.Е., Длугач Е.Д., Ерёмин В.А., Панасенков А.А. (НИЦ
«Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 64
РАСЧЕТ МОЩНОСТНЫХ НАГРУЗОК ОТ ПУЧКА НА КОМПОНЕНТАХ
ТРАКТА ИНЖЕКТОРА И НА СТЕНКЕ КАМЕРЫ ТОКАМАКА Т-15МД
- ^{1,2}Третинников П.В., ¹Гусаков Е.З., ²Neuraux S. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²Institut Jean Lamour CNRS, Univ. de Lorraine, Nancy, France) 65
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ В НЕЛИНЕЙНОМ
РЕЖИМЕ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ
- ^{1,2}Саранча Г.А., ¹Драбинский М.А., ¹Елисеев Л.Г., ^{1,2}Крохалев О.Д., ^{1,2,3}Мельников
А.В., ^{1,2}Науменко П.Р., ⁴Хабанов Ф.О., ^{1,5}Харчев Н.К. (¹НИЦ «Курчатовский
институт», г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³НИЯУ
МИФИ, г. Москва, Россия; ⁴University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA;
⁵ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 66
ДАЛЬНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА
ПЕРИФЕРИИ ПЛАЗМЫ СТЕЛЛАТОРА ТJ-II
- Асеев А.С., Андреев В.Ф., Данилов А.В. Днестровский Ю.Н. (НИЦ
«Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 67
ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФФУЗИИ И СКОРОСТИ
ПИНЧЕВАНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭЦР
НАГРЕВА НА Т-10
- ^{1,2}Шишкова Т.А., ¹Иванов Б. В., ¹Ананьев С. С., ¹Кутеев Б. В. (¹НИЦ
«Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²РХТУ им. Д. И. Менделеева,
г. Москва, Россия) 68
СТЕНДЫ ТРИТИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ТЕРМОЯДЕРНОЙ
УСТАНОВКИ
- ^{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) 69
ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ С
НЕКРУГЛЫМ СЕЧЕНИЕМ К АНАЛИЗУ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В
ТОКАМАКЕ

- Пинженин Е.И., Максимов В.В. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 70
 ДИАГНОСТИКА ПРОДУКТОВ ТЕРМОЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ НА
 УСТАНОВКЕ ГДЛ
- ^{1,2}Соломахин А.Л., ¹Господчиков Е.Д., ¹Лубяко Л.В., ¹Хусаинов Т.А., ¹Шалашов
 А.Г., ^{1,2}Яковлев Д.В. (¹*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*; ²*ИЯФ СО РАН,
 г. Новосибирск, Россия*) 71
 КОЛЛЕКТИВНОЕ ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЙЯНИЕ НА ГДЛ. ПЕРВЫЕ
 РЕЗУЛЬТАТЫ
- ¹Мейстер А.К., ^{1,2}Солдаткина Е.И., ¹Яковлев Д.В. (*ИЯФ СО РАН,
 г. Новосибирск, Россия*; ¹*НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 72
 ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ИЗ УДЕРЖИВАЕМОЙ ПЛАЗМЫ ПО
 РАЗЛИЧНЫМ КАНАЛАМ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ
- ^{1,2}Гороховский Р.Г., ¹Баткин В.И., ¹Куклин К.Н., ^{1,2,3}Полосаткин С.В.,
^{1,3}Поступаев В.В., ¹Ровенских А.Ф., ^{1,3}Сковородин Д.И. (¹*ИЯФ СО РАН, г.
 Новосибирск, Россия*; ²*НГТУ, г. Новосибирск, Россия*; ³*НГУ, г. Новосибирск,
 Россия*) 73
 ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ НА
 УСТАНОВКЕ ГОЛ-NB
- Инжеваткина А.А., Судников А.В., Толкачев М.С., ¹Устюжанин В.О.,
 Черноштанов И.С. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*; ¹*НГУ, г.
 Новосибирск, Россия*) 74
 ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ЧАСТОТНАЯ СТРУКТУРА КОЛЕБАНИЙ В
 ВИНТОВОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА
- ^{1,2}Уласевич Д.Л., ¹Хайрутдинов Р.Р., ¹Лукаш В.Э. (¹*НИЦ «Курчатовский
 Институт», г. Москва, Россия*; ²*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*) 75
 РАСЧЕТ ПОЛОИДАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТОКАМАКА
 МИФИСТ-0
- ^{1,2}Шмигельский Е.А., ¹Лизунов А.А., ^{1,2}Яковлев Д.В. (¹*ИЯФ СО РАН, г.
 Новосибирск, Россия*; ²*НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 76
 ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УДЕРЖАНИЮ ПЛАЗМЫ НА ГДЛ В МАГНИТНОЙ
 КОНФИГУРАЦИИ СО СБЛИЖЕННЫМИ ТОЧКАМИ ОСТАНОВКИ
- 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.
 (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 77
 ПЕРВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ
 ИОНОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ ПРИ КО-ИНЖЕКЦИИ
 ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ В ТОКАМАК ТУМАН-
 3М
- ^{1,2}Белокуров А.А., ¹Аскинази Л.Г., ¹Гусев В.К., ¹Киселев Е.О., ¹Курские Г.С.,
²Петров А.В., ¹Петров Ю.В., ²Пономаренко А.М., ¹Толстяков С.Ю., ²Яшин А.Ю.
 (¹*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*; ²*СПбПУ, г. Санкт-
 Петербург, Россия*) 78
 ИНИЦИИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДА В РЕЖИМ УЛУЧШЕННОГО УДЕРЖАНИЯ
 ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ПРЕДЕЛЬНОГО ЦИКЛА В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М
- ^{1,2}Семёнов А.С., ¹Андреев В.Ф. (¹*НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва,
 Россия*; ²*МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*) 79
 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ
 ОПТИМИЗАЦИИ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ КАМЕРЫ ТОКАМАКА

- Коновалов А.Н., Алтухов А.Б., Гурченко А.Д., Гусаков Е.З., Дьяченко В.В., Есипов Л.А., Лашкул С.И., Попов А.Ю. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 80
КОЛЕБАНИЯ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ В ОМИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ ТОКАМАКА ФТ-2
- ¹Идеал Р., ²Рыжаков Д.В., ^{1,2}Будаев В.П. (¹*НИУ МЭИ, г. Москва, Россия;* ²*НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия*) 81
МНОГОКАНАЛЬНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ТОКАМАКА Т-15МД
- ¹Жильцов Н.С., ¹Курские Г.С., ¹Бахарев Н.Н., ¹Балаченков И.М., ¹Варфоломеев В.И., ¹Воронин А.В., ¹Горяинов В.Ю., ¹Гусев В.К., ¹Киселёв Е.О., ¹Коваль А.Н., ¹Крикунов С.В., ¹Минаев В.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Мухин Е.Е., ¹Новохацкий А.Н., ¹Патров М.И., ¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В., ¹Скрекель О.М., ²Соловей В.А., ¹Солоха В.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю., ¹Тюхменева Е.А., ¹Филиппов С.В., ¹Хромов Н.А., ¹Шулятьев К.Д., ¹Щёголев П.Б., ¹Яшин А.Ю. (¹*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия;* ²*ПНИЯФ им. Б.П. Константинова, НИЦ «Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург, Россия*) 82
ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 В РЕЖИМАХ С НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ
- Шулятьев К.Д., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Дьяченко В.В., Жильцов Н.С., Курские Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Несеневич В.Г., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Солоха В. В., Ткаченко Е.Е., Тельнова А.Ю., Тюхменева Е.А., Чернышев Ф.В., Щёголев П.Б. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 83
ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОННОГО КОМПОНЕНТА НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ КОМПАКТНОГО АНАЛИЗАТОРА CNRA
- Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Ильясова М.В., Киселев Е.О., Корнев В.А., Курские Г.С., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Шулятьев К.Д., Щёголев П.Б. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 84
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2
- ^{1,2}Солоха В.В., ¹Курские Г.С., ^{1,2}Яшин А.Ю., ¹Балаченков И.М., ¹Варфоломеев В.И., ¹Воронин А.В., ¹Горяинов В.Ю., ¹Гусев В.К., ¹Дьяченко В.В., ¹Жильцов Н.С., ¹Киселев Е.О., ¹Минаев В.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Новохацкий А.Н., ¹Петров Ю.В., ²Петров А.В., ²Пономаренко А.М., ¹Сахаров Н.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю., ¹Тюхменева Е.А., ¹Хромов Н.А., ¹Щёголев П.Б. (¹*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия;* ²*СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 85
КЛАССИФИКАЦИЯ КРАЕВЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2
- ^{1,2}Горяинов В.Ю., ¹Воронин А.В. (¹*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия;* ²*СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 86
СОЗДАНИЕ ПОТОКА ГАЗОВОЙ СТРУИ С ПОМОЩЬЮ УСКОРИТЕЛЯ ПЛАЗМЫ

- ¹Пономаренко А.М., ^{1,2}Яшин А.Ю., ²Жильцов Н.С., ²Курские Г.С., ²Минаев В.Б., ¹Петров А.В., ²Петров Ю.В., ²Сахаров Н.В., ²Щеголев П.Б. (¹СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия) 87
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ШИРА СКОРОСТИ МЕТОДОМ РАДИАЛЬНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ
- Пустовитов В.Д., Савин В.Ю. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 88
КОНВЕРСИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ТОКА ПЛАЗМЫ В КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ СРЫВАХ В ТОКАМАКЕ
- ¹¹Минашин П.В., ^{1,2}Кукушкин А.Б. (¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 89
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА ЧАСТОТЕ 140 ГГЦ В ТОКАМАКЕ Т-15МД
- Шувалова Л.К., Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А., Жубр Н.А., Киселев Е.О., Корнев В.А., Лебедев С.В., Разуменко Д.В., Смирнов А.И., Тукачинский А.С. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия) 90
ДИАГНОСТИКА FIDA ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ ПРИ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ НА ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М
- ¹Ткаченко Е.Е., ¹Сахаров Н.В., ¹Курские Г.С., ¹Жильцов Н.С., ¹Мирошников И.В., ¹Петров Ю.В., ¹Минаев В.Б., ¹Бахарев Н.Н., ²Кавин А.А., ¹Киселев Е.О., ²Лобанов К.М., ¹Новохацкий А.Н., ²Минеев А.Б., ¹Солоха В.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Тюхменева Е.А., ¹Хромов Н.А., ¹Щеголев П.Б. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 91
АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НАГРЕВУ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ ДИАМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
- ¹Ханаева Р.А., ²Михайлов М.И. (¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ²НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия) 92
ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМУ ВАКУУМНОЙ МАГНИТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СТЕЛЛАРАТОРЕ
- Судников А.В., Иванов И.А., Инжеваткина А.А., Поступаев В.В., Толкачев М.С., ¹Устюжанин В.О., Черноштанов И.С. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ¹НГУ, г. Новосибирск, Россия) 93
ТЕЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ В ВИНТОВОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРИ ИЗМЕНЯЕМОМ НАПРАВЛЕНИИ ВРАЩЕНИЯ
- ¹Инжеваткина А.А., ¹Судников А.В., ¹Иванов И.А., ²Устюжанин В.О. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия) 94
ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ ВИНТОВОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА
- Лебедев С.В., Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А., Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Мельник А.Д., Разуменко Д.В., Смирнов А.И., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия) 95
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА НА ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М

- ^{1,2}Кукушкин А.Б., ¹Левашова М.Г., ^{1,2}Лисица В.С., ¹Сдвиженский П.А., ¹Шурыгин В.А. (¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 96
 АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА ЛЕГКИХ ПРИМЕСЯХ В ПРИСТЕНОЧНОЙ И ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКОВ
- ^{1,2}Кукушкин А.Б., ¹Куличенко А.А. (¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 97
 ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ КОРРЕЛЯЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ И ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКАХ
- ^{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) 98
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТОКАМАКА Т-15МД НА ОСНОВЕ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ КАНОНИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ
- ¹Крохалев О.Д., ^{1,2}Мельников А.В., Драбинский М.А., Елисеев Л.Г. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия) 99
 ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ ГАМ И ЕЁ САТЕЛЛИТОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10
- ¹Устюжанин В.О., ²Беклемишев А.Д., ²Иванов И.А., ²Инжеваткина А.А., ²Судников А.В., ²Толкачев М.С., ²Христо М.С. (¹НГУ, г. Новосибирск, Россия; ²ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 100
 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ С ГЕЛИКОИДАЛЬНЫМ ПОЛЕМ СМОЛА
- Толпегина Ю.И., Горбунов А.В., ¹Ялынская Н.Д., ¹Тимохин В.М., ¹Сергеев В.Ю., Горшков А.В. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ¹СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия) 101
 КОНЦЕПЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛООВОГО ГЕЛИЕВОГО ПУЧКА ДЛЯ Т-15МД
- Зотов И.В., Вертелецкий Н.В. (МГУ, факультет ВМК, г. Москва, Россия) 102
 ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ТОКА В ТОКАМАКЕ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С УЧЕТОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ
- Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г., Хусаинов Т.А. (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия) 103
 ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КОЛЛЕКТИВНОГО ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ
- Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г. (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия) 104
 О СТРУКТУРЕ КВАЗИОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО ПУЧКА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ОБЛАСТИ О-Х ТРАНСФОРМАЦИИ
- Неудачин С.В., Борщеговский А.А., Пименов И. С. (НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия) 105
 ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СДВИГЕ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА И МОЩНОСТИ ЭЦРН ДО 1.5 МВТ В ТОКАМАКЕ Т-10

- ¹Днестровский Ю.Н., ¹Мельников А.В., ¹Лысенко С.Е., ²Мещеряков А.И., ^{1,2}Харчев Н.К., ²Гребенщиков С.Е., ²Вафин И.Ю., ²Васильков Д.Г., ¹Черкасов С.В., ¹Елисеев Л.Г., ³Сычугув Д.Ю. (¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия; ²ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ³МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия) 106
 СРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В ПЛАЗМЕ С ЭЦ-НАГРЕВОМ НА СТЕЛЛАТОРЕ L-2M И ТОКАМАКЕ T-10
- ¹Ананьев С.С., ¹Иванов Б.В., ^{1,2}Кутеев Б.В., ³Юхимчук А.А. (¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия; ³РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия) 107
 РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ТРИТИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК В РФ
- ¹Ананьев С.С., ¹Нурғалиев М.Р., ²Кукушкин А.С. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия) 108
 РАСЧЕТЫ СОГЛАСОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ДЕМО-ТИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННЫХ УРАВНЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИТИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА
- ¹Иванов Б.В., Иванова Н.А., Меншарапов Р.М., Синяков М.В., Шкандыбина В.В., Ананьев С.С., Фатеев В.Н. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 109
 О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОДОРОДНОГО НАСОСА В ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ ТЯР
- ¹Щербак А.Н., ¹Мирнов С.В., ¹Лазарев В.Б., ¹Джигайло Н.Т., ¹Васина Я.А., ¹Пришвицын А.С., ¹Лешов Н.В., ¹Джурик А.С., ¹Отрощенко В.Г., ¹Антонов П.А., ¹Зорин А.В., ²Вертков А.В., ²Жарков М.Ю. (¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия; ²АО «Красная Звезда», г. Москва, Россия) 110
 СРАВНЕНИЕ ЗАХВАТА ЛИТИЯ ЛИТИЕВЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ РАЗЛИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ В РАМКАХ МОДЕЛИ ЗАМКНУТОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ЛИТИЯ НА ТОКАМАКЕ T-11M
- ¹Балаченков И.М., ¹Бахарев Н.Н., ¹Гусев В.К., ¹Ильясова М.В., ²Коньков А.Е., ²Коренев П.С., ¹Минаев В.Б., ¹Патров М.И., ¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В., ¹Скрекель О.М., ¹Хилькевич Е.М., ¹Шевелев А.Е. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия) 111
 ПУЧОК УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИВОДИТ К ПОЯВЛЕНИЮ SNIPING-НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ
- Пименов И.С., Борщеговский А.А., Новиков В.Н., Павлов В.Н., Рой И.Н., Шапотковский Н.В. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 112
 ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ВВОДУ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ГИРОТРОНА В ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ ТОКАМАКА T-15MD
- ¹Абдуллина Г.И., ¹Аскинази Л.Г., ¹Белокуров А.А., ¹Жубр Н.А., ¹Корнев В.А., ¹Крикунов С.В., ¹Лебедев С.В., ^{1,2}Литвинова Д.И., ¹Мельник А.Д., ¹Разуменко Д.В., ¹Смирнов А.И., ¹Тукачинский А.С., ¹Чернышев Ф.В. (¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия) 113
 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПЛАЗМЫ НА ЦЕНТРАЛЬНУЮ ЭЛЕКТРОННУЮ ТЕМПЕРАТУРУ НА ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М
- Длугач Е.Д., Шленский М.Н. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 114
 ГЕНЕРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ В ПЛАЗМЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ АТОМОВ

- Кичик М.Г., Длугач Е.Д. (*НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 115
ОБРАБОТКА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО ТЕПЛОВЫМ НАГРУЗКАМ В СИСТЕМЕ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
- ^{1,2}Яшин А.Ю., ²Балаченков И.М., ²Жильцов Н.С., ²Курские Г.С., ^{1,2}Киселев Е.О., ²Минаев В.Б., ¹Петров А.В., ²Петров Ю.В., ¹Пономаренко А.М., ²Сахаров Н.В. (¹*СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия*; ²*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 116
ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОКЛАССИЧЕСКОЙ ТИРИНГ-МОДЫ МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ВО ВРЕМЯ СРЫВА ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2
- Киселев Е.О., Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Курские Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М. И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Токарев В.А., Тюхменева Е.А., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Щеголев П.Б. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 117
РАСЧЕТ СИНТЕТИЧЕСКОГО СИГНАЛА АНАЛИЗАТОРА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ КОДА FIDASIM В СФЕРИЧЕСКИХ ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М/М2
- Киселев Е.О., Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Курские Г.С., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М. И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е., Токарев В.А., Тюхменева Е.А., Хромов Н.А., Щеголев П.Б. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 118
РАСЧЕТ МАГНИТНОГО РАВНОВЕСИЯ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ
- Батырев Д.Ю., Алтухов А.Б., Гурченко А.Д., Гусаков Е.З., Есипов Л.А., Кантор М.Ю., Куприенко Д.В., Лашкул С.И. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 119
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МАГНИТНЫХ ОСТРОВОВ В ТОКАМАКЕ ФТ-2 МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В ВЕРХНЕМ ГИБРИДНОМ РЕЗОНАНСЕ
- Трошин Г.А., Теплова Н.В., Гусаков Е.З., Хавин В.Э., Крыжановский А.К., Коновалов А.Н., Дьяченко В.В. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 120
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ В ТОКАМАКЕ С ПОМОЩЬЮ МЕДЛЕННЫХ И БЫСТРЫХ ВОЛН (ГЕЛИКОНОВ) ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА С УЧЕТОМ ДВУМЕРНОГО СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫ
- Хавин В.Э., Теплова Н.В., Гусаков Е.З., Трошин Г.А., Крыжановский А.К. (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 121
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ В ТОКАМАКЕ С ПОМОЩЬЮ МЕДЛЕННЫХ И БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ФОККЕРА-ПЛАНКА
- Пурьга Е.А., Хильченко А.Д., Квашнин А.Н., Иваненко С.В., Зубарев П.В., Хильченко В.А., Моисеев Д.В. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 122
АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ И СБОРА ДАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК

- ¹Иваненко С.В., ¹Соломахин А.Л., ¹Хильченко А.Д., ¹Зубарев П.В., 123
¹Коваленко Ю.В., ^{1,2}Солоха В.В., ^{1,2} Шулятьев К.Д., ¹Пурыга Е.А.,
¹Квашнин А.Н., ¹Багрянский П.А. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия)
 ДИСПЕРСИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2
- ¹Мурахтин С.В., ¹Коробейникова О.А., ¹Багрянский П.А., ¹Яковлев Д.В., 124
²Колесниченко К.С., ²Иванов Р.С. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
²НГУ, г. Новосибирск, Россия)
 ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТАРТОВОЙ ПЛАЗМЫ НА
 УСТАНОВКЕ КОТ
- Мельников Н.А., Сковородин Д.И., Калинин П.В., Полосаткин С.В., 125
 Холопов М.А., Поступаев В.В., Иванов И.А., Маслаков И.Д., Кондаков А.А.,
 Шиховцев И.В. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия)
 МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННЫ И ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА
 ПО НАГРЕВУ ИОНОВ ПО СХЕМЕ МАГНИТНОГО БЕРЕГА В
 ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ УСТАНОВКИ ГОЛ-НВ
- Сковородин Д.И., Калинин П.В., Мельников Н.А., Полосаткин С.В., 126
 Поступаев В.В., Бурдаков А.В. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия)
 РАСЧЕТЫ СХЕМЫ ИЦР-НАГРЕВА ИОНОВ В ГОЛ-НВ МЕТОДОМ
 «МАГНИТНОГО БЕРЕГА»
- Дейчули П.П., Амиров В.Х., Ахметов Т.Д., Белов В.П., Бруль А.В., Вахрушев 127
 Р.В., Горбовский А.И., Давыденко В.И., Дейчули Н.П., Иванов А.А.,
 Капитонов В.А., Колмогоров В.В., Рашенко В.В., Сорокин А.В., Ступишин
 Н.В., Орешонок В.В., Шиховцев И.В. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск,
 Россия)
 МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МОЩНЫЙ АТОМАРНЫЙ ИНЖЕКТОР С
 ТОКОМ ПУЧКА 150 А ДЛЯ НАГРЕВА И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ В
 МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ
- ^{1,2}Аммосов Я.М., ³Хабанов Ф.О., ¹Драбинский М.А., ^{1,2,4}Мельников А.В., 128
¹Елисеев Л.Г., ^{1,5}Харчев Н.К., ¹Лысенко С.Е. (¹НИЦ "Курчатовский
 институт", г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия;
³University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA; ⁴НИЯУ МИФИ, г.
 Москва, Россия; ⁵ИОФ РАН, г. Москва, Россия)
 ДВУМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В
 ОМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10
- ^{1,2}Рогозин К.А., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Федорович С.Д., ^{1,2}Карпов А.В., 129
^{1,3}Кавыршин Д.И., ¹Лукашевский М.В., ¹Губкин М.К., ¹Чан Куанг В.,
^{1,2}Коньков А.А., ^{1,2}Белоусов С.В., ^{1,2}Квасков В.С., ¹Губанова А.И.,
¹Анисимов Д.А., ¹Чилин М.С., ¹Евдокимов О.И., ¹Никулина А.М. (¹НИУ
 МЭИ, г. Москва, Россия; ²НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва,
 Россия; ³ОИВТ РАН, г. Москва, Россия)
 ПАРАМЕТРЫ ИСТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ИЗ СОПЛА
 МАГНИТОПАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ПЛМ-М
- ^{1,2}Шелегеда И.А., ¹Драбинский М.А. (¹НИЦ "Курчатовский институт", г. 130
 Москва, Россия; ²МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ), г. Москва, Россия)
 ВЕРИФИКАЦИЯ ТРЁХМЕРНОЙ МОДЕЛИ КОМПЛЕКСА ТОКАМАКА Т-
 15МД ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ

- Скопинцев Д.А., Мирнов С.В., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р. (*ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия*) 131
РАСЧЁТЫ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТРЕУГОЛЬНОСТЬЮ ДЛЯ УСТАНОВОК Т-15МД И ТРТ
- Саврухин П.В., Шестаков Е.А., Лисовой П.Д., Тепикин В.И., Храменков А.В., Рой И.Н., Пименов И.С. (*НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия*) 132
РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ГИРОТРОНА 82,6 ГГЦ ТОКАМАКА Т-15МД
- ^{1,2,3}Владимиров И.А., ^{1,3}Вершков В.А., ^{1,3}Субботин Г.Ф., ^{1,3}Шелухин Д.А. (¹*НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия;* ²*МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия;* ³*УТС-центр, г. Москва, Россия*) 133
УЧЁТ ВЛИЯНИЯ КОНЕЧНОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ФЛУКТУАЦИЙ НА ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА
- Батырбеков Э.Г., Тажибаева И.Л., Чектыбаев Б.Ж., Ольховик Д.А., Бакланов В.В. (*Национальный ядерный центр Республики Казахстан, г. Курчатов, Республика Казахстан*) 134
КАЗАХСТАНСКИЙ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ ТОКАМАК КТМ. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
- Хайрутдинов Э.Н., Хайрутдинов Р.Р., Докука В.Н., Соколов М.М., Игонькина Г.Б., Качкин А.Г. (*НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия*) 135
РАЗРАБОТКА И СТЕНДОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ Т-15МД
- Мещеряков А. И., Вафин И. Ю., Гребенщиков С.Е., Гришина И.А. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 136
2D И 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ПЛАЗМЫ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКОЙ НА СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М
- Мещеряков А. И., Гришина И.А. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 137
ПРОЯВЛЕНИЕ САМООРГАНИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М В РЕЖИМЕ ЭЦР НАГРЕВА
- ^{1,2}Константинов С.Е., ^{1,2}Беклемишев А.Д. (¹*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия;* ²*НГУ, г. Новосибирск, Россия*) 138
МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛОННОЙ МОДЫ В ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЕ С ПРОВОДЯЩИМИ ТОРЦАМИ
- Колесников Е.Ю. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 139
ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ ДЛЯ ГДЛ НА ОСНОВЕ КОАКСИАЛЬНОГО УСКОРИТЕЛЯ
- Коробейникова О.А., Мурахтин С.В., Багрянский П.А., Яковлев Д.В., Солдаткина Е.И. (*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия*) 140
ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ИОНОВ, ПОКИДАЮЩИХ УСТАНОВКУ ГДЛ С УКОРОЧЕННОЙ МАГНИТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ
- Богданов А.М., Капралов В.Г., Кривошеев А.Н. (*СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия*) 141
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ СРЫВА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Чувакин П.А., Господчиков Е.Д. (<i>ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия</i>)	142
ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ	
ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ «ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ»	
	145-167
Александрова И.В., Корешева Е.Р. (<i>ФИАН, г. Москва, Россия</i>)	145
ФОРМИРОВАНИЕ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ТОПЛИВА В ДВИЖУЩИХСЯ МИШЕНЯХ УДАРНОГО ПОДЖИГА	
Пастухов А.В., Акунец А.А., Перваков К.С., Кувшинов И.Р., Громов А.И., Мордвинцев И.М., Пузырев В.Н., Рупасов А.А., Саакян А.Т., Борисенко Н.Г. (<i>ФИАН, г. Москва, Россия</i>)	146
ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОПЛОТНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ СЕТОК АЦЕНАФТИЛЕНА, АЛЬФА-МЕТИЛСТИРОЛА И ХИТОЗАНА	
Бакуркина Е.С., Борецких Д.В., Дембовский Д.В., Карлыханов Н.Г., <u>Лыков В.А.</u> , Рыкованов Г.Н., Соколов Л.В., Черняков В.Е., Шушлебин А.Н. (<i>РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия</i>)	147
К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ТЕРМОЯДЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МЕГАДЖОУЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 0.35 МКМ И 0.53 МКМ	
Гаранин С.Ф., <u>Долинский В.Ю.</u> (<i>РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия</i>)	148
МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО РАЗВИТИЯ “СОСИСОЧНОЙ” НЕУСТОЙЧИВОСТИ Z-ПИНЧА	
<u>Громов А.И.</u> , Акунец А.А., Борисенко Н.Г., Пастухов А.В., Перваков К.С. (<i>ФИАН, г. Москва, Россия</i>)	149
МОДИФИКАЦИИ УПРОЧНЯЕМЫХ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ НАНОСЛОЁВ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ	
¹ Харрасов А.М., ¹ Крауз В.И., ² Ламзин С.А., ² Додин А.В., ¹ Мялтон В.В., ¹ Ильичев И.В., ³ Медведев М.А. (¹ <i>НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия</i> ; ² <i>ГАИШ МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия</i> ; ³ <i>ФИАН, г. Москва, Россия</i>)	150
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ГАЗА НА СТРУКТУРУ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА	
¹ Бутусов Е.В., ² Гуськов С.Ю., ^{2,3} Кучугов П.А. (¹ <i>НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия</i> ; ² <i>ФИАН, г. Москва, Россия</i> ; ³ <i>ИПМ РАН, г. Москва, Россия</i>)	151
РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОХОЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СЛОИСТУЮ МИШЕНЬ	
Баронова Е.О. (<i>НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия</i>)	152
ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ФОКУСИРУЮЩИХ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОМЕТРОВ	
¹ Вихрев В.В., ¹ Баронова Е.О., ² Фролов А.Ю. (¹ <i>НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия</i> ; ² <i>МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия</i>)	153
О НАГРЕВЕ ИОНОВ В Z-ПИНЧАХ	

- ¹Кологривов А.А., ¹Рупасов А.А., ¹Болховитинов Е.А., ²Стучебрюхов И.А., 154
²Абросимов С.А., ¹Шелковенко Т.А. (¹ФИАН, г. Москва, Россия; ²ИОФ РАН, г. Москва, Россия)
 МЯГКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ
 МИШЕНЕЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
- ¹Кологривов А.А., ¹Рупасов А.А., ¹Болховитинов Е.А., ³Иванов О.П., 155
³Потапов В.Н., ²Стучебрюхов И.А., ²Абросимов С.А. (¹ФИАН, г. Москва, Россия; ²ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ³НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия)
 РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В МЯГКОМ
 РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ С ПОМОЩЬЮ КОДИРУЮЩЕЙ
 АПЕРТУРЫ
- ^{1,3}Гожев Д.А., ^{1,2,3}Бочкарев С.Г., ^{1,2,3}Брантов А.В., ^{1,2,3}Быченков В.Ю. (¹ФИАН, г. Москва, Россия; ²ВНИИА им. Н.Л. Духова, г. Москва, Россия; ³ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия) 156
 ИСТОЧНИК ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ 10 ПВТ
 УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА, ОБЛУЧАЮЩЕГО МИКРО-
 КЛАСТЕРНУЮ СРЕДУ
- Чирков А.Ю., Морхова Е.А., Фролов А.Ю. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия) 157
 МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА БЫСТРЫХ ИОНОВ Z-ПИНЧА ПРИ
 ИСЧЕЗАЮЩЕМ ЭФФЕКТЕ СТОЛКНОВЕНИЙ
- ¹Фролов А.Ю., ¹Чирков А.Ю., ²Вихрев В.В. (¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 158
 ОСОБЕННОСТИ КОНЕЧНОЙ СТАДИИ СЖАТИЯ Z-ПИНЧА
- Грицук А.Н., Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Митрофанов К.Н., Олейник Г.М., Фролов И.Н., ¹Баско М.М., ²Родионов Н.Б., ²Родионова В.П. (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия; ¹ИПМ РАН, г. Москва, Россия; ²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 159
 СПЕКТРАЛЬНАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ
 ГАДОЛИНИЯ, СОЗДАННОЙ ОБЛУЧЕНИЕМ Z-ПИНЧА НА УСТАНОВКЕ
 АНГАРА-5-1
- Грицук А.Н., Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Старцев Г.А. (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия) 160
 ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ Z-
 ПИНЧА С ПОМОЩЬЮ КВАЗИПЛОСКОПОЛЬНОГО СПЕКТРОГРАФА
- Грицук А.Н., Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Ахмеров Е.П. (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия) 161
 ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧА
 ВОЛОКОННО-ВОЛЬФРАМОВЫХ СБОРОК НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1
- Митрофанов К.Н., Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Грицук А.Н., Олейник Г.М., Бездетный К.С. (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия) 162
 ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
 ПРИ ИМПЛОЗИИ ВЛОЖЕННЫХ СБОРОК СМЕШАННОГО СОСТАВА НА
 УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1

Пикуз С.А., Шелковенко Т.А. (ФИАН, г. Москва, Россия) 163
МАЛОГАБАРИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ТОКА ДЛЯ Х-ПИНЧЕЙ

Шелковенко Т.А., Тиликин И.Н., Огинов А.В., Мингалеев А.Р., Романова В.М.,
Пикуз С.А. (ФИАН, г. Москва, Россия) 164
УПРАВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЯМИ, ОБРАЗУЮЩИМИСЯ ПРИ ВЗРЫВЕ
ПЛОСКИХ ФОЛЬГ

^{1,2}Умаров И.Р., ^{1,2}Андреев Н.Е. (¹ОИВТ РАН, г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ),
г. Долгопрудный, Россия) 165
ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОННОГО СГУСТКА ПРИ ЕГО
КИЛЬВАТЕРНОМ УСКОРЕНИИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА
САМОВОЗДЕЙСТВИЯ

¹Белов И.А., ¹Бельков С.А., ¹Бондаренко С.В., ²Вергунова Г.А., ¹Воронин А.Ю., 166
¹Гаранин С.Г., ¹Головкин С.Ю., ²Гуськов С.Ю., ²Демченко Н.Н., ¹Деркач В.Н.,
²Дмитриев Е.О., ³Змитренко Н.В., ¹Илюшечкина А.В., ¹Кравченко А.Г.,
¹Кузьмин И.В., ^{2,3}Кучугов П.А., ¹Мюсова А.Е., ¹Рогачев В.Г.,
¹Рукавишников А.Н., ¹Соломатина Е.Ю., ¹Стародубцев К.В., ¹Стародубцев П.В.,
¹Шаров О.О., ²Яхин Р.А. (¹РФЯЦ-ВНИИЭФ, ИЛФИ, г. Саров, Россия; ²ФИАН, г.
Москва, Россия; ³ИПМ РАН, г. Москва, Россия)
УДАРНАЯ ПЕРЕДАЧА ДАВЛЕНИЯ ТВЁРДОМУ ВЕЩЕСТВУ В МИШЕНИ С
ПОРИСТЫМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО
ИМПУЛЬСА

¹Змитренко Н.В., ²Эркинбеков Ш.К. (¹ИПМ РАН, г. Москва, Россия; ²МФТИ
(НИУ), г. Долгопрудный, Россия) 167
РОЛЬ И ВЛИЯНИЕ ДВУМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В ЧИСЛЕННОМ
МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНО-УСКОРЕННОГО
УДАРНИКА НА ПЛОСКУЮ МИШЕНЬ

ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ

«ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ» 171-223

Апфельбаум Е.М. (ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 171
ЛИНИЯ ЕДИНИЧНОГО ФАКТОРА СЖИМАЕМОСТИ В
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Шпатаковская Г.В. (ИПМ РАН, г. Москва, Россия) 172
ЗАКОНОМЕРНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ ИОНИЗАЦИИ
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ОТ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНОВ n И АТОМНОГО
НОМЕРА ЭЛЕМЕНТОВ Z

Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Панарин В.А., Сорокин Д.А. (ИСЭ СО РАН, г.
Томск, Россия) 173
СОЗДАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ДИФFUЗНЫХ СТРУЙ ПРИ ДАВЛЕНИИ
ВОЗДУХА 0.01-3 ТОРР, ЯВЛЯЮЩИХСЯ АНАЛОГАМИ КРАСНЫХ
СПРАЙТОВ

Выбин С.С., Изотов И.В., Скалыга В.А., Киселёва Е.М., Поляков А.В., 174
Боханов А.Ф. (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия)
ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО ПУЧКА
НА УСТАНОВКЕ GISMO

- ¹Лотоцкий А.П., ¹Грабовский Е.В., ¹Ефремов Н.И., ¹Крылов М.К., 175
¹Панфилов Д.Г., ¹Серяков А.Г., ¹Николашин А.А., ¹Лаухин Я.Н., ²Лукин В.В
(¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия; ²ИПМ РАН, г. Москва, Россия)
ОБРАЗОВАНИЕ ТОКОВОЙ ОБОЛОЧКИ И ЕЕ КОНФИГУРАЦИЯ ПРИ
РАБОТЕ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА НА ДЕЙТЕРИИ И С ЗАМЕЩАЮЩИМИ
ДОБАВКАМИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ
- Брагин Е.Ю., Веселовзоров А.Н., Казеев М.Н., Козлов В.Ф. (НИЦ 176
“Курчатовский институт”, г. Москва, Россия)
ИЗМЕРЕНИЕ ТЯГИ МОЩНЫХ ЭРД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА
- Павлов С.И., Дзлиева Е.С., Голубев М.С., Новиков Л.А., Карасев В.Ю. (СПбГУ, 177
г. Санкт-Петербург, Россия)
ДВОЙНЫЕ ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ
- Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И., Новиков Л.А. (СПбГУ, г. Санкт- 178
Петербург, Россия)
ВРАЩЕНИЕ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В МАГНИТНОМ ПОЛЕ В
УЗКОМ КАНАЛЕ ТОКА
- ¹Голубев М.С., ¹Дзлиева Е.С., ¹Карасев В.Ю., ¹Крылов И.Р., ^{2,3}Майоров С.А., 179
¹Новиков Л.А., ¹Павлов С.И. (¹СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ²ИОФ РАН,
г. Москва, Россия; ³ОИВТ РАН, г. Москва, Россия)
ОСОБЕННОСТИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В СМЕСЯХ ГАЗОВ С НИЗКИМ И
ВЫСОКИМ ПОТЕНЦИАЛАМИ ИОНИЗАЦИИ
- ¹Дудник Ю.Д., ¹Кузнецов В.Е., ¹Сафронов А.А., ¹Ширяев В.Н., ¹Васильева О.Б., 180
^{1,2}Гаврилова Д.А., ^{1,2}Гаврилова М.А. (¹ИЭЭ РАН, г. Санкт-Петербург,
Россия; ²СПбГТУ, г. Санкт-Петербург, Россия)
ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА
ВОЛЬФРАМА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЛАЗМОТРОНА ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА
- Сироткин Н.А., Хлюстова А.В. (ИХР РАН, г. Иваново, Россия) 181
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ПОДВОДНОГО РАЗРЯДА
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ
НАНОМАТЕРИАЛОВ
- Жуков В.И., Карфидов Д.М. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 182
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАЗМЫ В СТОЛБЕ СВЧ РАЗРЯДА,
ПОДДЕРЖИВАЕМОГО СТОЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ
- ¹Коршунов О.В., ^{1,2}Кавыршин Д.И., ^{1,2}Чиннов В.Ф. (¹ОИВТ РАН, г. Москва, 183
Россия; ²НИУ МЭИ, г. Москва, Россия)
ТЕРМОДИФФУЗИОННОЕ ОТНОШЕНИЕ В ТРИНАРНОЙ СМЕСИ С
ИОНИЗАЦИЕЙ. ПЛАЗМА He
- ¹Лебедев Ю.А., ^{1,2}Крашевская Г.В., ¹Батукаев Т.С., ¹Билера И.В. (¹ИНХС РАН, г. 184
Москва, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия)
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВОЛНОВОГО
РАЗРЯДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭТАНОЛА

- Строкин Н.А., Ригин А.В. (*ИрННТУ, г. Иркутск, Россия*) 185
 НЕОЖИДАННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАЖИГАНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО
 РАЗРЯДА В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ
- Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Казеев М.Н., Камин Д.В., Козлов В.Ф., 186
 Кутузов Д.С., Спицын А.В., Сухов А.Е., Шуровский Д.О.,
 Янченков С.В., Жильцов В.А. (*НИИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва,
 Россия*)
 РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ
 ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТНОМ СОПЛЕ
 МАКЕТА БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ
- Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Дрозд А.С., Сергеев Д.С., Сухов А.Е., 187
 Диас Михайлова Д.Е., Жильцов В.А., Хайрутдинов Э.Н. (*НИИЦ «Курчатовский
 институт», г. Москва, Россия*)
 МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ФАЗЫ ИЗ СИГНАЛОВ ГЕТЕРОДИННОГО СВЧ-
 ИНТЕРФЕРОМЕТРА 95 ГГц ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В
 РАЗРЯДАХ НА СТЕНДЕ ПН-3
- Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Камин Д.В., Сухов А.Е., Стрижаков М.Г. (*НИИЦ* 188
«Курчатовский институт», г. Москва, Россия)
 ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА
 ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА СТЕНДЕ ПН-3
- Бунин Е.А., Камин Д.В., Сухов А.Е., Стрижаков М.Г. (*НИИЦ «Курчатовский* 189
институт», г. Москва, Россия)
 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ
 ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АНТЕННО-
 ПЛАЗМЕННОЙ СВЯЗИ
- Андреев В.В., Новицкий А.А. (*РУДН, г. Москва, Россия*) 190
 ИЗУЧЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ СГУСТКОВ, СОЗДАВАЕМЫХ ПРИ
 АВТОРЕЗОНАНСНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ, МЕТОДАМИ
 РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И РЕНТГЕНОГРАФИИ
- ^{1,2}Мартынова И.А., ^{1,2}Иосилевский И.Л. (¹*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия;* ²*МФТИ* 191
(НИУ), г. Долгопрудный, Россия)
 ЭНЕРГИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В АСИММЕТРИЧНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ
 ПЛАЗМЕ В ПРИБЛИЖЕНИИ ПУАССОНА-БОЛЬЦМАНА В СРЕДНЕЙ
 СФЕРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ ВИГНЕРА-ЗЕЙТЦА И В КОРРЕЛЯЦИОННОЙ
 ПОЛОСТИ
- ^{1,2}Поляков А.В., ^{1,2}Изотов И.В., ^{1,2}Скалыга В.А., ^{1,2}Выбин С.С., ^{1,2}Киселёва Е.М., 192
¹Боханов А.Ф. (¹*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия;* ²*НИУ им. Н. И.
 Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*)
 ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР РАЗРЯДА С
 ВЫСОКИМ УДЕЛЬНЫМ ЭНЕРГОВКЛАДОМ
- 193
- 194

- Степанов Н.О., Черкез Д.И., Ананьев С.С., Спицын А.В. (НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия) 195
УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
- ^{1,2} Кашапов Л.Н., ^{1,2}Кашапов Р.Н., ^{1,2} Кашапов Н.Ф., ¹Чебакова В.Ю. (¹КФУ, г. Казань, Россия; ²ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 196
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИЛОЖЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОГО ЭЛЕКТРОДА И ВЫХОД ПРОДУКТОВ В ГАЗОВУЮ ФАЗУ
- Матвеев А.И. (ЮФУ, г. Ростов на Дону, Россия) 197
ОТРАЖЕНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ВОЛНЫ ОТ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА, СОИЗМЕРИМОГО С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ
- Сайфутдинов А.И. (КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия) 198
КИНЕТИКА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ В ГЕЛИИ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ И ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В АНАЛИТИКЕ
- Сайфутдинов А.И., Сорокина А.Р., Сайфутдинова А.А. (КНИТУ-КАИ, г. Казань, Россия) 199
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСПАРЕНИЯ МАТЕРИАЛА ТУГОПЛАВКИХ И НЕТУГОПЛАВКИХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ПАРАМЕТРЫ СЛАБОТОЧНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА
- Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г., Изотов И.В. (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия) 200
МЕХАНИЗМЫ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОРОГ ВОЗБУЖДЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ-ЦИКЛОТРОННЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ПРЯМОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ
- ^{1,2}Лосева Т.В., ^{1,2}Урвачев Е.М., ¹Зецер Ю.И., ^{1,2}Ляхов А.Н., ¹Косарев И.Б., ¹Поклад Ю.В. (¹ИДГ РАН, г. Москва, Россия; ²ЦФПИ ВНИИА им. Н.Л. Духова, г. Москва, Россия) 201
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ ПРИ ИНЖЕКЦИИ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ
- ^{1,2}Киселёва Е.М., ^{1,2}Изотов И.В., ^{1,2}Викторов М.Е., ^{1,2}Скалыга В.А., ^{1,2}Поляков А.В. (¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия; ²ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия) 202
ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР РАЗРЯДА
- Абрамов И.С., Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г. (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия) 203
СТАЦИОНАРНЫЙ ПОТОК ПЛОТНОЙ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ИОНАМИ КАК ИСТОЧНИК ЭУФ ИЗЛУЧЕНИЯ

- Лебедев Ю.А., Татаринев А.В., Эпштейн И.Л., Титов А.Ю. (*ИНХС РАН, г. Москва, Россия*) 204
 ДВУМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СВЧ РАЗРЯДЕ В ЖИДКИХ ТЯЖЕЛЫХ УГЛЕВОДОРОДАХ
- ¹Чан К.В., ^{1,2}Будаев В.П., ^{1,3}Кавыршин Д.И., ¹Федорович С.Д., ^{1,2}Карпов А.В., ¹Рогозин К.А., ¹Коньков А.А. (¹НИУ МЭИ, г. Москва, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ³ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 205
 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА МЕТОДАМИ ЗОНДА ЛЕНГМЮРА И ОПТИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ
- ¹Титов В.А., ²Наумова И.К., ¹Сироткин Н.А., ¹Хлюстова А.В. (¹ИХР РАН, г. Иваново, Россия; ²ИГУ, г. Иваново, Россия) 206
 ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ХИТОЗАНА И ОЦЕНКА ЕГО ФИТОСТИМУЛИРУЮЩИХ И АНТИМИКРОБНЫХ СВОЙСТВ
- ¹Наумова И.К., ²Титов В.А., ²Сироткин Н.А., ²Хлюстова А.В. ¹ИГУ, г. Иваново, Россия; ²ИХР РАН, г. Иваново, Россия) 207
 ФИТОСТИМУЛИРУЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ ПРОДУКТОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ И СУСПЕНЗИЙ ХИТОЗАНА
- Желтухин В.С., Шемахин А.Ю., Терентьев Т.Н. (*КФУ, г. Казань, Россия*) 208
 ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ ОТ СКОРОСТИ ПОТОКА ГАЗА
- Шемахин А.Ю. (*КФУ, г. Казань, Россия*) 209
 ОСОБЕННОСТИ СТРУЙНОГО ВЧ-РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ВАКУУМА
- ^{1,2,3}Казаков Е.Д., ¹Орлов М.Ю., ¹Стрижаков М.Г., ⁴Сунчугашев К.А., ²Воронин А.В. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИУ МЭИ, г. Москва, Россия; ³МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ⁴РУДН, г. Москва, Россия) 210
 ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НА СИЛЬНОТОЧНОМ ЭЛЕКТРОННОМ УСКОРИТЕЛЕ КАЛЬМАР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМНОМ ДИОДЕ
- ^{1,2}Смирнова А.Р., ³Бойков Д.С., ^{1,2}Казаков Е.Д., ³Ольховская О.Г., ^{1,2}Ткаченко С.И. (¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ³ИПМ РАН, г. Москва, Россия) 211
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАТОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ ФАКЕЛА В ДИОДНОМ ЗАЗОРЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ «КАЛЬМАР»
- ¹Таюрский А.А. (*ИПМ РАН, г. Москва, Россия*) 212
 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА ПОГЛОЩЕНИЕ АЛЬФЕНОВСКОЙ ВОЛНЫ ДИССИПАТИВНОЙ ПЛАЗМОЙ С УЧЁТОМ ТОРМОЗНОГО И ФОТОРЕКОМБИНАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ
- Франк А.Г. (*ИОФ РАН, г. Москва, Россия*) 213
 НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УСКОРЕННЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ В ХВОСТОВОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И В ЛАБОРАТОРНЫХ ТОКОВЫХ СЛОЯХ

- ^{1,2}Попов В.А., ^{1,2}Касатов А.А. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия) 214
 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ИТЕР ВОЛЬФРАМА ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ВЕТА
- Лазарев Е.Н., Желтухин В.С., Чебакова В.Ю. (КФУ, г. Казань, Россия) 215
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ВАКУУМА
- Горбунов Н.А. (ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия) 216
 ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ НА БАЛАНС ТЕМПЕРАТУРЫ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ В КАТОДНОЙ ОБЛАСТИ ПЛАЗМЕННОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
- ^{1,2}Глинский В. В., ^{1,2}Тимофеев И. В., ^{1,2}Волчок Е. П., ^{1,2}Анненков В. В. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия) 217
 ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ПУЧКОВО - ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА В УСТАНОВКЕ ГДЛ
- ¹Хирьянова А.И., ¹Паркевич Е.В., ^{1,2}Смазнова Х.Т., ^{1,2}Климович С.М., ^{1,3}Толбухин Д.В. (¹ФИАН, г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³ПГУ, г. Псков, Россия) 218
 ОСОБЕННОСТИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
- ¹Паркевич Е.В., ¹Хирьянова А.И., ^{1,2}Смазнова Х.Т., ^{1,2}Климович С.М., ^{1,3}Толбухин Д.В. (¹ФИАН, г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³ПГУ, г. Псков, Россия) 219
 ПОРОГОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ
- ¹Паркевич Е.В., ¹Хирьянова А.И., ¹Хирьянов Т.Ф., ¹Байдин И.С., ¹Шпаков К.В., ¹Родионов А.А., ¹Болотов Я.К., ¹Рябов В.А., ²Куриленков Ю.К., ¹Огинов А.В. (¹ФИАН, г. Москва, Россия; ²ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 220
 ЭМИССИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ ВО ВРЕМЯ ИНТЕНСИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СТРИМЕРОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ РАЗРЯДЕ
- Кирий Н.П., Харлачев Д.Е. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 221
 ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ АТОМОВ ГЕЛИЯ В ПЛАЗМЕ ТОКОВЫХ СЛОЕВ МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ
- Иванов В.А., Коныжев М.Е., Камолова Т.И., Дорофеюк А.А. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 222
 ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА ПРИ БОЛЬШИХ ЗНАЧЕНИЯХ ПОТЕНЦИАЛА В ЛАБОРАТОРНОЙ ПЛАЗМЕ
- Высоцкий В.С. (ОАО «ВНИИКП», г. Москва, Россия) 223
 СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ВТСП ПРОВОДНИКИ И МАГНИТЫ ДЛЯ УТС – ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ В РОССИИ И В МИРЕ

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ»** **227-269**

- Мурсенкова И.В., Зиганшин А.Ф., Ляо Ю., Иванова А.А. (*МГУ им. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия*) 227
ДИНАМИКА СВЕЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ РАЗРЯДОВ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ВОЗДУХА С УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ
- ¹Пискарев И.М., ²Аристова Н.А., ³Иванова И.П. (¹*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия;* ²*Уральский федеральный университет, Нижнетагильский технологический институт, г. Нижний Тагил, Россия;* ³*ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*) 228
ПОЛУЧЕНИЕ НИТРОСОЕДИНЕНИЙ В РЕАКЦИИ С ВОДОЙ, АКТИВИРОВАННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ
- Шавелкина М.Б., Филимонова Е.А., Амиров Р.Х., Иванов П.П. (*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия*) 229
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ ПЛАЗМОТРОНА ПОСТОЯННОГО ТОКА НА СВОЙСТВА ГРАФЕНА
- ¹Федорович С.Д., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Чилин М.С. (¹*НИУ "МЭИ", г. Москва, Россия;* ²*НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия*) 230
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА С НАНОСТРУКТУРОЙ ТИПА «ПУХ»
- Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. (*НИИ механики МГУ, г. Москва, Россия*) 231
ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ПРОТЯЖЁННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ДУГ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ В РАЗНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ
- Шлойдо А.И., Туркин А.В. (*ГНЦ «Центр Келдыша», г. Москва, Россия*) 232
ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ, СОЗДАННОЙ ГЕНЕРАТОРОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПОДАЧЕЙ ГАЗА В РАЗРЯДНЫЙ КАНАЛ В СМЕСИ ГАЗОВ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ
- Знаменская И.А., Карнозова Е.А., Руденко С., Дорошенко И.А. (*МГУ им. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия*) 233
ОСТЫВАНИЕ ЗОНЫ РАЗРЯДОВ, СКОЛЬЗЯЩИХ ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА
- ¹Ерискин А.А., ¹Никулин В.Я., ²Колокольцев В.Н. (¹*ФИАН, г. Москва, Россия;* ²*ИММ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия*) 234
ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ РАСПЛАВА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС
- ¹Ерискин А.А., ¹Никулин В.Я., ²Колокольцев В.Н. (¹*ФИАН, г. Москва, Россия;* ²*ИММ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия*) 235
УСТАНОВКА ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС С АНОДНЫМ НАКОНЕЧНИКОМ ИЗ ТИТАНА
- ¹Боровицкая И.В., ²Гайдар А.И., ¹Колокольцев В.Н., ¹Кобелева Л.И., ⁵Мезрин А.М., ⁴Никулин В.Я., ⁴Силин П.В. (¹*ИММ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия;* ²*НИИ перспективных материалов и технологий, г. Москва, Россия;* ³*ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия;* ⁴*ФИАН, г. Москва, Россия*) 236
ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ НА СТЕКЛА ЧЕРЕЗ ДИАФРАГМЫ НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

- Баркалов Е.Е., Веселовзоров А.Н., Камин Д.В., Свирский Э.Б. (НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия) 237
 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ БПРД-100 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ
- Гаранин С.Ф., Кравец Е.М. (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г.Саров, Россия) 238
 РАСТЕКАНИЕ ТОКА В ТОНКИХ ФОЛЬГАХ ИЛИ ПЛОСКИХ ТОКОВЫХ СЛОЯХ
- ¹Шандриков М.В., ^{1,2}Окс Е.М., ¹Черкасов А.А. (¹ИСЭ СО РАН, г. Томск, Россия; ²ТУСУР, г. Томск, Россия) 239
 СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАНАРНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ РАЗРЯД С ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ
- ¹Абдуллин И.Ш., ²Желтухин В.С., ¹Некрасов И.К., ¹Сагитова Ф.Р. (¹ООО «Плазма-ВСТ», г. Казань, Россия, ²КФУ, г. Казань, Россия) 240
 ПРИМЕНЕНИЕ СТРУЙНОГО ВЧЕ РАЗРЯДА В ДИНАМИЧЕСКОМ ВАКУУМЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СВМПЭ И ПОЛИУРЕТАНОВОЙ МАТРИЦЫ
- ^{1,2}Бурмистров Д.А., ¹Гаврилов В.В., ¹Жарова А.А., ¹Житлухин А.М., ^{1,3}Лиджигоряев С.Д., ^{1,3}Топорков Д.А. (¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³НИУ МЭИ, г. Москва, Россия) 241
 АНАЛИЗ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ПРИ ВСТРЕЧНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ДЕЙТЕРИЕВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
- ¹Жарова А.А., ^{1,2}Бурмистров Д.А., ¹Гаврилов В.В., ¹Житлухин А.М., ^{1,3}Лиджигоряев С.Д., ^{1,3}Топорков Д.А. (¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³НИУ МЭИ, г. Москва, Россия) 242
 ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА, ФОРМИРУЕМОГО ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДЕЙТЕРИЕВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
- Савенко Н.О., Багдасаров Г.А., Гасилов В.А. (ИПМ РАН, г. Москва, Россия) 243
 МОДЕЛИРОВАНИЕ КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА В ЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ
- ¹Топорков Д.А., ¹Бурмистров Д.А., ¹Гаврилов В.В., ¹Житлухин А.М., ¹Лиджигоряев С.Д., ¹Пушина А.В., ²Пикуз С.А., ²Рязанцев С.Н., ²Скобелев И.Ю. (¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия; ²ОИВТ РАН, г. Москва, Россия) 244
 СТОЛКНОВЕНИЕ ВСТРЕЧНЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ГАЗОВОЙ СТРУЕЙ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ
- ¹Афанасьев В.П., ¹Лобанова Л.Г., ²Ефременко Д.С. (¹НИУ МЭИ, г. Москва, Россия; ²Германский центр авиации и космонавтики, г. Оберпфаффенхофен, Германия) 245
 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСЛОЙНЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В УГЛЕРОДЕ И БЕРИЛЛИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДИК ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

- ¹Афанасьев В.П., ¹Лобанова Л.Г., ²Шульга В.И. (¹НИУ МЭИ, г. Москва, Россия; 246
²НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ, г. Москва, Россия)
 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ
 ВОДОРОДА ТЕРМОЯДЕРНЫХ ЭНЕРГИЙ С КОНСТРУКЦИОННЫМИ
 МАТЕРИАЛАМИ
- Серебряков М.А., Неруш Е.Н., Костюков И.Ю. (ИПФ РАН, г. Нижний 247
 Новгород, Россия)
 ПРОНИЦАЕМОСТЬ РЕЛЯТИВИСТСКИ НЕПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ
 ЭКСТРЕМАЛЬНО ИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
- ¹Желтухин В.С., ²Абдуллин И.Ш., ¹Некрасов И.К., ²Сагитова Ф.Р. (¹КФУ, г. 248
 Казань, Россия; ²ООО «Плазма-ВСТ», г. Казань, Россия)
 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЧ-ПЛАЗМЕННОЙ
 МОДИФИКАЦИИ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА
- Исаев А.А., Шиканов А.Е., Козловский К.И., Вовченко Е.Д. (НИЯУ МИФИ, 249
 г. Москва, Россия)
 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
 МАЛОГАБАРИТНЫХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
 ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПРОБНЫМИ ДЕЙТЕРИЕВЫМИ
 МИШЕНЯМИ
- ^{1,2}Аржанников А.В., ^{1,2}Синицкий С.Л., ¹Самцов Д.А., ^{1,2}Сандалов Е.С., 250
^{1,2}Калинин П.В., ^{1,2}Попов С.С., ¹Атлуханов М.Г., ^{1,2}Степанов В.Д., ¹Куклин
 К.Н., ¹Макаров М.А., ¹Ровенских А.Ф. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия;
²НГУ, г. Новосибирск, Россия)
 ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГОЗАПАСА В ПОТОКЕ ТГЦ ИЗЛУЧЕНИЯ,
 ГЕНЕРИРУЕМОГО ПРИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
 НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-ПЭТ
- ¹Аржанников А.В., ¹Логачев П.В., ¹Бак П.А., ¹Синицкий С.Л., ¹Попов С.С., 251
¹Калинин П.В., ¹Старостенко Д.А., ¹Никифоров Д.А., ¹Самцов Д.А., ¹Сандалов
 Е.С., ¹Атлуханов М.Г., ²Григорьев А.Н., ²Воробьев С.О. (¹ИЯФ СО РАН, г.
 Новосибирск, Россия; ²РФЯЦ-ВНИИТФ, г. Снежинск, Россия)
 ПРОЕКТ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО ГЕНЕРАТОРА ТГЦ ИЗЛУЧЕНИЯ НА
 КИЛОАМПЕРНОМ ПУЧКЕ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО
 УСКОРИТЕЛЯ
- ^{1,2,3}Казаков Е.Д., ¹Орлов М.Ю., ¹Стрижаков М.Г., ⁴Сунчугашев К.А., 252
^{1,3}Смирнова А.Р. (¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия; ²НИУ
 МЭИ, г. Москва, Россия; ³МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ⁴РУДН, г.
 Москва, Россия)
 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ
 ВОЛНЫ, СОЗДАВАЕМОЙ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В
 ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ, НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД
- ¹Ершов И.П., ²Абдуллин И.Ш., ³Желтухин В.С. (¹ООО ПТО «Медтехника», г. 253
 Казань, Россия; ²ООО «Плазма-ВСТ», г. Казань, Россия; ³КНИТУ, г. Казань,
 Россия)
 ВЧ-ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ СТЕКЛОВОЛОКНА В УСЛОВИЯХ
 ДИНАМИЧЕСКОГО ВАКУУМА
- Филимонова Е.А., Шавелкина М.Б., Амиров Р.Х., Иванов П.П. (ОИВТ РАН, г. 254
 Москва, Россия)
 КИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В ОБЪЕМЕ
 ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ПРИ СИНТЕЗЕ ГРАФЕНА

- Змиевская Г.И. (ИПМ РАН, г. Москва, Россия) 255
 НЕРАВНОВЕСНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В НАНОДИСПЕРСНЫХ
 СРЕДАХ: ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ПРИЛОЖЕНИЯ
- ²Диас Михайлова Д.Е., ¹Стрелков П.С., ³Карташов И.Н. 256
 (¹ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ²НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва,
 Россия; ³МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия)
 СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ С ОПТИМАЛЬНЫМ
 ПОДАВЛЕНИЕМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И БЕЗ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНОЙ
 СВЯЗИ
- Летунов А.А., Князев А.В., Логвиненко В.П., Воронова Е.В., Харлачев Д.Е. 257
 (ИОФ РАН, г. Москва, Россия)
 СПЕКТРАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ РАЗРЯДОВ,
 ИНИЦИИРУЕМЫХ В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ ИМПУЛЬСАМИ
 ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО ГИРОТРОНА
- ^{1,2}Гудкова В.В., ^{1,2}Разволяева Д.А., ¹Кончечков Е.М., ^{1,2}Борзосеков В.Д.,
^{1,3}Павлик Т.И. (¹ИОФ РАН, г. Москва, Россия; ²РУДН, г. Москва, Россия;
³РНМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, г. Москва, Россия)
 КОНТРОЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ЦИТОКИНА TNF- α ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
 АКТИВИРОВАННОГО ПЛАЗМОЙ РАСТВОРА ХЕНКСА ДЛЯ
 ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ ТЕРАПИИ 258
- Давыдов А.М., Артемьев К.В., Бережецкая Н.К. (ИОФ РАН, г. Москва,
 Россия) 259
 ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ AR-HG МИКРОВОЛНОВЫХ
 ЛАМП НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ
- Артемьев К.В., Давыдов А.М., Малахов Д.В. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 260
 ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ ПРЯМЫМ ПЬЕЗО-РАЗРЯДОМ И ЕЕ
 ДИАГНОСТИКА ПО ПОГЛОЩЕНИЮ В УФ ДИАПАЗОНЕ
- Заклецкий З.А., Малахов Д.В., Гусейн-заде Н.Г., Воронова Е.В., ¹Бадьянова
 Л.В., Степахин В.Д. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 261
 ИНИЦИАЦИЯ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА С ПОВЕРХНОСТИ
 КВАРЦЕВОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СВЧ-ИМПУЛЬСА
 ГИРОТРОНА (75 ГГц, 400 кВт, 8 мс)
- Иванов И.Е. (ИОФ РАН, г. Москва, Россия) 262
 КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ШУМОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ
 РЕЛЯТИВИСТСКИХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИСТОЧНИКОВ
- ^{1,2}Разволяева Д.А., ^{1,2}Гудкова В.В., ¹Кончечков Е.М., ¹Моряков И.В.,
¹Анпилов А.М., ¹Бережецкая Н.К., ^{1,2}Борзосеков В.Д. (¹ИОФ РАН, г.
 Москва, Россия; ²РУДН, г. Москва, Россия) 263
 АКТИВАЦИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ С ПОМОЩЬЮ
 МНОГОИСКРОВОГО КОЛЬЦЕВОГО РАЗРЯДА С ИНЖЕКЦИЕЙ ГАЗА В
 РАЗРЯДНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ
- Бычков В.Л., Ваулин Д.Н., Горячкин П.А., Черников В.А. (МГУ им. М.В.
 Ломоносова, г. Москва, Россия) 264
 ВОЗДЕЙСТВИЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ПОВЕРХНОСТЬ ГРИБАМИ
 ЗАРАЖЕННОГО ЗЕРНА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

<u>Бычков В.Л.</u> , Байдак В.А., Ваулин Д.Н., Сороковых Д.Е., Черников В.А. (МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия)	265
ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАЗМОИДОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА НА МЕТАЛЛЫ	
² Бондаренко Д.А., ¹ Бычков В.Л., ¹ Вавилин К.В., ¹ Двинин С.А., ¹ Кралькина Е.А., ¹ Задириев И.И., ² Маринин С.Ю., ¹ Никонов А.М. (¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ² ВНИИЭМ, г. Москва, Россия)	266
САМОСОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОЛЕТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА СВЕРХНИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ	
¹ Двинин С.А., ² Кодирзода З.А., ³ Синкевич О.А., ² Солихов Д.К. (¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ² ТНУ, физический факультет, г. Душанбе, Таджикистан; ³ НИУ МЭИ, г. Москва, Россия)	267
ГЛОБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ	
¹ Двинин С.А., ^{2,3} Корнеева М.А. (¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; ² РУДН, г. Москва, Россия; ³ ФНЦ НИИСИ РАН, г. Москва, Россия)	268
ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ЭЦР РАЗРЯДА В РЕЗОНАТОРЕ	
<u>Панин С.Е.</u> , Кутуков А.К., Байбаков Г.С., Сергеечев А.А. (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия)	269
УСТАНОВКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ИМПУЛЬСНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	
ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ	
«ПРОЕКТ ИТЭР: ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО»	
	273-333
<u>Лабусов А.Н.</u> , Маханьков А.Н., Миронов И.А., Панов В.С. (АО «НИИЭФА», г. Санкт-Петербург, Россия)	273
ПРОЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СБОРКИ ДИВЕРТОРА С ПОЛНОСТЬЮ ВОЛЬФРАМОВОЙ ОБЛИЦОВКОЙ ДЛЯ РЕАКТОРА-ТОКАМАКА ИТЭР	
<u>Джурик А.С.</u> , Воробьев В.А., Николаев А.И., Кашук Ю.А., Кормилицын Т.М. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)	274
6-ТИ КАНАЛЬНЫЙ ИМИТАТОР СИГНАЛОВ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДМНП ИТЭР	
Колесник М.С., Пискарев П.Ю., Васильев В.А., Герваш А.А., Киселев Д.А. (АО «НИИЭФА», г. Санкт-Петербург, Россия)	275
РАЗБОРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР	
<u>Пискарев П.Ю.</u> , Мазуль И.В., Родин И.Ю., Герваш А.А., Маханьков А.Н., Кузнецов В.Е., Гурьева Т.М., Окунев А.А. (АО «НИИЭФА», г. Санкт- Петербург, Россия)	276
МНОГОСЛОЙНЫЕ ОБРАЩЕННЫЕ К ПЛАЗМЕ КОМПОНЕНТЫ ИТЭР: ОТ МАЛЫХ МАКЕТОВ ДО ПОЛНОМАСШТАБНЫХ ПРОТОТИПОВ ЦСД И ППС	

- Алексеев Д.И., Карпишин М.В., Манзук М.В., Рошаль А.Г., Семенов А.И., Соленый А.А. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 277
ИННОВАЦИИ И ДОСТИЖЕНИЯ ГИБРИДНОГО КОММУТАЦИОННОГО АППАРАТА СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОЙ КОММУТАЦИИ ТОКА ИТЭР
- Гаврисенко Д.Ю., Шиховцев И.В., Бельченко Ю.И., Горбовский А.И., Кондаков А.А., Сотников О.З., Воинцев В.А., Финашин Р.А. (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 278
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДРАЙВЕРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭКРАНАМИ ФАРАДЕЯ ДЛЯ МНОГОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ
- Громов А.Б., Серебров Р.А., Фридман Б.Э., Макарова А.Д. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 279
ОБЗОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОВ БЫСТРОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ ДЛЯ КАТУШЕК ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ/ЦЕНТРАЛЬНОГО СОЛЕНОИДА ИТЭР
- Бобров С.В., Герваш А.А., Глазунов Д.А., Мамбеткеримов Д.С., Огурский А.Ю., Пискарев П.Ю., Рузанов В.В. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 280
ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ БЕРИЛЛИЕВОЙ ОБЛИЦОВКИ НА ЭЛЕМЕНТЫ ПАНЕЛИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ РЕАКТОРА ИТЭР
- Мамбеткеримов Д.С., Пискарев П.Ю., Герваш А.А., Глазунов Д.А., Окунева Е.В., Васильев В.А. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 281
ПРОЦЕДУРА КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ВОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ В ПОЛНОМАСШТАБНОМ ПРОТОТИПЕ ПАНЕЛИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ОТСУТСТВИЯ ЗАБЛОКИРОВАННЫХ КАНАЛОВ
- Попов Н.С., Бачурина Д.М., Богданов Р.И., Сучков А.Н. (НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 282
КОРРОЗИЯ СОЕДИНЕНИЙ МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ СТАЛИ С ВОЛЬФРАМОВОЙ ОБЛИЦОВКОЙ В СРЕДЕ ЖИДКОГО ЛИТИЯ
- Королев Ю.А., Лянзберг Д.В., Гурьева Т.М., Ефимов Г.О., Сеницына К.А., Пискарев П.Ю. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 283
РОБОТИЗИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГОНАГРУЖЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИТЭР
- Семенов А.И., Алексеев Д.И., Карпишин М.В., Манзук М.В., Рошаль А.Г., Соленый А.А., Харченко В.В. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 284
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ БЫСТОДЕЙСТВУЮЩИХ ЗАЩИТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ИТЭР
- Терещенко Е.Р., Соколова А.И., Манзук М.В., Алексеев Д.И., Губанова Н.А. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 285
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСАМИ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ТОКАМАКА ИТЭР
- Маханьков Н.А., Маханьков А.Н., Литуновский Н.В., Мазуль И.В., Пискарев П.Ю., Мазаев С.Н., Окунев А.А., Кузнецов В.Е., Гурьева Т.М., Лапин А.В., Васильев В.А. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 286
ПОЛНОМАСШТАБНЫЙ ПРОТОТИП ЦЕНТРАЛЬНОЙ СБОРКИ ДИВЕРТОРА ИТЭР

- Сапожников К.С., Еникеев Р.Ш. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 287
 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО
 ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЭВП ДЛЯ
 СИСТЕМЫ БЫСТРОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ ИТЭР
- Киселев Д.А., Васильев В.А., Маханьков А.Н., Мазаев С.Н. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 288
 ВАКУУМНЫЕ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ
 СБОРКИ ДИВЕРТОРА ИТЭР
- Нечаев Н.Е., Александров Е.С., Власов А.Ю., Китаев Б.А., Крюков Ю.Л.,
 Медведев М.В., Серебров Р.А., Фридман Б.Э. (АО НИИЭФА, г. Санкт-
 Петербург, Россия) 289
 РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ БЫСТРОГО
 ЗАЩИТНОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ В РАССЕЯНОМ МАГНИТНОМ
 ПОЛЕ РЕАКТОРНОГО ЗАЛА ИТЭР
- Попков Д.Е., Еникеев Р.Ш., Сапожников К.С. (АО НИИЭФА, г. Санкт-
 Петербург, Россия) 290
 КОМПЛЕКС ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ СИСТЕМЫ
 ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МАГНИТНЫХ КАТУШЕК ИТЭР
- Медведев М.В., Громов А.Б., Макарова А.Д., Шалаева А.И., Серебров Р.А.,
 Фридман Б.Э. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 291
 СИСТЕМА INTERLOCK ДЛЯ БЛОКОВ АППАРАТОВ БЫСТРОГО
 ВЫВОДА ЭНЕРГИИ МАГНИТНЫХ КАТУШЕК ПОЛОИДАЛЬНОГО
 ПОЛЯ И ЦЕНТРАЛЬНОГО СОЛЕНОИДА РЕАКТОРА ИТЭР
- Губанова Н.А. Манзук М.В., Алексеев Д.И., Рошаль А.Г., Терещенко Е.Р.,
 Соколова А.И. (АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия) 292
 ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫМИ АППАРАТАМИ
 ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ И ЗАЩИТНЫХ
 ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
 СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КАТУШЕК ИТЭР
- ¹Алексеев Д.И., ¹Карпишин М.В., ²Кривошеев С.И., ¹Манзук М.В.,
¹Рошаль А.Г., ¹Семенов А.И., ¹Соленый А.А. (¹АО НИИЭФА, г. Санкт-
 Петербург, Россия; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия) 293
 ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗАЩИТНОГО
 РАЗМЫКАТЕЛЯ СИСТЕМЫ БЫСТРОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ ИЗ
 СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КАТУШЕК ИТЭР
- ^{1,2}Орловский И.И., ^{1,2}Вуколов К.Ю., ^{1,2}Андреев Е.Н. (¹НИЦ
 "Курчатовский институт", г. Москва, Россия; ²УТС-Центр, г. Москва,
 Россия) 294
 РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ
 ДИАГНОСТИКИ СВЛ ИТЭР
- ¹Демура А.В., ¹Леонтьев Д.С., ²Летунов А.Ю., ¹Лисица В.С. (¹НИЦ
 "Курчатовский институт", г. Москва, Россия; ²РФЯЦ-ВНИИТФ им. ак.
 Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия) 295
 ТЕОРИЯ MSE ДИАГНОСТИКИ В ПАРАБОЛИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ

- ^{1,2}Лиджигоряев С.Д., ^{1,5}Бурмистров Д.А., ¹Гаврилов В.В., ^{1,2}Позняк И.М.,
^{1,2}Пушина А.В., ^{1,2}Топорков Д.А. (¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия;
²МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия; ³НИУ МЭИ, г. Москва, Россия) 296
 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ
 ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ, ПОДВЕРГАЮЩЕЙСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ
 МОЩНЫХ ПОТОКОВ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ, МЕТОДОМ
 СПЕКТРАЛЬНОЙ ПИРОМЕТРИИ
- Пучкин С.Ю., Немцев Г.Е., Родионов Р.Н., Юхнов Н.П., Хафизов Р.Р. (ЧУ
 ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 297
 ВЛИЯНИЕ ДОПУСКОВ СИСТЕМЫ КОЛЛИМАТОРНЫХ КАНАЛОВ НА
 РАБОТУ ДИАГНОСТИКИ ВНК ИТЭР
- ^{1,2}Панкратенко А.В., ^{1,2}Кормилицын Т.М., ⁵Шевелев А.Е., ⁵Хилькевич Е.М.,
³Ильясова М.В., ¹Джурик А.С., ^{1,2}Кашук Ю.А. (¹ЧУ ГК Росатом
 «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ²МФТИ (НИУ), г.
 Долгопрудный, Россия; ³ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург,
 Россия) 298
 ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ
 КРИСТАЛЛА ХЛОРИДА ЛАНТАНА С ЦЕЛЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ В
 НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ
- ^{1,2}Никулин Б.И., ¹Поддубный И.И., ¹Свириденко М.Н., ¹Данилов И.В.,
³Путрик А.Б. (¹АО «НИКИЭТ», г. Москва, Россия; ²НИУ «МЭИ», г. Москва,
 Россия; ³ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 299
 ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СБОРКЕ ОПОРЫ
 ВНУТРЕННЕГО БЛАНКЕТА РЕАКТОРА ИТЭР ПРИ РАЗРУШЕНИИ
 ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ
- ¹Неверов В.С., ²Хуснутдинов Р.И., ³Полевой А.Р., ⁵Имбо Ф., ⁵Шнайдер М.,
³Де Бок М. (¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия; ²НИЯУ
 МИФИ, г. Москва, Россия; ³ITER Organization, Cadarache, France) 300
 БЫСТРЫЙ РАСЧЕТ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ
 ВИДЕОКАМЕР ИТЭР С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРПОЛИРУЕМЫХ МАТРИЦ
 ПЕРЕНОСА ЛУЧЕЙ
- Миронов М.И., Афанасьев В.И., Мельник А.Д., Наволоцкий А.С.,
 Несеневич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В., Шмитов Р.Ю.
 (ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия) 301
 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ
 ДИАГНОСТИКИ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ДЛЯ ИТЭР
- ^{1,2}Алябьев И.А., ^{1,2}Цыбенко Ю.В., ^{1,2}Бирюлин Е.З., ^{1,2}Позняк И.М.,
^{1,2}Новоселова З.И., ^{1,2}Федулаев Е.Д., ³Путрик А.Б. (¹МФТИ (НИУ), г.
 Долгопрудный, Россия; ²ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк,
 Россия; ³ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 302
 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО
 МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ
 ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ
- Сотников О.З., Бельченко Ю.И., Санин А.Л., Иванов А.А., Горбовский А.И.
 (ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия) 303
 ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА
 ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА В ПРОТОТИПЕ ИНЖЕКТОРА
 ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ НЕЙТРАЛОВ

- Бирюлин Е.З., Цыбенко В.Ю., Позняк И.М., Алябьев И.А., Новоселова З.И., Федулаев Е.Д. (*ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия; МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*) 304
ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ ГАЗА
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ
УВЕЛИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ МК-200 X8 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ПЕРЕХОДНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИТЭР
- Цвентух М.М. (*ФИАН, г. Москва, Россия*) 305
ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ И КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА
В МОДЕЛИ ВЗРЫВА НАНОФРАГМЕНТОВ ПОВЕРХНОСТИ
- ^{1,2}Кулагин В.В., ¹Цвентух М.М. (¹*ФИАН, г. Москва, Россия;* ²*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*) 306
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЯ ПОВЫШЕННОЙ
ЭНЕРГИИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОЛЬФРАМА МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
- ^{1,2}Кукушкина М.С., ²Казиев А.В., ^{1,2,3}Колодко Д.В., ²Харьков М.М., ^{1,2}Рыкунов Г.И., ¹Цвентух М.М. (¹*ФИАН, г. Москва, Россия;* ²*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия;* ³*ИРЭ РАН, г. Фрязино, Россия*) 307
ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ ВОЛЬФРАМА ИОНАМИ
ГЕЛИЯ ИЗ ПЛАЗМЫ ВЧИ-РАЗРЯДА НА ГЕОМЕТРИЮ
ФОРМИРУЮЩИХСЯ НАНОСТРУКТУР
- ¹Гурова Ю.А., ¹Бачурина Д.М., ¹Севрюков О.Н., ²Бабинов Н.А., ²Ходунов И.А., ²Панкратьев П.А. (¹*НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия;* ²*ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия*) 308
ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО ПРИПОЯ СТЕМЕТ®1502 ДЛЯ
ПАЙКИ ПАКЕТНЫХ ПЬЕЗОСИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
- Ковалев А.О., Родионов Р.Н., Воробьев В.А., Портнов Д.В., Кащук Ю.А. (*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*) 309
МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ
ТЕРМОЯДЕРНОЙ МОЩНОСТИ ТОКАМАКА ИТЭР
- Еникеев Р.Ш., Манзук М.В., Сапожников К.С., Серебров Р.А., Алексеев Д.И., Губанова Н.А. (*АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия*) 310
ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО РАЗРАБОТКЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЮ И
ПОСТАВКЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ИТЭР
- ¹Гавриленко Д.Е., ^{1,4}Бурдаков А.В., ¹Иванцовский М.В., ²Кащук Ю.А., ²Обудовский С.Ю., ²Степанов С. Б., ²Кормилицын Т. М., ¹Стешов А.Г., ¹Шиянков С.В., ^{1,3,4}Шошин А.А. (¹*ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия;* ²*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия;* ³*НГУ, г. Новосибирск, Россия;* ⁴*НГТУ, г. Новосибирск, Россия*) 311
ПРОТОТИП МОДУЛЯ ДИВЕРТОРНОГО МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО
ПОТОКА ИТЭР

¹Афанасенко Р.С., ⁴Бурдаков А.В., ²Буслаков И.В., ¹Высоких Ю.Г., 312
 Гавриленко Д.Е., ⁴Грищенко А.М., Иванцовский М.В., ¹Кравцов Д.Э.,
Листопад А.А., ²Логинов И.Н., ²Модестов В.С., ¹Портнов Д.В., ¹Родионов
 Р.Н., Рыжанков И.С., Селезнев П.А., Серемин В.В., ¹Сорокина Н.В., Суляев
 Ю.С., Шабунин Е.В., ²Шагниева О.Б., Шиянков С.В., ^{3,4}Шошин А.А. (*ИЯФ
 СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр
 ИТЭР», г. Москва, Россия; ²СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ³НГУ, г.
 Новосибирск, Россия; ⁴НГТУ, г. Новосибирск, Россия*)
 ПОДГОТОВКА ФИНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ ВЕРХНИХ ПОРТОВ 02, 07, 08
 ИТЭР

^{1,2}Мухин Е.Е., ¹Толстяков С.Ю., ¹Баженов А.Н., ¹Бочаров И.В., ¹Букреев 313
 И.М., ¹Варшавчик Л.А., ¹Дохтаренко Д.В., ^{1,2}Дмитриев А.М., ^{1,2,3}Елец Д.И.,
¹Ермаков Н.В., ¹Жильцов Н.С., ¹Курские Г.С., ¹Коваль А.Н., ¹Люллин З.Г.,
¹Марчий Г.В., ¹Медведев О.С., ¹Николаенко К.О., ^{1,4}Орешко И.В.,
¹Панкратьев П.А., ^{1,2}Раздобарин А.Г., ^{1,4}Резанов Д.А., ¹Самсонов Д.С.,
¹Сениченков В.А., ¹Соловей В.А., ^{1,2}Снигирев Л.А., ¹Старовойтов Е.А.,
¹Терещенко И.Б., ¹Ткаченко Е.Е., ^{4,5}Чернаков П.В., ¹Чернаков А.П., ⁶Мокеев
 А.Н. (*¹ФТИ им. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²СПбГУ, физический
 факультет, г. Санкт-Петербург, Россия; ³НИЯУ МИФИ, г. Москва,
 Россия; ⁴СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, Россия; ⁵ЗАО Спектрал-
 Тех, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁶ЧУ ГК Росатом «Проектный центр
 ИТЭР», г. Москва, Россия*)
 СТАТУС РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО
 РАССЕЯНИЯ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА ИТЭР

Люллин З.Г., Бабинов Н.А., Бочарников В.А., Варшавчик Л.А., Когаков 314
 С.И., Старовойтов Е.А., Мухин Е.Е. (*ФТИ им. Иоффе, г. Санкт-Петербург,
 Россия*)
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ПЕРВОЙ
 СТЕНКИ НА ВНУТРИВАКУУМНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ
 ИТЭР

¹Терещенко И.Б., ¹Самсонов Д.С., ¹Мухин Е.Е., ¹Марчий Г.В., ²Губаль А.Р., 315
²Михайловский В.Ю., ³Капустин Ю.В., ¹Коваль А.Н., ¹Толстяков С.Ю.,
¹Снигирев Л.А., ⁴Комаревцев И.М., ⁵Маринин Г.В., ⁵Терентьев Д.В.,
⁶Городецкий А.Е., ⁶Залавутдинов Р.Х., ⁶Маркин А.В., ⁶Буховец В.Л.,
⁴Модестов В.С., ⁴Кириенко И.Д., ⁴Буслаков И.В., ⁷Чернаков П.В., ⁸Мокеев
 А.Н. (*¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²Институт
 химии СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ³НИЦ «Курчатовский
 институт», г. Москва, Россия; ⁴СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия;
⁵Русские Технологии, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁶ИФХЭ РАН, г. Москва,
 Россия; ⁷АО «Спектрал-Тех», г. Санкт-Петербург, Россия; ⁸ЧУ ГК
 Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*)
 КРУПНОГАБАРИТНЫЕ СОБИРАЮЩИЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ
 ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ДИВЕРТОРЕ
 ИТЭР

¹Варшавчик Л.А., ¹Когаков С.И., ¹Люллин З.Г., ¹Старовойтов Е.А., ^{1,2}Мухин 316
 Е.Е. (*¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; ²СПбГУ,
 физический факультет, г. Санкт-Петербург, Россия*)
 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЧ-РАЗРЯДА ДЛЯ ЧИСТКИ ПЕРВЫХ ЗЕРКАЛ
 ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ИТЭР МЕТОДОМ ЧАСТИЦ-В-ЯЧЕЙКАХ

- ²Кравцов Д.Э., ^{1,5}Бурдаков А.В., ³Буслаков И.В., ¹Шарафеева С.Р., ¹Селезнев П.А., ¹Рыжанков И.С., ¹Иванцовский М.В., ³Кириенко И.Д., ¹Гавриленко Д.Е., ³Лобачев А.М., ³Логинов И.Н., ¹Шабунин Е.В., ³Модестов В.С., ¹Норышев Е.А., ³Пожилов А.А., ¹Суляев Ю.С., ³Шагниев О.Б., ¹Шиянков С.В., ^{1,4,5}Шошин А.А. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ³СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия; ⁴НГУ, г. Новосибирск, Россия; ⁵НГТУ, г. Новосибирск, Россия) 317
ПРОГРЕСС В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА 11 ИТЭР
- Гужев Д.И., Нагорный Н.В., Немцев Г.Е., Нестеренко В.М., Миронова Е.Ю., Миронов А.Ю., Портоне С.С. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 318
СТАТУС I&C СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА
- ¹Науменко Н.Н., ²Тугаринов С.Н., ²Красильников А.В., ³Крупин В.А., ²Кузьмин Н.В., ³Нургалиев М.Р., ²Серов В.В., ²Серов С.В. (¹ЗАО «Солар», г. Минск, Республика Беларусь; ²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия; ³НИЦ Курчатовский Институт, г. Москва, Россия) 319
РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ
- ¹Базалеев Е.В., ¹Куприянов И.Б., ²Подковыров В.Л., ²Федулаев Е.Д., ³Васенин С.М. (¹ВНИИИМ им. А.А. Бочвара, г. Москва, Россия; ²ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия; ³ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 320
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗОК НА ПОВРЕЖДЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ
- ^{1,2}Сергеечев А.А., ²Огородникова О.В., ^{1,2}Гуторов К.М., ²Ефимов В.С., ²Сергеев Н.С., ¹Подковыров В.Л., ¹Кутуков А.К., ¹Панин С.Е. (¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия; ²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия) 321
ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ И ЗАХВАТА ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЕЛМ-ПОДОБНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ПОТОКАМИ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ С ПРИМЕСЯМИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ
- ¹Таскаев А.С., ¹Иванцовский М.В., ¹Бурдаков А. В., ¹Шиянков С. В., ¹Рыжанков И. С., ¹Гавриленко Д. Е., ¹Серёмин В. В., ²Петров С. Я., ²Афанасьев В. И., ²Наволоцкий А. С. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ФТИ им. А. Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия) 322
КОЛЛИМАТОР АНАЛИЗАТОРА АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИТЭР
- ¹Таскаев А. С., ¹Иванцовский М. В., ¹Бурдаков А.В., ¹Шиянков С.В., ¹Рыжанков И.С., ¹Гавриленко Д.Е., ¹Серёмин В.В., ²Немцев Г.Е. (¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 323
МАКЕТ ДЕТЕКТОРНОГО УЗЛА ВЕРХНЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ С УРАНОМ ДЛЯ ИТЭР

- ¹Иванцовский М.В., ^{1,3}Бурдаков А.В., ¹Гавриленко Д.Е., ^{1,3}Грищенко А.М., 324
¹Константинов В.М., ²Кравцов Д.Э., ¹Листопад А.А., ⁵Лобачев А.М.,
⁵Логинов И.Н., ⁵Модестов В.С., ¹Рыжанков И.С., ¹Селезнев П.А.,
¹Серемин В.В., 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)
СТАТУС РАБОТ ПО ПРОЕКТУ ИТЭР В ИЯФ СО РАН
- Павлова Г.С., Серов С.В., Тугаринов С.Н. (ЧУ ГК Росатом «Проектный
центр ИТЭР», г. Москва, Россия) 325
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОЙ
СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИТЭР
- Николаев А.И., Джурик А.С., Воробьев В.А., Нагорный Н.В., Гужев Д.И., 326
Миронов А.Ю., Нестеренко В.М. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр
ИТЭР», г. Москва, Россия)
ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИГНАЛОВ НЕЙТРОННЫХ
ДИАГНОСТИК УСТАНОВКИ ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GPU
- Нестеренко В.М., Нагорный Н.В., Гужев Д.И., Миронов А.Ю., 327
Николаев А.И., Серов С.В., Миронова Е.Ю., Портоне С.С. (ЧУ ГК Росатом
«Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия)
СТАТУС РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ
ДИАГНОСТИКИ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ИТЭР
- ^{1,2}Таскаев С.Ю., ^{1,2}Бикчурин М.И., ^{1,2}Быков Т.А., ⁵Бямбацэрэн Э., 328
^{1,2}Верховод Г.Д., ^{2,4}Ибрагим И.С., ^{1,2}Касатов Д.А., ^{1,2}Колесников Я.А.,
^{1,2}Коновалова В.Д., ^{1,2}Кормушаков Т.Ю., ^{1,2}Кошкарев А.М.,
^{1,2}Кузнецов А.С., ^{1,2}Остринов Г.М., ^{1,2}Савинов С.С., ^{1,3}Сингатулина Н.Ш.,
^{1,2}Соколова Е.О., ^{1,2}Сорокин И.Н., ^{1,2}Сычева Т.В., ^{1,2}Щудло И.М. (¹ИЯФ СО
РАН, г. Новосибирск, Россия; ²НГУ, г. Новосибирск, Россия; ³НГТУ, г.
Новосибирск, Россия; ⁴Тартусский университет, г. Тартус, Сирийская
Арабская Республика)
ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ VITA
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И
ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
- Семенов И.Б., Голачев В.М., Ларионов А.С., Лазарева С.Г., Миронова Е.Ю., 329
Миронов А.Ю., Нагорный Н.В., Портоне С.С., Семенов О.И., Гужев Д.И.,
Николаев А.И. (ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва,
Россия)
СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР
- ¹Семенов Е.В., ²Шевелева С.С., ¹Портоне С.С., ¹Красильников А.В., ²Маас 330
А., ¹Петров А.А., ¹Березенцева А.А., ¹Асташов А.Н., ¹Смирнов П.В.,
¹Каклюгина Н.А., ¹Семенов И.Б. (¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр
ИТЭР», г. Москва, Россия; ²ITER Organization, St. Paul Lez Durance, France)
МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ В ПРОЕКТЕ
ИТЭР ДЛЯ УТС ИССЛЕДОВАНИЙ В РФ

<u>Семенов О.И.</u> , Ларионов А.С., Миронова Е.Ю., Нагорный Н.В., Портоне С.С., Потапов А.М., Семенов И.Б., Сорокин Д.Е. (<i>ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия</i>)	331
СТАТУС ПРОЕКТИРОВАНИЯ УДАЛЕННОЙ ПУЛЬТОВОЙ ИТЭР	
Портоне С.С., Семенов О.И., Нагорный Н.В., Миронов А.Ю., Ларионов А.С., Ежова З.В., Семенов Е.В., Миронова Е.Ю., Семенов И.Б., Григорян Л.А. (<i>ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия</i>)	332
СТАТУС РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА ПО СОЗДАНИЮ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА УТС ИССЛЕДОВАНИЙ - FUSIONSPACE.RU (АИП ИКП)	
<u>Миронов А.Ю.</u> , Нагорный Н.В., Нестеренко В.М., Гужев Д.И., Николаев А.И., Семенов И.Б., Портоне С.С. (<i>ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия</i>)	333
ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ ИТЭР ОТ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДО ЗАВОДСКИХ ИСПЫТАНИЙ	
СПИСОК АВТОРОВ	334-344

ОБЗОРНЫЕ ДОКЛАДЫ

REVIEWS

50 ЛЕТ ИСТОРИИ МЕЖДУНАРОДНОЙ ЗВЕНИГОРОДСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ

Иванов В.А.

ФИЦ Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: ivanov@fpl.gpi.ru DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.001

Первая конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу была проведена осенью 1973 года в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Академии наук СССР (ФИАН СССР). Организатором этой конференции был Научный совет по физике высокотемпературной плазмы, созданный академиком Л.А. Арцимовичем (1909-1973) в рамках АН СССР. В 1973-1975 гг его возглавил профессор М.С. Рабинович, а с 1975 г. – академик Кадомцев Б.Б. В конференции участвовали около 100 ученых из России, Украины, Белоруссии и других республик, входивших в состав СССР. Основные проблемы, которые обсуждались на первой конференции, были обусловлены прорывными исследованиями, выполненными в Курчатовском институте на установке токамак, на которой была получена рекордная для того времени электронная температура плазмы около 10 млн. градусов. В то время в СССР развивались и другие методы удержания плазмы, и строились установки для получения горячей плазмы: Z-пинчи, стеллараторы, открытые ловушки. С 1974 года эти конференции стали проходить ежегодно в городе Звенигороде Московской области в пансионате Академии наук, что было удобным местом проведения, т.к. в нем имелся большой конференц-зал, несколько аудиторий для проведения секционных заседаний, а также зал для проведения стендовых секций. С этого года оргкомитет конференции начинает приглашать видных ученых из ведущих научных центров США, Европы, Японии для чтения лекций и представления обзорных докладов по фундаментальной физике плазмы, проблемам управляемого термоядерного синтеза и прикладным аспектам физики плазмы. Конференция 1974 года была посвящена памяти академика Л.А. Арцимовича, который внес значительный вклад в развитие исследований по физике высокотемпературной плазмы и управляемому термоядерному синтезу в СССР. Оргкомитет конференции обратился в Президиум АН СССР с ходатайством о приглашении 19 видных ученых из ведущих научных центров США, Европы, Японии для чтения лекций и представлении обзорных докладов по фундаментальной физике плазмы, проблемам управляемого термоядерного синтеза, а также прикладным аспектам физики плазмы. Этот прецедент открыл возможность на следующих конференциях также приглашать иностранных ученых для представления научных работ, выполненных в передовых иностранных научных центрах, что позволило, начиная с 1998 года, организовывать звенигородские конференции как международные.

К настоящему времени тематика конференции расширена. Проводятся пленарные и секционные заседания по физике магнитного удержания высокотемпературной плазмы, по проблемам инерциального термоядерного синтеза, по процессам в низкотемпературной плазме, по физическим основам плазменных и лучевых технологий и по международному проекту ИТЕР при участии до 600 ученых из 90 ведущих научных центров Российской академии наук, Университетов России, Институтов ГК РОСАТОМ, научных организаций РФ, стран СНГ и международных научных центров. Оргкомитетом конференции ежегодно издается «Сборник тезисов докладов», при этом каждый доклад имеет DOI и представлен на сайте конференции на русском и английском языках. С материалами конференций с 1998 по настоящее время можно ознакомиться на сайте <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/Zvenigorod.html>.

Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является единственным проходящим в России ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в России, странах СНГ и ведущих международных научных центрах.

К 120-ЛЕТИЮ МИХАИЛА АЛЕКСАНДРОВИЧА ЛЕОНТОВИЧА

^{1,2,3}Лисица В.С., ¹Кузнецова Л.К., ^{1,2,3}Кукушкин А.Б.

¹НИЦ «Курчатовский институт», Россия, ²НИЯУ «МИФИ», Россия, ³МФТИ, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.002



Михаил Александрович Леонтович (7.3.1903 – 30.3.1981) – выдающийся физик-теоретик, чьи личные труды и труды его учеников в двух созданных им научных школах по радиофизике и физике плазмы заложили в масштабах мировой науки теоретический фундамент этих дисциплин.

Отец М.А. – физиолог, избранный в Академию наук СССР, мать – дочь выдающего русского механика В.Л. Кирпичева. После окончания физико-математического факультета Московского университета М.А. становится в 1925 г. одним из первых аспирантов выдающегося физика Л.И. Мандельштама. Вместе с ним выполнил пионерскую работу по теории туннельного эффекта (1928), участвовал в создании классической теории комбинационного рассеяния света в кристаллах. Уже став профессором физфака МГУ в 1934 г. он переходит на работу в ФИАН и через год ему присуждается степень доктора физ.-мат. наук, а в 1939 г. он

избирается членом-корреспондентом АН СССР.

В военный период М.А. Леонтович был эвакуирован вместе с ФИАН, но уже в 1942 г. его назначают вначале начальником лаборатории одного из оборонных заводов, а затем в 1944 г. переводят в московский институт Наркомата электротехнической промышленности. В 1945 г. он возвращается на работу в ФИАН, где с 1947 г. заведует лабораторией колебаний. На первых послевоенных выборах в Академию в 1946 г. он избирается действительным членом. С 1947 по 1954 гг. он преподает в МИФИ, где с 1949 г. заведует кафедрой теоретической физики.

Основные фундаментальные достижения этого периода включают условия на границе хорошо проводящей среды (получивших название граничных условий Леонтовича), уравнение для волновых полей с медленно меняющимися амплитудами (параболическое уравнение Леонтовича), теорию распространению радиоволн вдоль поверхности Земли и (совместно с М.Л. Левиным) теорию тонких проволочных антенн. За работы по радиофизике М.А. Леонтович награжден Золотой медалью им. А.С. Попова АН СССР.

В 1951 г. ему поручают руководство теоретическими исследованиями по проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС) в академической лаборатории, позднее ставшей Институтом атомной энергии им. И.В. Курчатова. Создал теорию инерционного сжатия плазмы с током. Его идеи об уравнивании тороидального растяжения плазмы с током при помощи проводящего кожуха и о стабилизации плазменного витка сильным магнитным полем лежат в основе системы "токамак". В 1958 г. за исследования мощных импульсных разрядов в газе для получения высокотемпературной плазмы удостоен Ленинской премии.

Читая лекции в МИФИ и МГУ, М.А. Леонтович создал коллективы молодых ученых, завоевавших мировое признание в радиофизике и физике плазмы и УТС.

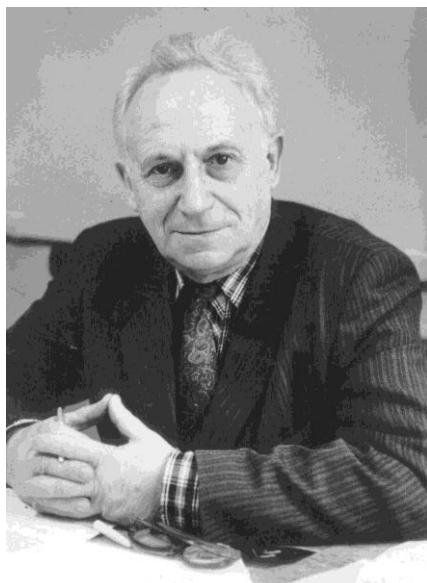
- [1]. М.А. Леонтович. Избранные труды. Теоретическая физика. М.: «Наука», 1985, 432 с.
- [2]. Академик М. А. Леонтович. Учёный. Учитель. Гражданин. М.: «Наука», 2003, 511 с.
- [3]. «Совесть Академии». К 100-летию Михаила Александровича Леонтовича // Природа, 2003, 3, 3.
- [4]. Естествен, как сама Природа. Об академике Михаиле Александровиче Леонтовиче. М.: «Наука», 2005, 368 с.
- [5]. В.С. Лисица. М.А. Леонтович и развитие современной науки // ВАНТ-ТС, 2013, 36, 3.

К 100-ЛЕТИЮ ВЛАДИМИРА ИЛЬИЧА КОГАНА

^{1,2,3}Кукушкин А.Б., ^{1,2,3}Лисица В.С.

¹НИЦ «Курчатовский институт», Россия, ²НИЯУ «МИФИ», Россия, ³МФТИ, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.003



В этом году исполняется 100 лет со дня рождения профессора Владимира Ильича Когана (11.06.1923 — 07.12.2013) — создателя научной школы в теории излучательных процессов в горячей плазме, признанного авторитета в теории излучения плазмы и квантовой механике. В.И. Коган принадлежал к яркой плеяде первых выпускников МИФИ. В 1947 году В.И. пришел в Курчатовский институт в теоретический сектор А.Б. Мигдала, специализировавшийся на задачах квантовой механики и ядерной физики. В 1951 года В.И. активно включился в развернутые исследования по проблеме УТС, перейдя в теоретическую лабораторию М.А. Леонтовича и став одним из пионеров разработки теории излучательных процессов в горячей плазме.

В своей работе В.И. Коган органически соединил начала, восходящие к его учителям А.Б. Мигдалу и М.А. Леонтовичу, — опору на фундаментальные основы квантовой теории излучения и закладывание первых камней в фундамент только нарождавшихся радиационной кинетики и термодинамики сильно неравновесной горячей плазмы. В.И. Когану принадлежит разработка теоретических основ расчета радиационных характеристик горячей плазмы, существенных для ее диагностики и энергобаланса. Им были выполнены пионерские работы по теории уширения спектральных линий, радиационных потерь энергии плазмы, теории тормозного излучения. Особенностью научного стиля В.И. Когана можно считать «концептуализм» — умение схватывать главную суть той или иной физической теории. Эти качества в полной мере проявились в его последних работах, посвященных разработке «Крамерсовской электродинамики» и разбору концепций Н. Бора, А. Эйнштейна и других классиков науки в области соотношения между классической и квантовой теориями излучения. В.И. Коган — автор и соавтор свыше 130 научных статей, в том числе двух десятков обобщающих обзорных работ. Эти работы получили заслуженное признание в нашей стране и за рубежом.

Многие из тех, кому посчастливилось общаться с В.И. Коганом, ощутили его выдающийся педагогический талант, органично впитавший в себя энциклопедические знания, концептуальный подход к самым разным сторонам жизни, энергичную доброжелательность и искрометный юмор. Владимир Ильич имел репутацию неординарного лектора кафедры теоретической ядерной физики МИФИ, преподавателем которой он был с 1947 г. по 2013 г. В.И. Коганом создана школа теоретиков в области физики излучения плазмы, из подготовленных им 15-ти кандидатов наук шестеро стали докторами. Широчайшую известность В.И. Когану принес его (первый в нашей стране, 1956 г.) задачник по квантовой механике, написанный совместно с В.М. Галицким и ставший настольной книгой не одного поколения студентов в нашей стране и за рубежом, выдержав (в соавторстве с Б.М. Карнаковым) три переиздания на русском языке, а также издания на французском и английском языках. В.И. Коган выполнил сложную редакционную работу при подготовке ставшего историческим сборника пионерских публикаций по УТС — четырехтомника «Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций» (ответственный редактор М.А. Леонтович, АН СССР, 1958 г.), в котором напечатан ряд основополагающих работ и самого Владимира Ильича.

ТРАНСПОРТ И ПОТЕРИ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ, ИНИЦИИРОВАННЫЕ ТОРОИДАЛЬНЫМИ АЛЬФВЕНОВСКИМИ МОДАМИ НА ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М/М2

Бахарев Н.Н., Балаченков И.М., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Забродский В.В.,
Ильясова М.В., Киселев Е.О., Корнев В.А., Курский Г.С., Мельник А.Д.,
Минаев В.Б., Миронов М.И., Мирошников И.В., Петров Ю.В., Пономаренко А.М.,
Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Токарев В.А., Тюхменева Е.А.,
Хилькевич Е.М., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е., Щеголев П.Б.,
Яшин А.Ю.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.004

В работе представлен обзор мультидиагностических исследований транспорта и потерь ионов высокой энергии во время тороидальных альфвеновских мод (ТАЕ - Toroidal Alfvén Eigenmode) [1] на токамаках Глобус-М/М2 [2]. ТАЕ является кандидатом на роль самой опасной неустойчивости для удержания быстрых частиц в будущих термоядерных установках. Тороидальные альфвеновские моды, возбуждаемые популяцией МэВных альфа-частиц, рождаемых в ядерной реакции синтеза дейтерия и трития, могут приводить к катастрофическим последствиям. Основная опасность заключается в том, что взаимодействие альфвеновских волн с быстрыми частицами может провоцировать их аномальный транспорт на периферию, создавая локальные нагрузки на стенку токамака, а также снижая эффективность нагрева плазмы и генерации токов увлечения. Экспериментальные исследования ТАЕ на существующих классических токамаках требуют создания специфических условий разряда для возбуждения альфвеновских волн. На сферических токамаках Глобус-М/М2 эти неустойчивости появлялись в рутинных экспериментах с дополнительным нагревом. Они приводили к потере до 30% ионов высокой энергии [3], транспорту более половины быстрых частиц из центральной области плазмы [4], а также к существенному нагреву стенки.

Токамаки Глобус-М/М2 оснащены богатым набором диагностик, позволяющих изучать удержание быстрых частиц, куда входят нейтронные детекторы [5]; анализаторы атомов перезарядки с центральными и периферийными линиями наблюдения [6]; твердотельные детекторы, регистрирующие теряемые частицы; зонд Ленгмюра и быстрая инфракрасная камера. Локализация и структура самой моды может быть получена с использованием диагностики доплеровской рефлектометрии [7] и набора высокочастотных магнитных зондов. Полученные с помощью этих диагностик экспериментальные данные, а также моделирование взаимодействия частиц с волной были использованы для исследования механизмов транспорта быстрых ионов; локальности потерь во времени и пространстве; ширины области резонанса; особенностей эволюции моды во времени из-за взаимодействия с быстрыми ионами и фоновой плазмой; зависимости потерь быстрых частиц от амплитуды моды, тороидального магнитного поля и тока плазмы и особенностей удержания быстрых частиц при ТАЕ в компактных сферических токамаках. Проведенный анализ позволяет дать благоприятный прогноз для будущих установок.

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

Литература

- [1]. N.N. Bakharev et al. Submitted to Nuclear Fusion 2022
- [2]. V. B. Minaev et al 2017 Nucl. Fusion 57 066047
- [3]. N.N. Bakharev et al 2015 Nucl. Fusion 55 043023
- [4]. Yu.V. Petrov et al 2015 J. Plasma Phys. 81 515810601
- [5]. M.V. Piasova et al. NIM A 1029 (2022) 166425
- [6]. N.N. Bakharev et al 2021 Plasma Phys. Control. Fusion 63 125036
- [7]. Yu.V. Petrov et al 2019 Plasma Phys.Rep. 45 723–731

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ПЛАЗМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

¹Минаев В.Б., ¹Гусев В.К., ¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В., ²Багрянский П.А., ¹Балаченков И.М.,
¹Бахарев Н.Н., ³Бондарчук Э.Н., ¹Варфоломеев В.И., ¹Воронин А.В., ³Воронова А.А.,
¹Дьяченко В.В., ¹Горяинов В.А., ⁴Жилин Е.Г., ¹Жильцов Н.С., ¹Ильясова М.В., ³Кавин А.А.,
¹Киселев Е.О., ¹Коновалов А.Н., ⁵Коньков А.Е., ⁵Коренев П.С., ¹Корепанов П.А.,
¹Крикунов С.В., ¹Курский Г.С., ³Лобанов К.М., ¹Мельник А.Д., ³Минеев А.Б.,
¹Мирошников И.В., ¹Новохацкий А.Н., ¹Патров М.И., ⁶Петров А.В., ⁶Пономаренко А.М.,
¹Скрекель О.М., ¹Солоха В.В., ²Соломахин А.Е., ³Танчук В.Н., ¹Тельнова А.Ю.,
¹Ткаченко Е.Е., ¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю., ¹Тюхменева Е.А., ¹Хилькевич Е.М.,
¹Хромов Н.А., ¹Чернышев Ф.В., ¹Шевелев А.Е., ²Шиховцев И.В., ¹Шулятьев К.Д.,
¹Щеголев П.Б., ^{1,6}Яшин А.Ю.

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С. Петербург, Россия, vladimir.minaev@mail.ioffe.ru

² ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия

³ АО "НИИЭФА", С. Петербург, Россия

⁴ ООО Иоффе Фьюжн Текноложии, С. Петербург, Россия

⁵ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁶ Политехнический университет Петра Великого, С. Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.005

Представлен обзор результатов, полученных на сферическом токамаке Глобус-М2 [1] к 2023 г. Эксперименты проводились при тороидальном магнитном поле до 0,9 Тл и токе плазмы до 0,44 МА (90 % от максимальных проектных значений). Впервые в режиме с нейтральной инжекцией (дейтерий 30 кэВ, 0.7 МВт) был продемонстрирован нагрев ионов выше 4 кэВ [2]. Температура электронов составила 1.5 кэВ при средней плотности плазмы $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В экспериментах по безындукционному возбуждению тока последний регистрировался при запуске электромагнитных волн ниже-гибридного диапазона частот (2,45 ГГц) с помощью как тороидально так полоидально ориентированной антенны-грилла. Доля безындукционного тока превысила 50% в разряде с полным током 0,25 МА. Достигнутые значения эффективности $\eta \approx (0.2-0.4) \times 10^{19} \text{ А м}^{-2} \text{ Вт}^{-1}$ сравнимы с результатами, полученными на обычных токамаках. Анализ теплопроводности, базирующийся на полученных экспериментальных данных, выполнен с помощью кодов АСТРА 7.0, NCLASS, SPIDER, NUBEAM и алгоритма 3D Fast Ion Tracking. Скейлинг для сферических токамаков, демонстрирующий сильную зависимость времени удержания энергии от магнитного поля и умеренную от тока плазмы ($\tau_E^{\text{GLB}} \sim I_p^{0.43} B_T^{1.19}$), подтвержден для магнитного поля до 0,8 Тл. Представлены результаты последних экспериментов по исследованию влияния альфвеновских мод на удержание быстрых частиц. Отдельный раздел посвящен развитию диагностик.

Представлена концепция компактного сферического токамака следующего поколения (проект Глобус-3) [3]. В такой установке длительность плазменного разряда должна превышать характерное время формирования стационарных профилей плазмы. Основными особенностями токамака являются длительный импульс, сильное тороидальное магнитное поле и мощный вспомогательный нагрев плазмы, что позволяет рассматривать его как водородный прототип источника нейтронов.

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]. Минеев А.Б. и др., 2022 ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез **45** 2

РАЗРАБОТКА АТОМАРНЫХ ИНЖЕКТОРОВ В ИЯФ СО РАН

Шиховцев И.В.

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.006

В докладе представлены работы по атомарным инжекторам и ионным источникам, выполняемые в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».

В настоящее время производится сборка прототипа атомарного инжектора для установки ГДЛ. Мощность пучка быстрых атомов водорода имеет величину 1,7 МВт при энергии атомов 15 кэВ. Длительность пучка составляет 30 мс в базовом варианте и 300 мс для варианта ионного источника с охлаждаемыми электродами ионно-оптической системы. Отличительная особенность инжектора – рекордный ток ионного пучка – 150 А. Ионный источник разработан на основе четырех дуговых генераторов плазмы и трехэлектродной ионно-оптической системы. Улучшена конструкция дугоразрядных генераторов плазмы, рабочая длительность импульса увеличена до 1 сек и ресурс генераторов составляет 1 год.

Разрабатывается ионный источник с энергией ионов 100 кэВ и током пучка 75 А. После нейтрализатора атомарный пучок будет иметь мощность 3,5 МВт при работе на дейтерии. Высокочастотный источник плазмы имеет два драйвера, установленных на плазменной камере с мультипольной магнитной стенкой, пристыкованной к трех-электродной ионно-оптической системе. Начальный размер пучка ~220 мм x 430 мм, эмиссионная плотность тока - 190 мА/см². Electrodes имеют щелевую структуру, полностью водоохлаждаемые, рассчитаны на стационарный режим работы.

Разрабатывается проект атомарного инжектора на основе отрицательных ионов водорода с энергией 500 кэВ [1]. Экспериментальной базой этой работы является ускорительный стенд высоковольтного инжектора, созданный в ИЯФ СО РАН. По техническому заданию ИЯФ должен изготовить и испытать ускорительную трубку на энергию 400 кэВ и плазменную обдирочную мишень, которые могут быть прототипами для нагревного инжектора для разрабатываемого токамака TRT [2].

Разрабатываются два ионных источника на основе отрицательных ионов водорода с энергией 120 кэВ и током 1,5 А и 9 А. Первый имеет один ВЧ драйвер с мощностью до 60 кВт на частоте 4 МГц, расширительную плазменную камеру с мультипольной магнитной стенкой, трех-электродную ионно-оптическую систему с 25 отверстиями. С ионным источником проводятся эксперименты на стенде высоковольтного инжектора. Ионный источник с током 9 А имеет четыре ВЧ драйвера, расширительную плазменную камеру, трех-электродную ИОС с 145 апертурами. В настоящее время выполняется сборка ионного источника.

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FWGM-2022-0019, FWGM-2022-0020, FWGM-2022-0021).

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, Volume 61, Number 11, 116017 (2021)
- [2]. Ю. И. Бельченко, А. В. Бурдаков, В. И. Давыденко, А. И. Горбовский, И. С. Емелев, А. А. Иванов, А. Л. Санин, О. З. Сотников, Возможная схема инжектора атомарного пучка для нагрева плазмы и генерации тока в токамаке TRT, Физика плазмы, 2021, Т. 47, № 11, стр. 1031-1037

СИЛЬНОТОЧНЫЕ ЭЦР ИСТОЧНИКИ ПРОТОНОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Скалыга В.А., Голубев С.В., Изотов И.В., Выбин С.С., Киселёва Е.М., Поляков А.В.,
Разин С.В.

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской
академии наук, г. Нижний Новгород, Россия, e-mail: skalyga@ipfran.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.007

Источники ионов являются одним из ключевых элементов любых ускорителей тяжелых заряженных частиц. С повышением характеристик ускорительных систем растут и требования к инжекторам ионов. В наиболее крупных проектах, таких как “The International Fusion Materials Irradiation Facility” (IFMIF), “Large Hadron Collider” (LHC), “European Spallation Source” (ESS) требуются пучки ионов водорода и дейтерия с током на уровне 100 мА при нормализованном эмиттансе не более $0.2 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Одним из перспективных источников ионов является источник на основе разряда, поддерживаемого в открытых магнитных ловушках мощным излучением гиротронов в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). Дело в том, использование мощного излучения миллиметрового диапазона длин волн позволяет не только существенно поднять плотность плазмы (которая увеличивается пропорционально квадрату частоты поддерживающего разряд излучения), но и при достаточно высокой температуре электронов перейти от классического (бесстолкновительного) к квазигазодинамическому режиму удержания плазмы с существенно меньшим временем жизни ($\sim 10 \text{ мкс}$), что обеспечивает увеличение плотности потока плазмы из ловушки в сотни раз (получены потоки плазмы со степенью ионизации, близкой к 100% с эквивалентной плотностью тока до 10 А/см^2). Использование мощного миллиметрового излучения современных гиротронов обеспечивает поддержание разряда с рекордно высоким для ЭЦР ионных источников удельным энерговыделением (до 200 Вт/см^3), что позволяет поддерживать плотную плазму (до 10^{14} см^{-3}) с оптимальной для диссоциации и ионизации водорода температурой 50-100 эВ. В экспериментах были получены непрерывные и импульсные протонные и дейтронные пучки с током до 100 - 500 мА и RMS нормализованным эмиттансом на уровне $0.2 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Продемонстрирована возможность генерации чистого протонного пучка без молекулярных ионов (доля примесных ионов менее 0,1%).

СОЗДАНИЕ МОЩНЫХ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ И ОЧИСТКИ ВОДЫ И ВОЗДУХА

¹Василяк Л.М., ²Кудрявцев Н.Н., ³Костюченко С.В.

¹*Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия*

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

³*НПО "ЛИТ", г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.008

УФ излучение эффективно для дезинфекции воды, воздуха и поверхностей, а также для фотохимических реакций в воздухе и воде. Этот метод экологически безопасен, эффективен, простой и дешевый в эксплуатации. Наиболее эффективным источником бактерицидного УФ излучения является электрический разряд в парах ртути низкого давления, который излучает линию атома ртути с длиной волны 254 нм, находящейся вблизи максимума кривой бактерицидной эффективности. Необходимость обеззараживания воды с большими расходами привела к созданию мощных эффективных амальгамных ламп. Разработаны сверхмощные (500 Вт и выше) высокоэффективные амальгамные лампы низкого давления и источник питания к ним с высоким (40%) КПД преобразования электрической энергии в бактерицидное УФ-излучение на длине волны 254 нм, высоким рабочим ресурсом в 12 000 часов при спаде мощности УФ-излучения всего 15%. Для их создания потребовалось решить ряд научных задач, связанных с повышением эффективности, рабочим ресурсом, защитой стенок от воздействия плазмы электрического разряда, разрушения электродов, создания источников питания.

Перспективным методом очистки воздуха от запахов и вредных веществ является фотосорбционно-каталитический метод. Очищаемый воздух обрабатывается ультрафиолетовым излучением с длиной волны 185 и 254 нм, что приводит к образованию активных частиц, радикала ОН, атомарного кислорода О, озона О₃ и др. Процессы окисления и трансформации идут вначале в объемной части фотореактора, затем воздух подается на сорбционно-каталитическую ступень, где недоокисленные компоненты адсорбируются и доокисляются в более медленных процессах активными частицами из газовой фазы, а также кислородом воздуха. Такая комбинация методов и процессов позволяет обеспечить высокую степень очистки при наличии широкого спектра примесей, таких как, сероводород, меркаптаны, аммиак, летучие органические соединения и др. Была разработана кинетическая модель химических реакций удаления сероводорода и формальдегида, включающая 54 реакции, и проведены расчеты, на основе которых были спроектированы и изготовлены установки для удаления запаха из воздуха. Численное моделирование указывает на важную роль присутствия паров воды в реагирующем газе. В сухом воздухе фотоокисления примесей сульфида водорода и метаналя практически не происходит. Это объясняется тем, что при отсутствии молекул воды в газовой смеси активные гидроксильные радикалы (ОН) не могут образовываться в фотореакции. Именно радикалы ОН играют основную роль в иницировании начальной стадии окисления этих примесей. Для этого оборудования были разработаны амальгамные УФ-лампы повышенной мощности 620 Вт и с высоким выходом УФ-излучения 185 нм - 60 Вт и 254 нм -200 Вт. В проточном фотореакторе прямоугольной формы с поперечным сечением 176 x 220,6 см и длиной 160 см перпендикулярно потоку воздуха с расходом 5000 куб.м/час установлены 24 УФ лампы мощностью 620 Вт каждая. Далее поток воздуха проходит через каталитический блок с засыпкой из активированного угля. Эффективность очистки составила 98,5-99,9% при концентрации сероводорода на входе от 10 до 80 мг/куб.м.

РЕЛАКСАЦИЯ КИЛОАМПЕРНОГО РЭП В ПЛАЗМЕ - 50 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аржанников А.В.

Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.009

Впервые эксперимент по релаксации релятивистского (~ 1 МэВ) электронного пучка (РЭП) с килоамперным током в замагниченном плазменном столбе был поставлен в ИЯФ СО АН СССР по предложению Д.Д. Рютова группой под руководством Р.Х. Куртмулаева [1]. Далее первые детальные экспериментальные исследования процесса нагрева плазмы при релаксации РЭП с током 10 кА и длительности импульса 100 нс были проведены в этом институте на специально созданной установке ИНАР [2]. Результаты этих экспериментов получили объяснение в работе [3], где была также положена теоретическая основа для развития исследований процессов в пучково-плазменной системе. Значительным вкладом в развитие этих исследований послужили результаты последующих экспериментов на установке ИНАР [4]. В этот же период времени к исследованиям данной направленности присоединились группы из США [5] и Чехословакии [6]. Однако наивысший результат по параметрам нагретой плазмы при релаксации РЭП был достигнут в РФ на установке ГОЛ-3 при токе пучка 20 кА и длительности импульса около 10 мкс [7].

Наряду с бесстолкновительным нагревом плазмы, важным эффектом интенсивного пучково-плазменного взаимодействия является генерация излучения на плазменных частотах. Впервые механизмы генерации излучения в ходе релаксации пучка нерелятивистских электронов в плазме были предложены для объяснения потоков радиоизлучения из солнечной короны [8-10]. Рассмотрение соответствующих задач в условиях инжекции в плазму сильноточных РЭП было проведено в работах [11-12]. Эксперименты этой направленности были начаты на ГОЛ-3 [13] с использованием РЭП, который применялся в [7] для нагрева плазмы. Далее, в результате проведенных на установке ГОЛ-ПЭТ исследований процесса генерации излучения был достигнут уровень мощности 10 МВт при микросекундной длительности на частоте верхнегибридных колебаний (0.2-0.3 ТГц) в направленном потоке, выведенном в свободное пространство [14].

Перечисленные выше этапы исследований нагрева плазмы и генерации в ней излучения при релаксации килоамперных РЭП будут детально описаны и проанализированы в предлагаемом к рассмотрению обзорном докладе.

Литература

- [1]. Altyntsev A.T., Breizmam B.N., Es'kov A.G. et al. Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion res. IAEA, Vienna, 2, 309 (1971).
- [2]. Абрашитов Ю.И., Койдан В.С., Конюхов В.В. и др. ЖЭТФ, 66, 1324 (1974).
- [3]. Brejzman B.N., Ryutov D.D. Nuclear Fusion, 1974, Vol. 14, N 6, pp. 873-907.
- [4]. Аржанников А.В., Бурдаков А.В., Койдан В.С. и др. Письма в ЖЭТФ, 27 (1978) 173
- [5]. J. D. Sethian, D. A. Hammer, and C. B. Wharton. Phys. Rev. Lett., 40 (1978) 451.
- [6]. Sunka P., Jungwirth K., Kovac I. et al. Proc. of the 3-rd Intern. Topical Conf. on High Power Electron and Ion Beam, Vol. 1, pp. 103 – 112, Novosibirsk, 1979.
- [7]. А.В.Аржанников, В.Т. Астрелин, А.В. Бурдаков и др. Письма в ЖЭТФ, 77, (2003) 426.
- [8]. V.L. Ginzburg, V.V. Zheleznyakov, Sov. Astron. 2, 653 (1958)
- [9]. E.N.Kruchina, R.Z.Sagdeev, V.D.Shapiro // JETP Letters, 1980, Vol.32, Issue 6, pp. 443 – 447
- [10]. A. V. Timofeev, Phys. Usp. 47, 555 (2004)
- [11]. A.V. Arzhannikov, I.V. Timofeev. Plasma Phys. Control. Fusion 54 (2012) 105004 (6pp)
- [12]. I.V. Timofeev, V.V. Annenkov, A.V. Arzhannikov. Physics of Plasmas 22, 113109 (2015)
- [13]. А.В. Аржанников, А.В. Бурдаков, П.В. Калинин, и др. Вестник НГУ. Серия: Физика. 2010. Т. 5, в. 4, с. 44-49.
- [14]. Arzhannikov, A. V., Sinitsky, S. L., Popov et al. IEEE Trans. on Plasma Sc. (2022), 50(8), 2348-2363

ЛАЗЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ, ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И ЧАСТИЦ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

^{1,2}Андреев Н.Е.

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия, andreev@ras.ru

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.010

Интенсивные пучки фотонов и частиц в МэВ диапазоне энергий являются эффективными инструментами во многих областях исследований, таких как создание и диагностика вещества в экстремальных состояниях в экспериментах по УТС, ядерная физика и материаловедение, а также в медицинских и биофизических приложениях. Рассмотрены различные процессы лазерно-плазменного ускорения электронов, начиная с механизма кильватерного ускорения в режиме самомодуляции лазерного импульса [1]. Этот режим генерации ультрарелятивистских электронов лежит в основе создания платформы для диагностики сжатого вещества мишени в ряде крупных лабораторий, ведущих исследования в области термоядерного синтеза с инерционным удержанием [2, 3].

В настоящее время обсуждается более эффективная концепция создания источников γ -излучения и нейтронов, основанная на генерации релятивистских электронов в режиме прямого лазерного ускорения. Лазерные системы ПВт класса мощности, которые могут генерировать субпикосекундные и фемтосекундные импульсы, сфокусированные до ультрарелятивистской интенсивности, являются хорошими кандидатами для создания сильноточных пучков ультрарелятивистских электронов в протяженной плазме с плотностью, близкой к критической [4, 5], что подтверждено в экспериментах [6, 7]. В этих экспериментах, где полимерные аэрогели низкой плотности, изготовленные в ФИАН [8], использовались для создания плазменных мишеней, была зарегистрирована генерация ультрарелятивистских электронов, гамма-излучения и нейтронов с рекордными эффективностями преобразования энергии лазерного импульса в энергию вторичных источников [9].

Получены и проанализированы зависимости параметров лазерно-генерируемых сгустков электронов и жесткого излучения от интенсивности лазерного излучения и плотности плазмы для субпикосекундных и фемтосекундных лазерных импульсов с учетом текущих и будущих экспериментов [5, 10, 11]. Разработанный подход указывает на возможность значительного увеличения эффективности существующих кДж лазерных систем ПВт класса, используемых для исследований в области термоядерного синтеза с инерционным удержанием, и может быть применен для повышения эффективности широкого класса вторичных лазерных источников, таких как, источники электронов, позитронов, бета-тронного и тормозного излучения, протонов и нейтронов различного назначения.

Литература

- [1]. Андреев Н.Е., Горбунов Л.М. УФН. 1999. Т.169. № 1. С.53-56.
- [2]. Joshi C. https://www.orau.gov/stri/ssap2021/HEDP_Feb17/HEDP_Feb17_3.00pm_Joshi.pdf
- [3]. Albert F., Lemos N., Shaw J. L. et al., Nucl. Fusion. 2018. 59(3). 032003.
- [4]. Pugachev L.P., Andreev N.E., Levashov P.R., Rosmej O.N. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2016. V. 829. P. 88–93.
- [5]. Andreev N.E., Popov V.S., Rosmej O.N., et al. Quantum Electronics. 2021. 51. 1019–1025.
- [6]. Rosmej O.N., Andreev N.E., Zaechter S., et al., New J. Phys. 2019. V. 21. P. 043044.
- [7]. Rosmej O.N., Gyrdymov M., Günther, et al. Plasma Phys. Control. Fusion. 2020. 62, 115024.
- [8]. Borisenko N.G., Khalenkov A.M., Kmetik V., et al. Fusion Sci. Technol. 2007. 51. 655–64.
- [9]. Günther M.M., Rosmej O.N., Tavana P., et al. Nat Commun, 2022. V. 13. P. 170.
- [10]. Rosmej O.N., Shen X.F., Pukhov A., et al. Matter Radiat. Extremes. 2021. V. 6, P. 048401.
- [11]. Andreev N.E., Umarov I.R., Popov V S. Quantum Electronics. 2022. in press.

ПРОЕКТ XCELS: УНИКАЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК ЭКСТРЕМАЛЬНОГО СВЕТА, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Хазанов Е.А., Шайкин А.А., Костюков И.Ю., Гинзбург В.Н., Мухин И.Б.,
Яковлев И.В., Соловьев А.А., Кузнецов И.И., Миронов С.Ю.,
Коржиманов А.В., Буланов Д.Н., Шайкин И.А., Кочетков А.А.,
Кузьмин А.А., Мартыанов М.А., Ложкарев В.В., Стародубцев М.В.,
Литвак А.Г., Сергеев А.М.

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.011

Проект XCELS (eXawatt Center for Exteme Light Studies) направлен на создание в России исследовательской инфраструктуры – Центра исследований экстремальных световых полей. Ядром инфраструктуры должен стать многоканальный (12 каналов) источник света с рекордной (субэкзаваттной) мощностью. Важной особенностью установки XCELS является ее многоканальность, что предполагается использовать для формирования в области фокуса сложных распределений световых полей, максимизирующих различные параметры излучения (например, напряженность лазерного поля). Дополнительные каналы могут также применяться как в целях диагностики, так и для генерации нескольких потоков вторичного излучения и частиц. Основной задачей инфраструктуры является исследование фундаментальных процессов взаимодействия лазерного излучения экстремально высокой интенсивности с веществом. Можно надеяться, что проект XCELS позволит достичь новых рубежей в физике сильных электромагнитных полей, а также позволит исследовать фундаментальные процессы, такие как преобразование света в материю посредством квантово-электродинамических каскадов [1], эффекты поляризации вакуума в сильном поле (например, четырехволновое взаимодействие, соответствующее упругому фотон – фотонному рассеянию) [2], интенсивное лазерно-плазменное взаимодействие, приводящее к образованию плазменных структур, состоящих из вторичных частиц (электрон-позитронных пар) [3]. Исследования на установке XCELS могут привести к генерации новых знаний в других областях науки, таких как лабораторная астрофизика [4], ядерная фотоника [5], физика состояний вещества с высокой плотностью энергии [6]. В докладе обсуждаются методы генерации, преобразования и сложения лазерных пучков высокой интенсивности. Представлен обзор возможных экспериментов как в области фундаментальных исследований, прежде всего связанных с квантовой электродинамикой в сильных электромагнитных полях, так и приложений, основанных на лазерно-плазменных технологиях (высокоградиентные ускорители электронов [7,8] и ионов [9], яркие и компактные источники излучения в труднодоступных областях ЭМ спектра [10] и др.). Уникальные особенности установки XCELS делают возможным создание источников частиц и вторичного излучения с беспрецедентными параметрами.

Литература

- [1]. Н.Б. Нарожный, А.М. Федотов Успехи физических наук 185, 103 (2015).
- [2]. A. Di Piazza, C. Müller, K.Z. Hatsagortsyan, C.H. Keitel Rev. Mod. Phys. 84, 1177 (2012).
- [3]. A.S. Samsonov, E.N. Nerush, I.Yu. Kostyukov, Scientific reports 9, 11133 (2019).
- [4]. S. Bulanov, T. Esirkepov, D. Habs, Eur. Phys. J. D, 55, 483 (2009).
- [5]. В.Г. Недорезов, С.Г. Рыкованов, А.Б. Савельев, УФН 191, 1281 (2022).
- [6]. C. Bargsten et al., Science Advances 3, 1 (2017).
- [7]. E. Esarey, P. Sprangle, J. Krall, A. Ting, Rev. Mod. Phys. 81, 1229 (2009).
- [8]. И.Ю. Костюков, А.М. Пухов Успехи физических наук 185, 89 (2015).
- [9]. A. Macchi, M. Borghesi, M. Passoni Rev. Mod. Phys. 85, 751 (2013).
- [10] S. Corde et al., Rev. Mod. Phys. 85, 1 (2013).
- [11]. M.G. Lobok et al., Plasma Phys. Control. Fusion 64, 054002 (2022).

СВЕРХНОВЫЕ КАК СРЕДСТВО ИЗУЧЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

^{1,2,3}Глазырин С.И., ^{1,3}Урвачев Е.М., ^{3,1}Блинников С.И.

¹ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова», Москва, Россия, glazyrin@vniia.ru

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

³НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.012

Являясь яркими событиями в жизни любой галактики, сверхновые представляют инструмент для изучения как крупномасштабной структуры, так и удалённых частей Вселенной. Развитие астрономии позволило открывать такие вспышки сотнями за сутки в автоматическом режиме, что значительно повысило точность этого инструмента в последнее время. Его применение основано на обработке наблюдаемых данных - спектров, кривых блеска, которые также несут множество информации о плазменных процессах в сверхновых. Экстремальные состояния вещества в звезде позволяют изучать эффекты, недоступные для лабораторного исследования на Земле. Гидродинамические и радиационные процессы являются доминирующими, а в условиях звёздных масштабов может происходить практически неограниченный рост различных неустойчивостей, что проявляется в наблюдательных данных. В докладе будут обсуждаться процессы в некоторых типах сверхновых, важных для космологии, и возможности, которые они предоставляют для изучения Вселенной. Одни объекты — термоядерные сверхновые (SNIa), благодаря которым было открыто ускоренное расширение Вселенной [1]. Кривая блеска таких сверхновых имеет особенность: абсолютная светимость в максимуме коррелирует с шириной кривой блеска — соотношение Псковского-Филлипса [2], что и позволяет их использовать в космологических приложениях. Это соотношение получено эмпирически, теоретическое его обоснование пока находится на стадии дискуссий в литературе. Вспышки SNIa возникают при термоядерном горении белых карликов в двойных системах: при слиянии звезд, либо из-за развития неустойчивостей в результате аккреции. Фундаментальная проблема таких сверхновых связана с физикой горения, его неустойчивостями, турбулентностью, а также переходом в детонацию. Наблюдаемые параметры остатков сверхновых, распределения элементов позволяют также обогатить наши знания о горении. Из-за сложности с теоретическим обоснованием соотношения Псковского-Филлипса, такие сверхновые не могут быть использованы напрямую в космологии при измерении расстояний до удалённых объектов, а требуют калибровки. Другой класс сверхновых, у которых наблюдаются узкие линии в спектре, позволяют построить прямой метод измерения расстояний [3]. Метод строится на основе того, что в таких объектах свечение определяется фронтом радиативной ударной волны. Хотя проверка метода на нескольких объектах показывает хорошую точность, многомерные эффекты вносят неопределённость. Плотный тонкий слой, который следует за головной ударной волной, в многомерной динамике может быть неустойчив и фрагментироваться, что скажется на эффективности свечения. Эти сверхновые помимо вклада в космологию представляют интерес для проверки моделей радиационной гидродинамики.

Литература

- [1]. A. Riess et al. ApJ 116, 1009 (1998); S. Perlmutter et al. ApJ 517, 565 (1999).
- [2]. Yu. Pskovskii Sov. Astron 21, 675 (1977); M. Phillips ApJ 413, 105 (1993).
- [3]. П.В.Бакланов и др. Письма в ЖЭТФ 98, 489 (2013).

ИТЭР. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ УРОКИ.

Химченко Л.Н., Красильников А.В.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, l.khimchenko@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.013

Очевидно, что развитие цивилизации определяется уровнем потребления энергии. В последнее время в мире развернулась масштабная дискуссия о соотношении энергетики на ископаемом топливе и так называемой «зеленой» энергетики. Но как показали события последних месяцев, «зеленая» энергетика в мире начала давать сбои. Опять потребовались газ и уголь. Опять заговорили о развитии атомной энергетики для достижения целей устойчивого развития, и особенно — о термоядерной энергетике, как неисчерпаемом источнике энергии.

Проект ИТЭР является важным шагом на пути к термоядерному реактору. На последнем заседании Совета ИТЭР – IC31, было отмечено, что выполнено 78% работ по сооружению инфраструктуры и изготовлению систем установки ИТЭР. Достигнут важный, знаковый, параметр строительства – собран первый сектор вакуумной камеры со сверхпроводящими катушками тороидального магнитного поля, и прошёл «притирку» в шахте токамака.

При этом проект сталкивается с давлением, связанным со сложностью сборки, расширением масштабов проекта, учитывающего дальнейшее развитие за пределами Первой плазмы, замедлением изготовления и поставок наиболее технологически сложных изделий, изменением логистических связей, желанием некоторых участников проекта оптимизировать свои финансовые взносы и т.д. Всё это приводит к сдвигам графика выполнения работ и возможному отодвиганию сроков создания Первой плазмы.

При создании такой большой и сложной машины, как ITER, трудности и неудачи не являются неожиданностью — они являются неотъемлемой частью изготовления, сборки и установки первых в своем роде компонентов. Спустя два с половиной года после начала этапа сборки токамака, ITER столкнулся с первой серьезной проблемой, были выявлены дефекты в двух ключевых компонентах токамака - теплозащитных экранах и секторах вакуумной камеры. На исправление также должно уйти время.

Проект показал также, что такие большие установки требуют улучшенной культуры производства и тесной координации систем качества стран-участников. Что надо более качественно просчитывать последствия рисков. А в ситуациях санкционного давления на Россию искать решения проблем, вовлекая всех партнёров проекта. Также надо готовить общество, что технологические «аварии» в пилотных проектах такого масштаба и уникальности могут задерживать сооружение на больший срок, чем это обычно планируется.

Работа по проекту ИТЭР показала, что России проект позволяет иметь информацию о использовании самых «продвинутых» термоядерных технологий и держать свой высокий технологический уровень. Но, при этом, также уже понятно, что Россия кроме программы по созданию термоядерной энергетики, должна иметь свою ключевую установку, нацеленную на проверку технологий термоядерного реактора.

Работа выполнена по государственному контракту с ГК «Росатом» от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123.

СТАТУС РАЗРАБОТКИ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

Красильников А.В., Коновалов С.В., Кащук Ю.А.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, a.krasilnikov@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.014

Основными целями создания Токамака с Реакторными Технологиями (TRT) являются:

- разработка и интеграции в одной установке ключевых инновационных термоядерных технологий (создание дополнительной к ИТЭР технологической платформы TRT): ВТСП электромагнитной системы, работающей при высоком (8 Т на оси плазмы) магнитном поле, металлической и литиевой жидкометаллической первой стенки, инновационного дивертора, системы инжекции атомов с энергией 0.5 МэВ и мощностью несколько десятков МВт, мегаваттных квазистационарных ($t > 100$ с) гиротронов с частотой 230 ГГц, ИЦН на частотах 60-80 МГц мощностью несколько МВт, системы неиндуктивной генерации тока, тритиевого комплекса, технологии дистанционного управления, совместимых с термоядерным реактором диагностик, технологии поддержания квазистационарных разрядов в плазме с т/я параметрами;

- проведение пионерских исследований работы токамака в режиме горения термоядерной плазмы ($Q > 1$) с интенсивным нагревом альфа-частицами в центре плазменного шнура в дейтерий-тритиевых экспериментах, а также эффективности генерации т/я мощности с другими реагирующими ионами на дотритиевой фазе;

- интеграции технологических разработок ИТЭР в российскую программу УТС.

TRT разрабатывается как плазменный прототип как чистого т.я. реактора, так и т.я. источника нейтронов для гибридного (синтез-деление) реактора.

Основной целью программы физических исследований на дотритиевой фазе работы TRT является реализация квазистационарного разряда с реакторными параметрами и длительностью 100 секунд и более. Анализ режимов разрядов показывает, что основные цели TRT достигаются в относительно широком диапазоне параметров: $B = 8$ Т, $I_p = 4 - 5$ МА, $n_e = 0.5 - 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $P_{\text{доп}} = 25 - 40$ МВт.

Программа исследований TRT обеспечивает разработку технологий т/я и гибридного реакторов:

- генерация квазистационарного тока (НИ, ЭЦ, Геликоны, бутстреп),
- разработка квазистационарных реакторных режимов взаимодействия плазма – стенка
- разработка инновационного прототипа квазистационарного дивертора
- исследования прототипов экспериментальных модулей blankets
- разработка технологий тритиевого топливного цикла
- исследование эффективности т/я реакций при различных топливных смесях
- разработка дистанционного управления т/я реактором и роботизация.

Разработка программы исследований TRT ведётся параллельно с определением необходимых для её реализации диагностик. Планируемый на настоящем этапе разработки TRT состав диагностического комплекса и требования к его компонентам будут также представлены в докладе.

СТАТУС ТОКАМАКА Т-15МД

Анашкин И.О., ¹Бондарчук Э.Н., Горбунов А.В., Земцов И.В., Кирнева Н.А.,
Ковалишин А.А., Кочин В.А., Крупин В.А., Лавренюк П.И., Левин И.В.,
Лутченко А.В., ¹Минеев А.Б., Модяев А.Л., Мустафин Н.А., Николаев А.В.,
Ноткин Г.Е., Пименов И.С., ²Романников А.Н., Рой И.Н., Соколов М.М.,
Сушков А.В., Хайрутдинов Э.Н., Хвостенко А.П., Хвостенко П.П., Чудеснов А.И.,
Чудновский А.Н.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

¹АО «НИИЭФА, Санкт-Петербург, Россия

²АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.015

Установка Т-15МД – токамак, основной особенностью которого является сочетание низкого аспектного отношения ($A=2.2$) и высокого тороидального магнитного поля, $B=2.0$ Т, предназначен для работы с плазмой поперечного сечения с эллиптичностью 1.8 и треугольностью до 0.4 при $R=1.48$ м, $a=0.67$ м и токе плазмы до 2.0 МА [1]. Установка к 2026 году будет оснащена уникальным для отечественных токамаков комплексом дополнительного нагрева: электронно-циклотронный нагрев и генерация тока с мощностью 5 МВт, инжекция нейтральных атомов с мощностью 6 МВт, нагрев и генерация тока ниже-гибридными волнами мощностью 4 МВт, нагрев и генерация тока на частотах ионного циклотронного резонанса 6 МВт. После осуществления физического пуска токамака Т-15МД в мае 2021 года были начаты работы по электроснабжению установки от ТЭЦ-16 АО «Мосэнерго». К декабрю 2022 г. были закончены работы по подключению всего электротехнического оборудования от п/с №745, 110/10 кВ, 300 МВА к электромагнитной системе токамака Т-15МД. Проведена установка в камеру защитных графитовых плиток. Полностью смонтирован и отъюстирован вакуумный волноводный тракт для ввода мощности гиротрона предыонизации, в камеру токамака введена СВЧ-мощность 1 МВт в течение 50 мс. Создана система контроля радиационной обстановки, с регистрацией интенсивности жесткого гамма и нейтронного излучений, как в зоне установки, так и за ее пределами. Проведена вакуумная подготовка разрядной камеры, включая омический прогрев и тлеющий разряд.

Диагностический комплекс установки предусматривает широкий набор различных диагностик, которые позволят проводить широкий спектр фундаментальных и прикладных исследований в области физики токамаков. В настоящее время подготовлены и смонтированы на установке диагностики пускового минимума, включая электромагнитную, спектроскопию в видимой области спектра, диагностики радиационных потерь и мягкого рентгеновского излучения. Для измерения плотности плазмы на начальной стадии экспериментов подготовлен канал вертикального зондирования СВЧ интерферометра с длиной волны 0.9 мм. Для осуществления контроля пробоя и развития плазменного шнура смонтированы 3 видеокamеры. Выполнено подключение диагностик для реализации начальной фазы экспериментов с плазмой к цифровой системе регистрации. Проведены подготовка и тестирование сценария разряда для реализации начальной фазы экспериментов в системе управления плазмой Т-15МД.

Энергетический пуск и первые плазменные эксперименты планируются провести в декабре 2022г.-1 кв. 2023г.

Литература

- [1]. П.П. Хвостенко, И.О. Анашкин, Э.Н. Бондарчук, Н.В. Инютин, В.А. Крылов, И.В. Левин, А.Б. Минеев, М.М. Соколов. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕРМОЯДЕРНАЯ УСТАНОВКА ТОКАМАК Т-15МД // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2019, том 42, вып. 1, с.15-38.

ПЛАЗМЕННЫЙ ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД

Норман Г.Э., Саитов И.М.

ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, saitov@ihed.ras.ru

НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, gnorman@hse.ru

МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия DOI: 10.34854/ICSPAF.2022.49.1.006

Сделан обзор теоретических и экспериментальных методов, применяемых для решения задачи о фазовых переходах флюид-флюид, включая плазменный фазовый переход (ПФП). Особое внимание уделено водороду/дейтерию. Рассмотрены также результаты для гелия, алюминия, цезия, церия, ионной и экситонной плазм и некоторых других веществ.

Рассмотрено развитие химической модели при описании ПФП. В квантовом методе молекулярной динамики особое внимание уделено уравнению состояния, электропроводности и оптическим свойствам. Затронут метод молекулярной динамики для интегралов по путям.

Выделено исследование ионизации молекул при фазовом переходе во флюиде водорода. Показано, что одновременно происходят два процесса: резкое уменьшение концентрации молекул H_2 и возникновение молекулярных ионов с межпротонными расстояниями как в H_2^+ и H_3^+ с резким увеличением электропроводности. Полная диссоциация и ионизация возникают только при дальнейшем сжатии, причём плавно. Результаты указывают на переход молекулярного флюида водорода в состояние атомарного флюида через образование промежуточного состояния, содержащего молекулы, атомы и протонные кластеры, включая молекулярные ионы. Известные фазовые переходы жидкость – жидкость в других веществах имеют сопутствующие фазовые переходы твердое тело – твердое тело близкой природы. В связи с этим рассмотрены фазовые переходы в кристаллическом водороде вблизи линии плавления при высоких давлениях. ПФП приводит не только к частичной ионизации молекул H_2 , но и к изменению структуры ионизированной фазы по сравнению с молекулярной. Структурная природа достаточно сложна, так как при переходе возникают многопротонные комплексы с межатомными расстояниями, равными расстояниям не только в H_2^+ , но и в H_3^+ .

Метастабильные состояния разогретого плотного водорода при фазовом переходе в проводящее состояние были обнаружены в рамках химических моделей и квантового метода молекулярной динамики. Подчеркнём значительное перекрытие по плотности равновесной ветви одной фазы и метастабильной ветви другой на изотерме зависимости давления P от удельного объёма V . Другой отличительной чертой ПФП является то, что критическая точка в координатах P - V лежит по давлению ниже двухфазных состояний. Линия сосуществования фаз во флюиде водорода в координатах P - V выглядит как длинный, наклонный, изогнутый и очень узкий язык, вытянутый в сторону низких давлений. Такие особенности фазовых переходов, плазменного и диссоциативного, позволяют предложить существование нового класса фазовых переходов, ионизационно-диссоциативных. Наклон линии сосуществования фаз отрицателен на плоскости T - P . Учет квантовых эффектов ядер не меняет эти выводы.

Исследования ПФП в других веществах показали, что наблюдаются как сходства с ПФП в водороде/дейтерии, так и отличия от него: (а) рассмотрены как однократная, так и многократная ионизации, (б) метастабильные ветви изотермы мало исследованы, (в) кривые фазового равновесия $T(P)$ могут иметь как отрицательный, так и положительный наклон, (г) все тройные точки лежат на линии плавления, (д) переход может приводить не только к ионизации, но и к изменению структуры ионизированной фазы по сравнению с неионизированной, (е) в твёрдом теле также наблюдаются фазовые переходы, связанные с ионизацией, с тройной точкой на линии плавления.

Подробное изложение представлено в обзоре [*УФН* **191** 1153 (2021)]. Благодарим Р.А. Сартана, вместе с которым сделаны работы по метастабильным состояниям разогретого плотного водорода. Работа поддержана грантом РНФ 18-19-00734.

SPHERICAL TOKAMAK PATH TO FUSION – HISTORY AND THE NEXT STEP

Gryaznevich M.

Tokamak Energy Ltd., Abingdon, UK, e-mail: mgryaz@gmail.com

DOI: 10.34854/ICPAF.2023.50.2023.1.1.016

In this talk, the history of Spherical Tokamaks and of the ST path to Fusion, as well as advances in the ST physics and technology R&D will be overviewed.

The Spherical Tokamak (ST) path to Fusion offers key elements needed to enable magnetic confinement fusion to make the transition from pure government-funded research programmes to the commercial marketplace and attract commercial cost sharing at an affordable level and with low financial risk: a low-cost, low-power, small-size market entry vehicle and a strong economy of scale in larger next step devices. This ST path has certain specifics that makes it different from the conventional JET-ITER-DEMO path: 1) The ST approach can progress from the pilot plant to the power plant just by increasing the linear dimensions of the device without significant changes in technology (Stambaugh 1998 Fusion Technol. 33 1); 2) The use of High Temperature Superconductors (HTS) in an ST allows both high field and compact size. The high beta potential of the ST is so great that the physics of this device will not determine its size; 3) The development path to a Power Plant based on ST can be faster and cheaper than the conventional JET-ITER-DEMO path, so attractive to the private investors. According to the report published by the Fusion Industry Association, private investments into fusion development have already exceeded \$4.7 billion in total, spread over several alternative to the mainstream approaches.

It was found that the physics and technical demands of the ST approach diminish with device size. It was shown (Costley 2015 Nuclear Fusion 55 033001) that the power efficiency of a Fusion reactor, Q , depends mainly on the Fusion power produced, but not on the device size. That is why at Tokamak Energy Ltd, a private company in Oxfordshire, UK, we started our path to Fusion with a very compact but high field prototype, ST40, which has already demonstrated Fusion relevant plasma temperatures exceeding 100 M degrees confirming a significant improvement of performance with the increase in the toroidal field in STs. The use of HTS in tokamak magnets, the possibility of which was demonstrated by TE.Ltd in 2013 in the full-HTS tokamak, and by achieving magnetic fields of up to 24T in tokamak magnet relevant magnet prototypes, allows reduction in the size of the tokamak central post allowing more space for neutron protecting shielding and smaller size overall.

Most of recent DEMO and reactor designs assume pulsed operations. Advantages of pulsed reactors, including economics, have been discussed recently in detail (Segal NF 2021, Frank, Ph. Plasm. 2022 for conventional tokamaks, Gryaznevich, Plasma 2022 for STs). ST reactors have even more advantages due to possibility of high bootstrap current, stronger increase in the confinement with the toroidal field, good stability, and lower requirements on the volt-second capability of the central solenoid for the plasma current sustainment. These advantages will be discussed in detail.

**СЕКЦИЯ
«МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ПЛАЗМЫ»**

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЕВОЙ СТРУИ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ ТОКАМАКА

Коробко Д.Д., Тимохин В.М., Сергеев В.Ю., Богданов А.М.

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
korobko.dd@edu.spbstu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.017

Спектроскопическая диагностика периферийной плазмы токамака с инжекцией нейтрального гелия предоставляет ценную информацию о распределении электронных температуры и плотности в периферийных областях плазменного шнура из соотношений измеренных интенсивностей излучения в спектральных линиях нейтрального гелия [1]. Понимание физических процессов, происходящих при взаимодействии нейтрального гелия с высокотемпературной плазмой токамака, позволит улучшить качество получаемых результатов и их интерпретации.

Первым шагом к расчёту распределений возбуждённых атомов гелия было исследование течения нейтрального гелия в системе инжекции спектроскопической диагностики, установленной на токамаке «Глобус-М2» [2]. Также были проведены расчёты параметров сопла Лавалья, способного оптимизировать указанную систему инжекции. Численное моделирование течения нейтрального гелия было выполнено с помощью CFD-пакета среды вычислений ANSYS Fluent [3].

В докладе приведены результаты численных расчётов распределения атомов гелия в возбуждённом состоянии $1s3s(^3S)$, соответствующего излучению в линии нейтрального гелия 706 нм ($1s3s(^3S) - 1s2p(^3P^0)$). По скейлингу газодинамического разлёта газа из отверстия в вакуум, приведённому в работе [4], оценивалось распределение плотности атомов инжектированного гелия n_{He} в камере токамака. В формировании этого распределения были учтены процессы ионизации и перезарядки. Профили электронных температуры и концентрации брались из расчёта по коду SOLPS-ITER [5]. По известному сечению возбуждения основного состояния гелия на верхний уровень перехода $1s3s(^3S) - 1s2p(^3P^0)$ оценивалось пространственное распределение интенсивности излучения в соответствующей линии:

$$I_{706}(R, Z, \varphi) \sim n_{He}(R, Z, \varphi) n_e(R, Z, \varphi) \langle \sigma v \rangle (T_e(R, Z, \varphi)), \quad (1)$$

где $n_e(R, Z, \varphi)$ – электронная концентрация, $\langle \sigma v \rangle (T_e(R, Z, \varphi))$ – сечение возбуждения из основного состояния в $1s3s(^3S)$.

Подробный анализ полученных результатов и их обсуждение приведены в докладе.

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]. S.J. Zweben et al. Rev Sci Instrum. 2017 Apr; 88(4):041101. doi: 10.1063/1.4981873. PMID: 28456269.
- [2]. В. М. Тимохин и др., Письма в ЖЭТФ, 116:5 (2022), 292–299.
- [3]. ANSYS Fluent. 2022. – URL: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent> (дата обращения 10.10.2022)
- [4]. В.Г. Дулов, Г.А. Лукьянов Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, формула (4.18), стр. 81 (1984).
- [5]. V.A. Rozhansky et al. Nucl. Fusion 41 387 (2001).

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА «ГЛОБУС-М2» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЖЕКЦИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ГЕЛИЯ

Ануфриев Е.А., Сергеев В.Ю., Тимохин В.М., Шаров И.А.

Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого, г.

Санкт-Петербург, Россия,

e-mail: anufriev_ea@spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.018

Напуск гелия (He) в высокотемпературную плазму токамаков и стеллараторов активно используется для диагностических целей на большинстве современных установок с магнитным удержанием [1]. Получение детальной информации о профилях концентрации и температуры электронов на периферии и в диверторной области плазменного разряда является актуальной задачей физики высокотемпературной плазмы [2]. В докладе представлены первые результаты диагностики, разработанной для токамака «Глобус-М2» и основанной на измерении соотношений интенсивности излучения линий нейтрального гелия (HeI).

Главным элементом диагностики является полихроматор, построенный на основе быстрой камеры Miro M110 [3] с частотой съемки до 1600 кадров в секунду при полном пространственном разрешении. Оптическая система полихроматора позволяет получать одновременно четыре изображения излучения на спектральных линиях гелия, занимающие область $\sim 300 \times 300$ пикселей на матрице камеры каждое. Подробнее устройство и расположение диагностики описано в работе [4].

Были получены экспериментальные данные в широком диапазоне параметров плазмы и режимов инжекции гелия. Серия разрядов #40268 – #40270 была выбрана для детального анализа из-за относительно большого контраста между излучением струи и фоновым излучением по сравнению с другими разрядами и, следовательно, большей локальности измерений. Измеренные значения электронной концентрации и температуры (T_e , n_e) для данной серии находятся в диапазоне $(1-2) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и 20-40 эВ соответственно. Сравнение с результатами моделирования по коду SOLPS-ITER [5] демонстрирует удовлетворительное соответствие с измеренными профилями. Экспериментально обнаружено снижение электронной концентрации и рост электронной температуры при приближении к сепаратрисе в обдирочном слое со стороны сильного магнитного поля.

После анализа первых экспериментальных результатов, продемонстрировавших работоспособность диагностики, настройки её оптической системы были модифицированы. Также была усовершенствована процедура компьютерной обработки изображений гелиевой струи. Это позволило улучшить качество и достоверность получаемых результатов измерений. Полученные распределения электронных концентрации и температуры, а также их детальный анализ представлены в полной версии доклада.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту №0784-2020-0020 с использованием оборудования Федерального центра коллективного пользования "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" ФТИ им. А.Ф. Иоффе, включающего Уникальную научную установку "Сферический токамак Глобус-М".

Литература

- [1]. S. J. Zweben et al., Review of Scientific Instruments **88**, 041101 (2017).
- [2]. Ikeda, K. (2007) Progress in the ITER Physics Basis. Nuclear Fusion, 47, S203.
- [3]. Vision Research, камера Miro M110. <https://www.phantomhs.ru/produktsiya/24/585/>.
- [4]. В. М. Тимохин и др., Письма в ЖЭТФ, 116:5 (2022), 292–299.
- [5]. V.A. Rozhansky et al., Nucl. Fusion **41** 387 (2001).

УПРАВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОМ ПЛАЗМЫ В ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МНОГОПРОВОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-NB

Полозова П.А., Баткин В.И., Беклемишев А.Д., Иванов И.А., Куклин К.Н., Куркучев В.В., Поступаев В.В., Ровенских А.Ф.

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.019

ГОЛ-NB — это открытая аксиально-симметричная многопроволочная ловушка, состоящая из центральной пробочной ловушки длиной 2,3 м, двух секций с многопроволочным магнитным полем длиной 3 м и концевых баков расширителей плазменного потока. Для нагрева мишенной плазмы используются два нейтральных инжектора [1] суммарной мощностью до 1 МВт.

Ввиду особенностей конструкции, плазма в установке ГОЛ-NB предрасположена к желобковой МГД-неустойчивости. Такая неустойчивость представляет наибольшую опасность, так как характеризуется большим значением инкремента. Причиной желобковых неустойчивостей является факт, что точка минимума магнитного поля на оси ловушки является седловой – магнитное поле нарастает от этой точки вдоль оси к магнитным пробкам, но убывает поперек оси. Одним из эффективных способов стабилизации данной неустойчивости является вихревой метод, заключающийся в прикладывании к электродам, на которые опирается плазма, дифференциальных по радиусу потенциалов. При взаимодействии с радиальным электрическим полем происходит дифференциальное вращение плазмы. Причем частота вращения зависит от радиуса магнитной трубки и от приложенного потенциала, тем самым препятствуя дальнейшему развитию желобков и, соответственно, выбросу плазмы на стенку ловушки.

Часть желобковых колебаний подавляется торцевой стабилизацией [2] с эффектом КЛР [3], но в плазме с низким β (именно такой является плазма в установке ГОЛ-NB) эффект КЛР не может стабилизировать все потенциальные возмущения. Для разрешения данной проблемы в настоящее время на установке ведется работа по развитию метода вихревого удержания плазмы. Для оценки устойчивости плазмы в работе используется критерий Розенблюта-Лонгмайра, ключевым варьируемым параметром которого является кривизна силовых линий.

На данном этапе работы осуществлена разработка, создание систем внутрикамерных электродов и лимитеров с соответствующими комплектами управляемого питания, а также введение их в эксплуатацию на установке ГОЛ-NB. Исследованы амплитуды и характерные частоты колебаний локальных потенциалов плазмы в зависимости от подаваемого на плазмоприемники и лимитеры напряжений. Используемый в экспериментах диагностический комплекс включает в себя электростатические зонды и катушки Мирнова.

В докладе представлено устройство системы управления потенциалом плазмы и результаты исследований поведения параметров плазмы в зависимости от сценария эксперимента и величины потенциалов, прикладываемых к плазмоприемникам и лимитерам.

Литература

- [1]. Поступаев В. В., Юров Д. В. Моделирование референсного сценария работы многопроволочной ловушки ГОЛ-NB //Физика плазмы. – 2016. – Т. 42. – №. 11. – С. 966-977.
- [2]. Ryutov D. D. et al. Magneto-hydrodynamically stable axisymmetric mirrors //Physics of Plasmas. – 2011. – Т. 18. – №. 9. – С. 092301.
- [3]. Rosenbluth M. N., Krall N. A., Rostoker N. Finite Larmor radius stabilization of " weakly" unstable confined plasmas. – General Dynamics Corp., San Diego, Calif., 1962. – №. GA-2371.

РАСЧЕТ МОЩНОСТНЫХ НАГРУЗОК ОТ ПУЧКА НА КОМПОНЕНТАХ ТРАКТА ИНЖЕКТОРА И НА СТЕНКЕ КАМЕРЫ ТОКАМАКА T-15МД

Баркалов Е.Е., Баркалов К.Е., Длугач Е.Д., Ерёмин В.А., Панасенков А.А.

НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Barkalov_KE@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.020

В настоящее время проводятся работы по модернизации системы инжекции нейтральных пучков токамака T-15МД. В качестве источника дополнительного нагрева плазмы в токамаке планируется использовать три инжектора энергичных атомов водорода, каждый с мощностью 2 МВт [1]. Система инжекционного нагрева (СИН) установки T-15МД является глубокой модернизацией СИН «старого» токамака T-15, многие элементы которой функционально не соответствуют современным требованиям, одним из которых является существенное увеличение длительности импульса до десятков, а затем и сотен секунд. При переходе в практически стационарный режим работы огромную роль начинают играть величины мощностных нагрузок на компоненты пучкового тракта инжектора. Если при работе в режиме коротких импульсов (на уровне 1 секунды) можно было упростить охлаждение компонентов, принимая во внимание их теплоёмкость и возможность остывания в паузах между импульсами, то теперь модернизированные конструкции компонентов должны обеспечивать их адекватное стационарное охлаждение.

В данной работе представлены результаты расчётов транспортировки пучков ионов и атомов с помощью кодов PDP и BTR [2, 3], на основе которых получены параметры пучка, входящего в плазму токамака, и мощностные нагрузки на компоненты тракта как от прямого перехвата пучка, так и от энергичных ре-ионов, образующихся по всему тракту вследствие ре-ионизации части нейтрального пучка при столкновениях быстрых атомов с молекулами фонового газа. Эти ре-ионы отклоняются рассеянным магнитным полем токамака в основном на стенки атомопровода, соединяющего инжектор с токамаком, и как показывают расчёты, они могут в зависимости от профилей магнитного поля и фонового газа давать локальные нагрузки с высокой плотностью мощности. Аналогично, часть выходящих из нейтрализатора остаточных ионов, отклоняемых магнитным полем электромагнита, по мере своего движения к приёмнику перезаряжается на фоновом газе с образованием энергичных атомов. На основе расчётных данных определены места установки охлаждаемых защитных элементов в камере инжектора и в атомопроводе и профили нагрузок на них.

Введённый в токамак нейтральный пучок не полностью захватывается в плазме, часть его проходит «насквозь» на стенку камеры. Проведены расчёты доли прошедшей мощности, которая зависит от плотности плазмы, энергии пучка, его размера и профиля на входе. Так как мощность вводимого пучка с одного инжектора может составлять до 2 МВт, то для неохлаждаемой стенки камеры определены ограничения на вводимую мощность в зависимости от параметров плазмы.

Литература

- [1]. Баркалов К.Е., Анашкин И.О., Баркалов Е.Е., Грибов А.А., Королёв В.Ф., Никулин В.А., Панасенков А.А., Петров В.С. «Система инжекции для нагрева плазмы токамака T-15МД», XLVIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 15-19 марта 2021г. сборник тезисов докладов, стр. 69
- [2]. Ананьев С.С., Длугач Е.Д., Кутеев Б.В., Панасенков А.А. «Моделирование и оптимизация системы нейтральной инжекции для проекта термоядерного источника нейтронов ДЕМО-ТИН». ВАНТ Серия ТС, 2018, 41 вып.3, 57–79.
- [3]. Dlugach, E.D. BTR code for NBI design and study. VANT Fusion Ser. 2021, 44, 68–79.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ В НЕЛИНЕЙНОМ РЕЖИМЕ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

^{1,2}Третинников П.В., ¹Гусаков Е.З., ²Neuraux S.

¹ФТИ им. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия,

²Institut Jean Lamour CNRS, Univ. de Lorraine, Nancy, France

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.021

Радиальная корреляционная рефлектометрия (РКР) является одним из основных методов для диагностики турбулентности плазмы в термоядерных установках с магнитным удержанием плазмы. Традиционно полагалось, что путем зондирования плазмы разными частотами можно определить радиальную корреляционную длину турбулентности просто как разницу между отсечками, при которой спадает кросскорреляционная функция (ККФ) сигналов на соответствующих частотах. Однако оказалось, что такой прямолинейный подход не всегда корректен, он может привести к переоценке корреляционной длины в линейном режиме рассеяния [1, 2] и ее недооценке в нелинейном режиме, характерном для больших установок, как это было показано в результате развития аналитической нелинейной теории РКР в одномерной [3] и двумерной [4] моделях. Согласно этой теории, если уровень турбулентности достаточно большой, пространственная корреляционная длина сигнала является функцией и амплитуды турбулентности, и ее радиальной корреляционной длины, и кажется, что таким образом не может быть использована для определения чего-то одного.

Другой метод анализа сигнала рефлектометра был разработан для определения спектра турбулентности и как следствие амплитуды турбулентности [5]. Этот метод основан на связи между спектром турбулентности и спектром возмущения фазы (вызванной турбулентностью) волны, данная связь была описана в приближении Борна [6]. Предполагая, что основной вклад в рассеянное излучение происходит в области отсечки, теорема Парсеваля позволяет определить как уровень турбулентности, так и ее профиль.

В данной работе предлагается объединить эти два метода анализа данных сигнала рефлектометра для определения двух характеристик турбулентности, а именно ее амплитуды и радиальной корреляционной длины, в условиях нелинейного режима рефлектометрии. В качестве первого шага к практической реализации этой идеи мы выполнили численное моделирование рефлектометрического эксперимента и применили эти два способа обработки сигнала одновременно. На основе двумерной симуляции РКР эксперимента продемонстрировано, что такой подход позволяет определить одновременно амплитуду турбулентности и ее радиальную корреляционную длину.

Численный анализ в этой работе выполнен при поддержке гранта РФФИ 22-12-00010.

Литература

- [1]. I. Hutchinson (1992) *Plasma Phys. Control. Fusion* **34** 1225
- [2]. E. Z. Gusakov and B. O. Yakovlev (2002) *Plasma Phys. Control. Fusion* **44** 2525
- [3]. E. Z. Gusakov and A. Yu. Popov (2002) *Plasma Phys. Control. Fusion* **44** 2327-2337
- [4]. E. Z. Gusakov and A. Yu. Popov (2004) *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** 1393-1408
- [5]. S. Neuraux et al (2003) *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1501
- [6]. C. Fanack et al (1996) *Plasma Phys. Cont. Fusion* **38** 1915

ДАЛЬНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПЕРИФЕРИИ ПЛАЗМЫ СТЕЛЛАТОРА TJ-II

^{1,2}Саранча Г.А., ¹Драбинский М.А., ¹Елисеев Л.Г., ^{1,2}Крохалев О.Д., ^{1,2,3}Мельников А.В.,
^{1,2}Науменко П.Р., ⁴Хабанов Ф.О., ^{1,5}Харчев Н.К.

¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия

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

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

⁴University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA

⁵Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.022

Феномен турбулентного переноса частиц поперёк удерживающего плазму магнитного поля в настоящее время является одним из ключевых в исследовании физики термоядерной плазмы. Теория предсказывает [1], что одним из механизмов подавления мелкомасштабной турбулентности могут быть зональные течения, связанные с тороидально и полоидально симметричными ($n=m=0$) колебаниями радиального электрического поля. Как низкочастотные, так и высокочастотные зональные течения (ГАМ – геодезическая акустическая мода), исследуется на многих токамаках и стеллараторах [2, 3, 4]. Исследование колебаний электрического потенциала в плазме стелларатора TJ-II (Мадрид, Испания) производится с помощью двойной диагностики пучком тяжёлых ионов (ЗПИТ, англ. Heavy Ion Beam Probe – HIBP) и двух наборов Ленгмюровских зондов (англ. Langmuir Probes – LP), расположенных в различных тороидальных сечениях. (см. рис. 1).

В режиме с низкой плотностью $\langle n_e \rangle \approx 0,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и ЭЦР-нагревом $P_{\text{ЭЦРН}} = 600 \text{ кВт}$ два набора электрических зондов показали наличие радиальной протяжённости дальних корреляций плавающего потенциала в диапазоне $0,85 < \rho < 0,95$ [5]. Дальние корреляции электрического потенциала, обнаруженные с помощью двойной диагностики пучком тяжёлых ионов в режиме с плотностью $\langle n_e \rangle \approx 0,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и вкладываемой мощностью $P_{\text{ЭЦРН}} = 220 \text{ кВт}$, были идентифицированы как зональные течения [6].

Настоящая работа посвящена кросс-корреляционному анализу флуктуаций электрического потенциала, измеренного тороидально разнесёнными наборами диагностик LP и HIBP, в схожем плазменном сценарии (плотность $\langle n_e \rangle \approx (0,4 \div 0,6) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $P_{\text{ЭЦРН}} = 460 \text{ кВт}$).

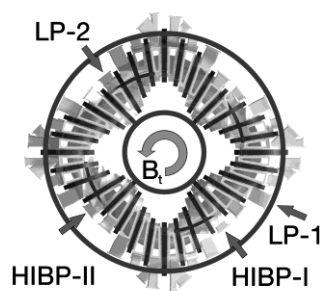


Рис. 1 Взаимное расположение диагностик HIBP и LP на стеллараторе TJ-II

Литература

- [1]. P.H. Diamond et al. Zonal flows in plasma—a review // Plasma Phys. Control. Fusion 47 R35 (2005);
- [2]. A.V. Melnikov et al. Heavy ion beam probing—diagnostics to study potential and turbulence in toroidal plasmas // Nucl. Fusion 57 072004 (2017);
- [3]. Y. Xu et al. Long-distance correlation and zonal flow structures induced by mean $E \times B$ shear flows in the biasing H-mode at TEXTOR // Phys. Plasmas 16 110704 (2009);
- [4]. A. Fujisawa, A review of zonal flow experiments // Nucl. Fusion 49 013001 (2008);
- [5]. U. Losada et al. Spatial characterization of edge zonal flows in the TJ-II stellarator: the roles of plasma heating and isotope mass // Plasma Phys. Control. Fusion 63 044002 (2021);
- [6]. Г.А. Саранча и др. Идентификация зональных течений и их пространственное распределение в плазме стелларатора TJ-II // Письма в ЖЭТФ 116 2 стр. 96-102 (2022)

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ И СКОРОСТИ ПИНЧЕВАНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЭЦР НАГРЕВА НА T-10

Асеев А.С., Андреев В.Ф., Данилов А.В. Днестровский Ю.Н.

НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: Savuyor@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.023

Во многих экспериментах при центральном ЭЦР нагреве на токамаке T-10 наблюдается вынос частиц из зоны нагрева на периферию плазмы [1]. Этот эффект называется «density pump-out». Для изучения эффекта «density pump-out» анализируются две серии экспериментов. Первая серия – «стандартная» камера; вторая серия – «чистая» камера, после литиезации. Отметим, что при этом существенно уменьшается поток частиц со стенки.

Для каждой серии экспериментов вычисляется коэффициент диффузии и скорость пинчевания частиц в переходном процессе после включения центрального ЭЦР нагрева. Решаются две обратные задачи [2]. Первая – на стационаре в омическом режиме, при заданном коэффициенте диффузии, а скорость пинчевания частиц и источник находятся решения из обратной задачи.

Вторая – для переходного процесса после включения ЭЦР нагрева при фиксированном источнике частиц, а коэффициент диффузии и скорость пинчевания частиц находятся из решения обратной задачи. В этом случае источник частиц задается таким, который был найден на стационаре в омическом режиме.

Сравнение коэффициентов переноса на стационаре и на динамической стадии позволяет сделать вывод, что после включения ЭЦР нагрева вынос частиц на периферию, в основном, определяется изменением скорости пинчевания частиц.

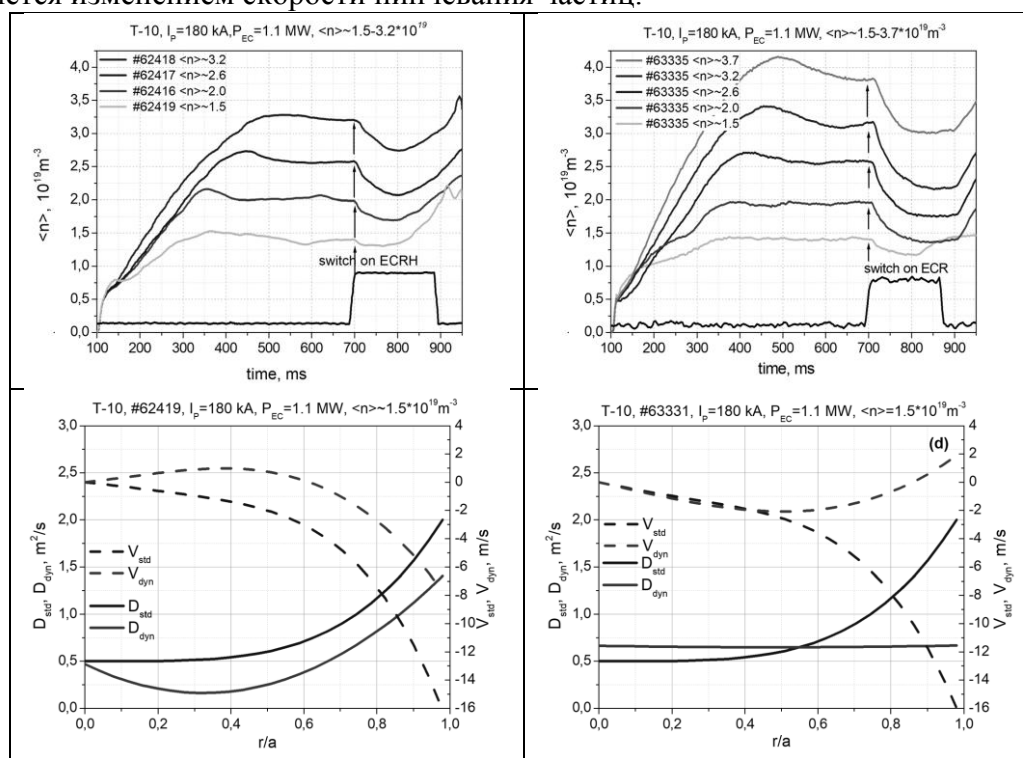


Рисунок 1. (a), (b) – эволюция хордовой плотности для 1-й и 2-й серий экспериментов; (c), (d) – коэффициент диффузии D и скорость пинчевания частиц V для ОН (std) и ЭЦР (dyn) режимов для 1-й и 2-й серии экспериментов

Литература

- [1]. Andreev V.F. et al., Plasma Phys. and Control. Fusion, 2016, 58, 055008 (12pp)
- [2]. Касьянова Н.В., Андреев В.Ф., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 4, с. 71

СТЕНДЫ ТРИТИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ

^{1,2}Шишкова Т.А., ¹Иванов Б.В., ¹Ананьев С.С., ¹Кутеев Б.В.

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, anfimova_t_a@mail.ru,

²РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.024

Для обеспечения работы любой термоядерной или гибридной установки синтез – деление в ее составе необходим дейтерий-тритиевый топливный цикл. Занимая одно из ключевых мест среди других систем установки, топливный цикл (ТЦ) обеспечивает оборот изотопов водорода в вакуумной камере, системах откачки и топливной инъекции – для поддержания параметров плазмы, а также нормальной эксплуатации установки и безопасности персонала [1]. В состав ТЦ входят системы, выполняющие функции хранения дейтерия и трития, откачку «выхлопа» из вакуумной камеры, очистку от примесей и переработку изотопной смеси для повторного использования и др. В основе соответствующих подсистем топливного цикла лежат отдельные технологии – мембранное разделение, сорбционное хранение, хроматографическое разделение и т.д.

Критериями выбора технологий топливного цикла является соответствие требуемым эксплуатационным показателям отдельных функциональных систем топливного цикла, а также сокращение количества трития в системах ТЦ [2]. Важным этапом в разработке систем топливного цикла является создание полномасштабных макетов технологических систем, их интеграция и отработка совместной работы с тритием. Этому этапу должны предшествовать стендовые испытания различных узлов установок с характерными для них модельными газовыми смесями. Необходимость создания стендовой базы определяется потребностью в отработке существующих и тестировании перспективных технологий и материалов для ТЦ. Программа развития термоядерных и гибридных систем синтез-деление, реализуемая НИЦ «Курчатовский институт» в рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» комплексной программы РТТН ГК Росатом, предусматривает создание комплекса лабораторных стендов, в том числе для подготовки научного персонала и улучшения характеристик систем [3] в 2023-2025 годах.

Комплекс стендов для отработки технологий термоядерного ТЦ представляет собой комплекс оборудования (стандартного или специально спроектированного и изготовленного) и помещений, подготовленных для осуществления экспериментов и отработки технологий термоядерного ТЦ на легких изотопах водорода. Доклад посвящен описанию технологий, рассматриваемых для комплекса. В данной работе рассмотрены сорбционные методы хранения, мембранно-каталитический метод очистки от примесей, хроматографическое разделение изотопов водорода для хранения, очистки и переработки топливной смеси, соответственно.

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Ananyev S.S., Ivanov B.V., Kuteev B.V. // Fusion Eng. Des. 161 (2020) 111940.
- [2]. Иванов Б.В., Ананьев С.С. ВАНТ. Сер. Терм. Синтез 44 (4), 5 (2021)
- [3]. Ананьев С.С., Иванов Б.В. и др. XLIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 2022, http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIX/Sbornik_ICSPAF-2022.pdf

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ РАВНОВЕСИЯ ПЛАЗМЫ С НЕКРУГЛЫМ СЕЧЕНИЕМ К АНАЛИЗУ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТОКАМАКЕ

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

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, e-mail: chukashev_nv@nrcki.ru

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.025

В современных токамаках, работающих с вертикально вытянутой плазмой, развивается неустойчивость по вертикали (Vertical Displacement Events, VDEs). Существующая аналитическая теория равновесия плазмы создавалась в основном для «круглой» плазмы и потому не годится для описания VDE. Для ее расширения необходимо ввести два новых элемента: учёт некруглой формы сечения плазмы и электромагнитной реакции стенки на эволюцию её равновесия (включая срывы).

Взаимодействие плазмы и стенки описывается законами Фарадея и Ома, содержащими производную полоидального потока по времени, который находится из решения внешней задачи равновесия. В аналитической теории рассматривалась модель прямого шнура с током [1-4]. Мы доказываем, что в задачах эволюции тороидальной плазмы результаты [1-4] недостаточны, и предлагаем необходимое улучшение.

В цилиндрических моделях проблемы возникают из-за вырождения граничных условий для полоидального потока, требующих только его непрерывности на границе плазмы. При этом константа интегрирования уравнения Грэда-Шафранова остаётся неопределённой. Она является свободным параметром и иногда полагается равной нулю [3, 4]. Однако, будучи прямо связанной с напряжением обхода, она не может считаться произвольной в тороидальных системах. Необходимо ее точное нахождение для вычисления реакции стенки на переходные процессы в плазме.

Здесь для решения внешней задачи равновесия с целью анализа нестационарных равновесий используется метод функции Грина [5, 6]. Недавно этот метод позволил учесть в задаче одновременно как тороидальность плазмы, так и вытянутость её сечения [6]. Это открывает возможность для оценки константы интегрирования и далее для вывода уравнений движения плазмы, пригодных для анализа VDE.

Литература

- [1]. Gajewski R., Phys. Fluids, 1972, 15, 70
- [2]. Strauss H.R., Phys. Fluids, 1974, 17, 1040
- [3]. Papaloizou J.C.P. et al, Nucl. Fusion, 1977, 17, 33
- [4]. Захаров Л.Е., Шафранов В.Д., Вопросы теории плазмы. Вып. 11 / под ред. М.А. Леонтовича и Б.Б. Кадомцева. М.: Энергоиздат, 1982. С. 147.
- [5]. Пустовитов В.Д., Физика плазмы, 2019, Т. 45, С. 1088
- [6]. Пустовитов В.Д., Чукашев Н.В., Физика плазмы, 2021, Т. 47, С. 876

ДИАГНОСТИКА ПРОДУКТОВ ТЕРМОЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ НА УСТАНОВКЕ ГДЛ

Пинженин Е.И., Максимов В.В.

*Институт Ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия, e-mail:
e.i.pinzhenin@inp.nsk.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.026

В докладе описан диагностический комплекс продуктов термоядерной реакции на установке «Газодинамическая ловушка» (ГДЛ). В состав диагностики входят следующие три подсистемы: сцинтилляционные детекторы на основе пластикового сцинтиллятора СПМ-5 и фотоэлектронного умножителя. Детекторы чувствительны к жесткому рентгеновскому излучению и нейтронам, работают в токовом режиме, расположены за пределами вакуумной камеры и регистрируют интенсивность реакции синтеза дейтерия с временным разрешением до 25 мкс. Детекторы 3.02 МэВ протонов — продуктов термоядерной реакции расположены внутри вакуумной камеры ГДЛ, работают в режиме счета отдельных частиц и позволяют вести абсолютные измерения потока продуктов термоядерной реакции с временным разрешением 100 мкс и пространственным разрешением несколько десятков сантиметров. Спектрометр нейтронов и гамма квантов на основе стильбенового сцинтиллятора и ФЭУ позволяет регистрировать спектры частиц различных сортов, в том числе в режимах работы установки, в которых происходит генерация перегретых электронов.

Диагностический комплекс позволяет вести абсолютные измерения потока продуктов термоядерной реакции, оптимизировать режимы удержания плазмы в установке ГДЛ по параметру интенсивности термоядерной реакции, изучать эволюцию интенсивности реакции синтеза в экспериментах по нагреву плазмы различными методами, при развитии неустойчивостей.

КОЛЛЕКТИВНОЕ ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЙНИЕ НА ГДЛ. ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

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

¹ИПФ РАН, Нижний Новгород, РФ, e-mail: ags@appl.sci-nnov.ru

²ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН, Новосибирск, РФ, e-mail: A.L.Solomakhin@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.027

На газодинамической ловушке (ГДЛ), которая является одной из крупнейших открытых ловушек с субтермоядерными параметрами плазмы, создана система регистрации спектров коллективного рассеяния излучения гиротрона [1]. Основанная на измерениях таких спектров диагностика позволяет восстанавливать функцию распределения популяции надтепловых (горячих) ионов, а также контролировать развитие микронеустойчивостей в плазме ГДЛ.

ГДЛ позиционируется как прототип термоядерного источника нейтронов для материаловедения, дожигания радиоактивных отходов и гибридного реактора синтеза [2]. Дальнейшие перспективы развития такой концепции нейтронного источника связаны с увеличением потока нейтронов. Выход нейтронов в таком источнике обеспечивается взаимодействием ионов из высокоэнергичной части функции распределения. Однако до сих пор отсутствует адекватная теоретическая модель удержания горячих ионов в ГДЛ, а имеющиеся численные коды не лишены существенных недостатков. Поэтому актуальна задача непосредственного измерения функции распределения горячих ионов в эксперименте на ГДЛ.

Источником излучения для диагностики служит мощный 450 кВт / 54.5 ГГц гиротрон, излучение которого с помощью сверхразмерного гофрированного волновода и квазиоптической двухзеркальной системы инжектируется в плазму ГДЛ в центральном сечении ловушки [3]. Рассеянное на флуктуациях плазмы излучение собирается двумя квазиоптическими трёхзеркальными системами с двух направлений, соответствующих продольному и поперечному волновому вектору флуктуаций. Собранное излучение по системе сверхразмерных прямоугольных волноводов подводится к двум специально разработанным под эту задачу высокочувствительным радиометрам. Для защиты от излучения гиротрона каждый из них оборудован аттенуатором, электронным затвором на основе PIN диода и восьмirezонаторным режекторным фильтром, настроенным на частоту гиротрона. Отфильтрованное рассеянное излучение с помощью смесителя и гетеродина на основе диода Ганна сдвигается по частоте в область низких частот, усиливается и регистрируется цифровым осциллографом Tektronix MSO54 с полосой 0-500 МГц. Далее эти данные обрабатываются уже цифровым образом, получаются спектры, по которым будет восстанавливаться функция распределения ионов по скоростям.

Система полностью собрана и проведены первые эксперименты по регистрации спектров коллективного рассеяния плазмой ГДЛ излучения гиротрона. Отработана методика измерений и впервые зарегистрированы сигналы рассеяния на тепловых флуктуациях плазмы, связанных с движением горячих ионов [4]. Также зарегистрировано рассеяние на нетепловых флуктуациях плазмы, вызванных развитием микронеустойчивостей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-72-20139.

Литература

- [1]. A.G. Shalashov et al., Plasma Phys. Control. Fusion, 2020, 62, 065010.
- [2]. A.A. Ivanov and V.V. Prikhodko, Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, 55, 063001.
- [3]. A.G. Shalashov et al., Journal of Instrumentation, 2021, 16, 07007.
- [4]. A.G. Shalashov et al., Phys. Plasmas, 2022, 29, 080702.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ИЗ УДЕРЖИВАЕМОЙ ПЛАЗМЫ ПО РАЗЛИЧНЫМ КАНАЛАМ В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ЛОВУШКЕ

¹Мейстер А.К., ^{1,2}Солдаткина Е.И., ¹Яковлев Д.В.

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

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.028

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера продолжаются исследования на газодинамической ловушке (ГДЛ), открытой магнитной ловушке для удержания плазмы. Одной из главных задач исследований на ГДЛ является сокращение энергетических потерь из плазмы. Важность цели обусловлена возможностью создания на основе открытых ловушек источника быстрых нейтронов для материаловедения или реактора термоядерного синтеза [1].

В газодинамической ловушке наблюдается расхождение энергобаланса. При инжекции в плазму нейтральными пучками 5 МВт мощности и захвате из них плазмой 2-3 МВт мощность продольных потерь через магнитные пробки составляет всего лишь сотни кВт. При этом величина продольных потерь энергии соответствует теоретическим оценкам для газодинамического удержания, из чего следует, что необходимо исследовать другие возможные каналы потерь.

Исходя из этого, было проведено экспериментальное исследование двух предположений о возможных каналах потерь. Первое предположение заключалось в том, что энергия нейтральных пучков нагревает преимущественно периферийную плазму, оседающую на лимитерах установки. Второе – в том, что инжектируемая мощность теряется путём перезарядки быстрых ионов на нейтральном газе, используемом для поддержания материального баланса удерживаемой плазмы.

Для проверки этих предположений ГДЛ была оснащена специально разработанным диагностическим лимитером и болометрическим измерителем потерь в центральной камере; также была задействована измерительная система продольных потерь на плазмоприёмнике установки [2]. В данном докладе представлены результаты проведённого исследования.

Литература

- [1]. Vagryansky P. A. et al. Recent progress of plasma confinement and heating studies in the gas dynamic trap //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2016. – Т. 1771. – №. 1. – С. 020003.
- [2]. Багрянский П. А. и др. Система измерения потоков частиц и энергии на установке ГДЛ //XLVII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. – 2020. – С. 96-96.

ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИИ БЫСТРЫХ ИОНОВ В ПЛАЗМЕ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-NB

^{1,2}Гороховский Р.Г., ¹Баткин В.И., ¹Куклин К.Н., ^{1,2,3}Полосаткин С.В.,
^{1,3}Поступаев В.В., ¹Ровенских А.Ф., ^{1,3}Сковородин Д.И.

¹ИЯФ СО РАН, Новосибирск, Россия, email: gorohovskiy.r@mail.ru

²НГТУ, Новосибирск, Россия

³НГУ, Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.029

Установка ГОЛ-NB [1] представляет собой линейную осесимметричную открытую ловушку с многопробочными секциями для удержания плазмы. Основной целью экспериментов, проводимых на этой установке, является исследование удержания плазмы в многопробочном (периодически модулированным вдоль оси) магнитном поле. Установка ГОЛ-NB состоит из центральной ловушки (пробкотрона) длиной 2.5 м с полем в центре $B = 0.3$ Тл и состыкованных к ней секций сильного поля длиной около 3 м каждая с $B = 4.5$ Тл. Плазма в установке создается плазменной пушкой, расположенной в расширителе на одном из торцов установки, и нагревается с помощью инжекции пучков быстрых атомов водорода. Два инжектора [2] с суммарной мощностью 1,1 МВт инжектируют в плазму пучки быстрых атомов с энергией 25 кэВ, формируя в центральной секции популяцию быстрых ионов.

Проходя через плазму, пучки быстрых атомов вследствие столкновений с электронами и ионами плазмы частично ионизируются, и возникающие быстрые ионы захватываются магнитным полем установки. Захваченные ионы осциллируют вдоль оси установки между точками останова (совпадающими с точками инжекции) и постепенно передают свою энергию электронам плазмы за счет упругих столкновений. Еще одним важным эффектом, приводящим к потере быстрых ионов, является перезарядка на нейтральном газе. Присутствие нейтрального газа в вакуумной камере и его проникновение в плазму приводят к потерям быстрых ионов вследствие резонансной перезарядки, снижающим эффективность нагрева плазмы.

Основным средством диагностики быстрых ионов на установке является анализатор нейтралов перезарядки [3], расположенный в одной из точек инжекции. Анализатор имеет 11 энергетических каналов, регистрирующих нейтралы в диапазоне от 5 до 25 кэВ. Интерпретация сигналов анализатора проводится путем сравнения измеряемых сигналов с ожидаемыми при заданной модельной функции распределения быстрых ионов и определения параметров этой функции распределения. Кроме того, анализатор позволяет прямо измерять время жизни ионов в плазме по спаду потока нейтралов после выключения инжекции.

В работе предложена модельная функция распределения быстрых ионов, описываемая одним параметром – соотношением мощности, передаваемой от ионов электронам плазмы, и мощности перезарядных потерь. Полученная модель хорошо согласуется с экспериментальными данными и позволяет изучать динамику эффективной мощности нагрева плазмы нейтральными пучками в процессе инжекции, а также рассмотреть влияние накопления нейтрального газа в системе на время жизни быстрых ионов.

Литература

- [1]. V. Postupaev et al., Start of experiments in the design configuration of the GOL-NB multiple-mirror trap // Nuclear Fusion 62(8),086003 (2022)
- [2]. V. Batkin et al., Neutral beam injectors for the GOL-NB facility // AIP Conference Proceedings 1771,030004 (2016)
- [3]. S. Polosatkin et al., Neutral particle analyzer for studies of fast ion population in plasma // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 720, с. 42-44 (2013)

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И ЧАСТОТНАЯ СТРУКТУРА КОЛЕБАНИЙ В ВИНТОВОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

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

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

¹*Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.030

Для приближения параметров плазмы в открытых ловушках к термоядерным необходимо подавить потери частиц вдоль силовых линий магнитного поля. Предложенный с этой целью в ИЯФ СО РАН метод винтового удержания [1] сейчас проходит экспериментальную проверку на установке СМОЛА [2]. Идея метода заключается в том, чтобы поместить вращающуюся плазму в спиральное магнитное поле. В системе отчета плазмы двигаться будут максимумы магнитного поля. В результате запертые частицы образуют обратный поток ионов, направленный к области удержания. Скейлинг эффективности удержания, полученный в результатах эксперимента [3], согласуется с теоретическими [4] оценками.

Эффективное удержание в многопробочных системах достигается, если длина свободного пробега ионов равна длине одной ячейки. В горячей термоядерной плазме это условие не выполняется, когда учитываются лишь кулоновские столкновения. Однако результаты экспериментов на установке ГОЛ-3 показали, что при развитии в плазме баунс-неустойчивости возникает аномальная столкновительность, а энергетическое время жизни плазмы увеличивается [5]. В установке СМОЛА потоки запертых и пролетных частиц противоположно направлены, что способствует развитию колебаний и может приводить к возникновению аномальной столкновительности. Изучение данных процессов позволит узнать, способны ли они обеспечить необходимую длину свободного пробега в винтовых концевых секциях открытых ловушек с субтермоядерной плазмой.

В докладе представлены пространственные и временные характеристики колебаний потенциала плазмы, которые регистрируются эмиссионными зондами. Колебания изучались при различных направлениях продольного движения магнитных возмущений, а также в режиме без винтового поля. Приводится анализ зависимостей характеристик колебаний от экспериментальных параметров, таких как напряженность ведущего магнитного поля, величина гофрировки поля, выраженная в среднем по сечению транспортной секции пробочном отношении вдоль силовых линий, плотность плазмы и т.д. Обсуждается вопрос связи наблюдаемых колебаний с аномальной столкновительностью.

Литература

- [1]. Beklemishev A.D., Helicoidal system for axial plasma pumping in linear traps, *Fusion Sci. Technol.* 63 (1T), 355–357 (2013).
- [2]. Sudnikov A.V. et al., SMOLA device for helical mirror concept exploration, *Fusion Eng. Des.* 122, 86-93 (2017).
- [3]. Sudnikov A.V. et al., Plasma flow suppression by the linear helical mirror system, *J. Plasma Phys.* 88, 905880102 (2021).
- [4]. Beklemishev A.D., Radial and axial transport in trap sections with helical corrugation, *AIP Conference Proceedings* 2016 1771, 040006 (2016).
- [5]. Koidan V.S. et al., Progress on the multimirror trap GOL-3, *Fusion Sci. Technol.* 47, 35-42 (2005).

РАСЧЕТ ПОЛОИДАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТОКАМАКА МИФИСТ-0^{1,2}Уласевич Д.Л., ¹Хайрутдинов Р.Р., ¹Лукаш В.Э.¹НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.031

МИФИСТ-0 [1] – это учебно-демонстрационный малый сферический токамак, создаваемый на кафедре Физики Плазмы НИЯУ МИФИ с 2019 года. Полоидальная система токамака состоит из двух независимых частей. Первая – индуктор, включающий в себя центральный соленоид CS и соединённые с ним последовательно компенсационные витки SS, предназначенные для обеспечения пробоя плазмы за счет создания области минимума вертикальной компоненты магнитного поля. Вторая часть полоидальной системы состоит из 6 независимых управляющих катушек PF, на которые можно подавать ток заранее спроектированной формы. Данные катушки отвечают за управление формой и положением плазменного шнура в пространстве. В работе [2] была описана модель полоидальной системы, а также приведен алгоритм расчета оптимальной в плане минимизации вертикальной компоненты магнитного поля индуктора в зоне пробоя.

В полученную ранее модель полоидальной системы был добавлен учет эффекта от «винтовой конфигурации» тороидальных катушек, связанный с их компоновкой в виде «навивающегося» вокруг тороидальной камеры элемента. В связи с этим возникает наклон катушек на $\pi/12$, и они оказывают влияние на вертикальную компоненту магнитного поля.

Влияние на вертикальную компоненту магнитного поля учитывается с помощью добавления 17 полоидальных проводников TS. Для этого подбирались такая конфигурация, чтобы расчетные распределения токов оказывались бы максимально близкими к экспериментальным, что позволило улучшить получаемые результаты более, чем на 20 %.

На основе полученной конфигурации полоидальной системы при помощи кода ДИНА [3] были рассчитаны различные варианты эволюции плазмы для различных способов подключения управляющих катушек. Основной задачей в этом случае являлась проверка возможности уменьшить требования по количеству независимых источников питания и требования по максимальным величинам тока, генерируемым данными источниками. По результатам расчетов была выбрана конфигурация из 4 источников: 1 источник с напряжением 1.2 кВ и 3 источника по 700 В для питания соединенных попарно симметрично расположенных управляющих катушек. Основные параметры сценариев приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры разряда

τ	20 мс
$I_{pl\ max}$	10 кА
B_{tor}	0.4 Т
a	13 см
R	24 см
Z_{eff}	2.5
$Density, [10^{13} cm^{-3}]$	1.3

Кроме того, была исследована возможность получения вытянутой конфигурации плазмы. Показано, что при величине вытянутости $\kappa \leq 1.2$ плазма остается в равновесном положении без использования обратных связей в течение всего времени разряда. При этом в случае добавления катушек пассивной стабилизации удавалось увеличить параметр κ до 1.6.

Литература

- [1]. Kurnaev V.A., Vorobyov G.M. et al., Phys. At. Nucl. 82, 1329–1331 (2019)
- [2]. Уласевич Д.Л., Хайрутдинов Р.Р. и др., ВАНТ сер. Термояд. синтез 45, 98-107 (2022)
- [3]. Khayrutdinov R.R., Lukash V.E. — J. Comput. Physics, vol. 109, 193-201 (1993)

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УДЕРЖАНИЮ ПЛАЗМЫ НА ГДЛ В МАГНИТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ СО СБЛИЖЕННЫМИ ТОЧКАМИ ОСТАНОВКИ

^{1,2}Шмигельский Е.А., ¹Лизунов А.А., ^{1,2}Яковлев Д.В.

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

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия,
e.shmigelskii@g.nsu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.032

Представляющие интерес режимы удержания плазмы с увеличенным относительным давлением β в открытой магнитной ловушке ГДЛ (ИЯФ СО РАН) могут быть достигнуты за счет повышения плотности энергии быстрых анизотропных ионов, движущихся адиабатически между точками остановки. Это было осуществлено посредством модификации магнитной системы ГДЛ и сближения точек остановки быстрых ионов.

В рамках данной работы в условиях сближенных точек остановки была проведена серия экспериментов по оптимизации условий разряда для достижения режима удержания с максимальным значением вытесненного плазмой магнитного потока, а также серии, нацеленные на измерение радиальных профилей температуры и плотности электронов. Результаты обсуждаются в докладе в контексте их сравнения с аналогичными измерениями для стандартной магнитной конфигурации установки. Обнаруженной особенностью исследуемого режима является близость значений диамагнетизма плазмы в центральной плоскости и в точках остановки. Кроме того, в докладе описывается влияние на разряд неустойчивостей, присущих режимам с увеличенным диамагнетизмом, а именно глобальной звуковой моды [1] и Альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости [2, 3], которая в режиме с укороченной областью движения быстрых ионов возбуждается на начальном этапе разряда и далее, нелинейно насыщаясь, существует почти непрерывно.

Литература

- [1]. Skovorodin D.I., Zaytsev K.V., Beklemishev A.D. Phys. Plasmas **20**, 102123 (2013).
- [2]. Zaytsev K.V. et al. Phys. Scr. **161**, 014004 (2014).
- [3]. Анিকেев А.В. и др. Физика плазмы, 2015, Т. 41, № 10, с. 839-849

ПЕРВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ ПУЧКОМ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ ПРИ КО-ИНЖЕКЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ В ТОКАМАК 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.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, belokurov@mail.ioffe.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.033

Инжекция высокоэнергичных нейтральных атомов является эффективным методом нагрева плазмы, генерации вращения, а также доставки топлива в центральную область плазмы. Ранее в токамаке ТУМАН-3М было исследовано влияние нейтральной инжекции в направлении противоположно току плазмы (т.н. контр-инжекция) на удержание плазмы [1]. Контр-инжекция приводит к существенным потерям быстрых частиц с первой орбиты, что с одной стороны приводит к уменьшению эффективности нейтральной инжекции, с другой – способствует инициированию перехода в режим улучшенного удержания (H-моду) за счет генерации отрицательного радиального электрического поля. В настоящее время в токамаке ТУМАН-3М реализуются сценарии с ко-инжекцией нейтральных атомов. Такой режим более эффективен с точки зрения захвата быстрых частиц, 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.

Влияние нейтральной инжекции на генерацию радиального электрического поля и на удержание плазмы в токамаке ТУМАН-3М было исследовано с помощью диагностики плазмы пучком тяжелых ионов (ДПТИ). Для этого комплекс ДПТИ, ранее сконструированный для работы в режиме с контр-инжекцией, был модернизирован, в результате чего стало возможным проводить измерения в режиме с ко-инжекцией.

В серии разрядов с низкой концентрацией плазмы ($< 1.2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) проводились измерения эволюции потенциала плазмы. Измерения проводились в омических реперных разрядах, разрядах с нейтральной инжекцией, а также разрядах с дополнительным импульсом газонапуска, способным инициировать переход в H-моду. Измерение потенциала плазмы показало, что при низкой концентрации ко-инжекция оказывается малоэффективной из-за существенных потерь быстрых частиц, в первую очередь напролёт: генерация радиального электрического поля обоих знаков под воздействием нейтральной инжекции не наблюдалась. В то же время нейтральная инжекция совместно с дополнительным газонапуском приводит к инициированию устойчивой H-моды.

Исследования с помощью ДПТИ на токамаке ТУМАН-3М обеспечиваются РНФ (проект 22-12-00062).

Литература

[1]. S.V. Lebedev et al // Nucl. Fusion 2009 49 085029

ИНИЦИИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДА В РЕЖИМ УЛУЧШЕННОГО УДЕРЖАНИЯ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ ПРЕДЕЛЬНОГО ЦИКЛА В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М

^{1,2}Белокуров А.А., ¹Аскинази Л.Г., ¹Гусев В.К., ¹Киселев Е.О., ¹Курские Г.С.,
²Петров А.В., ¹Петров Ю.В., ²Пономаренко А.М., ¹Толстяков С.Ю., ²Яшин А.Ю.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, belokurov@mail.ioffe.ru

²СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.034

Исследование возможности инициирования L-N перехода, т.е. перехода в режим улучшенного удержания с подавленным турбулентным переносом на периферии (H-моду) в токамаке является важной задачей физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Подавление турбулентности достигается за счет сильно неоднородного радиального электрического поля [1].

Помимо инициирования L-N перехода под влиянием внешнего возмущения радиального электрического поля, возможно развитие в плазме процессов, при которых такое поле возникает самосогласованно, например, зональные потоки [2]. При зональных потоках формируются узкие радиальные слои плазмы с полоидальным вращением в противоположные стороны, в результате чего на границе слоёв сильно неоднородное радиальное электрическое поле способно приводить к подавлению турбулентности. Эффект подавления и возможность инициирования L-N перехода зависят при этом от пространственных и временных характеристик колеблющегося электрического поля [3].

Переходный режим между L-модой и H-модой, или I-фаза, характеризующийся наличием зональных потоков в виде колебаний предельного цикла (limit cycle oscillations, LCO) наблюдался на многих токамаках [2], в том числе на токамаке Глобус-М [4]. В зависимости от частоты наблюдаемых LCO после I-фазы происходил переход в самоподдерживающуюся H-моду (при частоте LCO 6 кГц), либо обратный переход в L-моду (при частоте LCO 8.5 кГц). Данный результат согласуется с исследованиями инициирования L-N перехода переменным электрическим полем ГАМ [3], согласно которым меньшая частота переменного во времени E_r способствует инициированию перехода в H-моду.

Для экспериментальных параметров разрядов с LCO в токамаке Глобус-М была построена численная модель, рассчитывающая эволюцию профиля концентрации с нелинейным коэффициентом диффузии, учитывающим подавление турбулентности неоднородным E_r . При помощи расчетов, выполненных с помощью данной модели, было показано, что LCO с характеристиками, наблюдаемыми в токамаке Глобус-М, могут приводить к инициированию L-N перехода. При этом действительно реализуется ситуация, соответствующая эксперименту: колебания меньшей частоты (6 кГц) инициируют переход в H-моду, в то время как колебания большей частоты (8.5 кГц) не приводят к инициированию L-N перехода.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект 18-72-10028).

Литература

- [1]. Itoh S-I. and Itoh K. 1988 Phys. Rev. Lett. 60 2276
- [2]. Schmitz L. et al 2017 Nucl. Fusion 57 025003
- [3]. Askinazi L.G. et al 2017 Plasma Phys. Control. Fusion 59 014037
- [4]. Yashin A.Yu. et al 2018 Nucl. Fusion 58 112009

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ КАМЕРЫ ТОКАМАКА

^{1,2}Семёнов А.С., ¹Андреев В.Ф.

¹НИЦ «Курчатовский институт», Andreev_VF@nrcki.ru

²МФТИ (НИУ), Долгопрудный, Россия, semyonov.as@phystech.edu

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.035

Для моделирования начальной стадии разряда необходимо знать распределение магнитного поля в месте пробоя с учетом токов, наведенных в вакуумной камере токамака, от управляющих обмоток. Хорошим приближением, позволяющим получить результат с необходимой точностью, является разбиение двумерной модели вакуумной камеры на отдельные тороидальные витки и решение уравнений Кирхгофа для них:

$$\mathbf{L} \frac{d\mathbf{I}}{dt} + \mathbf{R}\mathbf{I} = -\frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

где \mathbf{L} – матрица индуктивностей, \mathbf{I} – вектор токов в тороидальных витках, \mathbf{R} – диагональная матрица сопротивлений, Ψ – вектор суммарного потока от внешних обмоток. Подробнее про математическую модель, постановку задачи и алгоритм численного моделирования написано в статье [1].

Для того чтобы итоговая математическая модель позволяла рассчитывать реальные поля в вакуумной камере, требуется откалибровать ее на экспериментальных данных, изменив соответствующим образом коэффициенты матрицы индуктивности и сопротивлений. Данную задачу можно решить, построив функционал ошибки и осуществив его минимизацию, однако, в силу большой размерности пространства параметров, такой подход является очень сложным в вычислительном плане, поскольку каждая итерация процесса требовала бы вычисления огромного количества частных производных.

В данной работе реализован альтернативный подход с использованием многослойной нейронной сети прямого распространения. На вход сети поступала разность смоделированных и измеренных сигналов с магнитных зондов, а в результате работы сеть выдавала необходимые поправки к матрицам. На рис. 1 изображена часть графиков, наглядно представляющих результат работы. На рисунке синяя кривая – результат численных расчетов без поправок к матрицам, зеленая – требуемый сигнал, красная пунктирная – результат расчетов с поправками, полученными на выходе из нейросети.

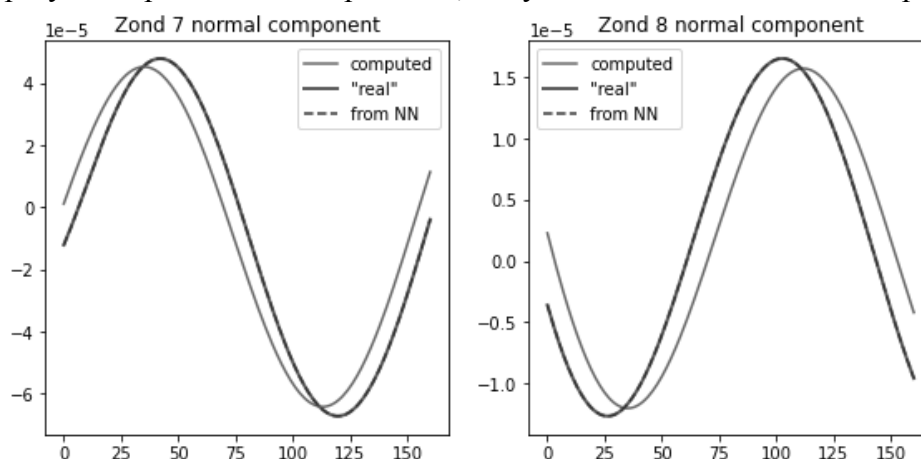


Рисунок 1 Результат работы сети

Литература

- [1]. Андреев В.Ф. и др. Моделирование магнитных измерений на токамаке Т-15МД с учетом наведенных токов в вакуумной камере // ВАНТ. 2021, т.44, вып. 4, с.25-42.

КОЛЕБАНИЯ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ В ОМИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ ТОКАМАКА ФТ-2

Коновалов А.Н., Алтухов А.Б., Гурченко А.Д., Гусаков Е.З., Дьяченко В.В.,
Есипов Л.А., Лашкул С.И., Попов А.Ю.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: konovalov.al@mail.ioffe.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.036

В работе представлены результаты наблюдений излучения плазмы в промежуточном диапазоне частот ((200-800) МГц) в омическом режиме работы токамака ФТ-2 ($R=55$ см, $a=8$ см, $B_t=2.2$ Тл) [1,2].

Сигнал наблюдается в диапазоне плотностей $(1-3) \cdot 10^{13}$ см⁻³ и имеет характер достаточно регулярных всплесков, их число и амплитуда падает при увеличении плотности. Анализ спектра наблюдаемого излучения показывает, что сигнал состоит из нескольких (3-5) связанных вместе частотных пиков, амплитуда которых на 10-30 дБ превышает уровень шума. Расстояние между пиками близко к ионно-циклотронной частоте для величины тороидального поля токамака ФТ-2.

Наблюдения производились при помощи высокочастотных штыверных зондов и одного из волноводов нижегибридной антенны. Анализ излучения выполнялся широкополосным (до 8 ГГц) цифровым 4-х канальным осциллографом Keysight MSOS804A.

В работе приведены зависимости амплитуды и спектра излучения от параметров плазмы и от расположения зондов. Корреляционный анализ излучения в промежуточном диапазоне частот между сигналами двух зондов, смещенных на 90 градусов по тороидальному углу, демонстрирует высокий уровень корреляции и позволяет получить скорость распространения излучения. Предлагается два возможных механизма, приводящих к наблюдаемым эффектам. Один из них связан с искажением функции распределения электронов из-за сильной гофрировки тороидального поля в токамаке ФТ-2, второй механизм связан с убегающими электронами.

Работа токамака ФТ-2 и базовых диагностик велась при поддержке государственного контракта ФТИ 0040-2019-0023. Высокочастотные измерения выполнялись при поддержке государственного контракта ФТИ 0034-2021-0002, а их корреляционный анализ был поддержан государственным контрактом ФТИ 0034-2021-0001.

Литература

- [1]. Лашкул С.И., Алтухов А.Б., Гурченко А.Д., Дьяченко В.В., Есипов Л.А., Кантор М.Ю., Куприенко Д.В., Ирзак М.А., Савельев А.Н., Сидоров А.В., Степанов А.Ю., Шаталин С.В., Физ. плазмы, 2010, 36, 803
- [2]. Лашкул С.И., Алтухов А.Б., Гурченко А.Д., Гусаков Е.З., Дьяченко В.В., Есипов Л.А., Ирзак М.А., Кантор М.Ю., Куприенко Д.В., Савельев А.Н., Степанов А.Ю., Шаталин С.В., Физ. плазмы, 2015, 41, 1069

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР ТОКАМАКА Т-15МД

¹Идеал Р., ²Рыжаков Д.В., ^{1,2}Будаев В.П.

¹НИУ «МЭИ», Москва, Россия, e-mail: IdealR@mpei.ru ,

²НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия, e-mail: ryzhakov_dv@nrcki.ru .

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.037

Для измерения профиля абсолютного значения температуры электронов плазменного шнура в токамаке необходимо разрабатывать многоканальные диагностики регистрации рентгеновского излучения.

В работе проведён расчёт рентгеновского излучения из плазмы токамака с целью разработки диагностики «Многоканальный рентгеновский спектрометр» для токамака Т-15МД [1] и разработана схема диагностики (рис.1), используя экспериментальные результаты измерений на токамаке Т-10. Из сравнения расчётных и экспериментальных данных определена зависимость поглощения рентгеновского излучения в детекторе (спектральная чувствительность детектора) от энергии регистрируемого излучения, выбраны геометрические размеры проектируемой для Т-15МД диагностики, уточнены характеристики фильтров и детектора, написана программа, автоматически аппроксимирующая экспериментальные данные и определяющая температуру электронов. Было показано, что при выбранных параметрах диагностики ожидается хорошее пространственно-временное разрешение при измерениях на Т-15МД. Диагностика позволит измерять характеристики плазмы при регистрации квантов в диапазоне от 2 кэВ до 15 кэВ.

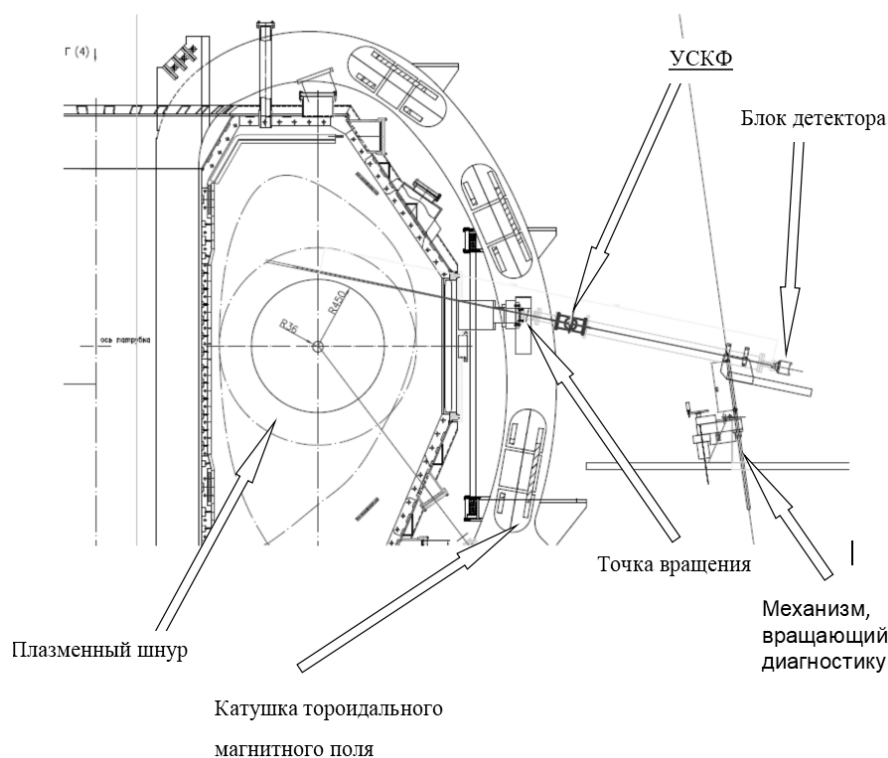


Рис. 1. Схема измерения диагностики на Т-15МД (УСКФ – устройство смены коллиматоров и фильтров).

Литература

- [1]. П.П. Хвостенко и др. Экспериментальная термоядерная установка токамак Т-15МД // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2019. – т. 42, в .1. – с. 15-38.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 В РЕЖИМАХ С НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ

¹Жильцов Н.С., ¹Курский Г.С., ¹Бахарев Н.Н., ¹Балаченков И.М., ¹Варфоломеев В.И.,
¹Воронин А.В., ¹Горяинов В.Ю., ¹Гусев В.К., ¹Киселёв Е.О., ¹Коваль А.Н.,
¹Крикунов С.В., ¹Минаев В.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Мухин Е.Е., ¹Новохацкий А.Н.,
¹Патров М.И., ¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В., ¹Скрекель О.М., ²Соловей В.А.,
¹Солоха В.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Ткаченко Е.Е., ¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю.,
¹Тюхменева Е.А., ¹Филиппов С.В., ¹Хромов Н.А., ¹Шулятьев К.Д., ¹Щёголев П.Б.,
¹Яшин А.Ю.

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: nisovru@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.038

В докладе представлено исследование плазмы токамака Глобус-М2 [1] при тороидальном магнитном поле $B_T = 0.8-0.9$ Тл и токе плазмы $I_p = 0.3 - 0.4$ МА. В разрядах использовался дополнительный нагрев с помощью двух пучков нейтральных частиц (NBI): первый с энергией $E_{NBI}^1 = 25-28$ кэВ и мощностью $P_{NBI}^1 \leq 0.45$ МВт, второй – $E_{NBI}^2 = 30-45$ кэВ при $P_{NBI}^2 \leq 0.75$ МВт. Средняя концентрация электронов варьировалась в диапазоне $0.15 - 1.6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

В данной работе информацию о пространственных распределениях температуры электронов T_e и их концентрации n_e предоставляла диагностика томсоновского рассеяния [2]. Это позволило определить энергозапас электронного компонента плазмы W_e и проанализировать зависимость W_e от средней концентрации электронов в плазме. Произведено сравнение W_e в разрядах исключительно с омическим нагревом, с дополнительным нагревом одним инжектором и режимом с одновременной работой двух инжекторов. В сценарии с одновременной работой инжекторов был получен режим с перегретыми ионами. В широком диапазоне концентраций центральная температура ионов ($T_i \leq 4$ кэВ) превышала центральную температуру электронов ($T_e \leq 1.6$ кэВ) [3]. Анализ энергодобавки плазмы показал ионную температуропроводность на уровне неоклассических значений для режимов с двумя инжекторами.

Полученные результаты демонстрируют достижение высоких ионных температур на компактном сферическом токамаке при относительно низких значениях тороидального магнитного поля и тока плазмы.

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]. Zhiltsov N.S. et.al. ICRAF-2021. 2021
- [3]. Kurskiev G.S. et al 2022 Nucl. Fusion 62 104002

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОННОГО КОМПОНЕНТА НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ КОМПАКТНОГО АНАЛИЗАТОРА CNRA

Шулятьев К.Д., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Дьяченко В.В., Жильцов Н.С., Курские Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Несеневич В.Г., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Солоха В.В., Ткаченко Е.Е., Тельнова А.Ю., Тюхменева Е.А., Чернышев Ф.В., Щеголев П.Б.

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.039

В 2018 году в ФТИ им. А. Ф. Иоффе был осуществлен физический пуск модернизированного сферического токамака Глобус-М2 [1]. В настоящее время ведутся работы по поэтапному выводу установки на максимальные проектные параметры: тороидальное магнитное поле на оси 1 Тл и ток плазмы 0,5 МА [2,3]. Система инжекционного нагрева токамака была дополнена вторым инжектором с энергией частиц пучка до 50 кэВ. Другим методом нагрева, развиваемым на Глобус-М2, является ввод в плазму волн ионно-циклотронного диапазона частот. Применение обоих методов ведет к возникновению в плазме популяции высокоэнергичных ионов. Исследование удержания и термализации высокоэнергичных ионов является одним из пунктов научной программы Глобус-М2. Имеющиеся на токамаке анализаторы потоков атомов – АКОРД-12 и АКОРД-24М – позволяют проводить исследования ионного компонента в диапазоне энергий до 30 кэВ. В связи с этим возникла необходимость в новом приборе, способном анализировать потоки атомов перезарядки в расширенном энергетическом диапазоне от тепловых энергий до 60 кэВ.

В 2022 году на Глобус-М2 был введен в действие компактный анализатор атомов перезарядки CNRA-09, который регистрирует частицы в диапазоне энергий 0,8÷60 кэВ в случае дейтерия или 0,8÷120 кэВ в случае водорода. Прибор имеет 44 канала и позволяет за один разряд получать подробный энергетический спектр. В рамках экспериментальных кампаний были проведены измерения потоков атомов в разрядах с нейтральной инжекцией и в омическом режиме. Получены энергетические спектры атомов перезарядки.

Сравнение ионной температуры, вычисленной по наклону спектра атомов перезарядки, с данными анализаторов АКОРД-12 и АКОРД-24 показало хорошее соответствие в омических разрядах. В режимах с включением нового инжектора также наблюдалось приемлемое согласие результатов. Расхождения при измерениях ионной температуры – занижение в 1.5 раза по данным CNRA – были обнаружены при одновременной работе двух инжекторов. Предполагается, что отличие обусловлено отсутствием заметной активной мишени перезарядки на линии видимости анализатора CNRA-09, и, как следствие, измерением усредненной температуры. Анализаторы АКОРД регистрируют активные потоки атомов перезарядки из центральной области плазмы, измеряется локальная ионная температура, значение которой заметно выше усредненного.

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]. N.N. Bakharev, et al. // Nucl. Fusion 59 (2019) #112022
- [2]. V.B. Minaev, et al. // Nucl. Fusion 57 (2017) #066047
- [3]. V.B. Minaev, et al. // Proc. 46th EPS Conf. on Plasma Physics, Milan, 2019 ECA 43C P4-1084

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕЙТРОННОГО ВЫХОДА НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

Скрекель О.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С.,
Ильясова М.В., Киселев Е.О., Корнев В.А., Курский Г.С., Минаев В.Б.,
Мирошников И.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е.,
Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Шевелев А.Е., Шулятьев К.Д.,
Щёголев П.Б.

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.040

Первые измерения нейтронных потоков, испускаемых из плазмы токамака, были начаты на установке Глобус-М и продолжены после её модернизации до Глобус-М2. Рождение нейтронов на этих установках связано с протеканием реакций DD синтеза при взаимодействии высокоэнергетических частиц, возникающих при инжекционном нагреве плазмы, с тепловыми частицами, а также между собой. Таким образом, нейтронный поток является интегральной величиной, отражающей процессы, происходящие с ионами высокой энергии в плазме.

Летом 2022 года была завершена реконструкция комплекса нейтронной диагностики токамака Глобус-М2, состоящего из двух коронных счетчиков в полиэтиленовом замедлителе (СНМ-11 с использованием изотопа ^{10}B) и двух нейтронных спектрометров ВС-501А (основаны на жидком органическом сцинтилляторе). Модернизация заключалась в изготовлении коллиматоров из свинца и полиэтилена, что позволило регулировать нейтронную загрузку детекторов, а также их линию наблюдения. После модернизации была повторно проведена *in situ* калибровка нейтронных детекторов при помощи эталонного нейтронного источника (ИБН-241) [1]. Таким образом, диагностика была адаптирована под новые условия работы с существенно возросшими полями нейтронного и жесткого рентгеновского излучения.

В работе проведены сравнения рассчитанных значений нейтронного выхода [2] с экспериментально измеренными для разных режимов работы Глобус-М2: величина тороидального магнитного поля изменялась в диапазоне 0.5–0.9 Тл, тока плазмы – в диапазоне 0.2–0.4 МА, средняя концентрация электронов варьировалась в пределах 10^{19} – 10^{20} м⁻³ при энергии и мощности инжекции в диапазоне от 20 до 48 кэВ и от 250 до 1400 кВт, соответственно. Также рассмотрены причины расхождения результатов расчетов с результатами экспериментов. Помимо этого, новые измерения позволили проверить предсказания [3–5] о величине нейтронного выхода для установки Глобус-М2 при её выходе на проектные параметры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21–72–20007).

Литература

- [1]. Скрекель О.М. и др. ЖТФ. 2021. Т.92. В.1. С. 32–35
- [2]. Скрекель О.М. и др. ПЖТФ. 2021. Т.47. В.4. С. 22–25
- [3]. Bakharev N.N. et al. Nucl. Fusion 55 (2015) 043023
- [4]. Kornev V.A. et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 126005
- [5]. Minaev V.B. et al. Nucl. Fusion 57 (2017) 066047

КЛАССИФИКАЦИЯ КРАЕВЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

^{1,2}Солоха В.В., ¹Курский Г.С., ^{1,2}Яшин А.Ю., ¹Балаченков И. М., ¹Варфоломеев В.И.,
¹Воронин А.В., ¹Горяинов В.Ю., ¹Гусев В.К., ¹Дьяченко В.В., ¹Жильцов Н.С.,
¹Киселев Е.О., ¹Минаев В.Б., ¹Мирошников И.В., ¹Новохацкий А.Н., ¹Петров Ю.В.,
²Петров А.В., ²Пономаренко А.М., ¹Сахаров Н.В., ¹Тельнова А.Ю., ¹Ткаченко Е.Е.,
¹Токарев В.А., ¹Толстяков С.Ю., ¹Тюхменева Е.А., ¹Хромов Н.А., ¹Щёголев П.Б.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, vsolokha@mail.ioffe.ru

²ФГАОУ ВО «СПБПУ», г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.041

Разряды сферического токамака Глобус-М2 [1] демонстрируют наличие срывов краевой неустойчивости при работе в режиме улучшенного удержания. Авторами были изучены условия возникновения срывов краевой неустойчивости двух типов: синхронизированных [2] и десинхронизированных с внутренними перезамыканиями. Для типизации срывов краевой неустойчивости были проанализированы разряды Глобус-М2 с током плазмы I_p до 400 кА и тороидальным магнитным полем B_T до 0.9 Тл.

Десинхронизированные срывы краевой неустойчивости в токамаке Глобус-М2 относятся к типу III [3]. Принадлежность к типу III определяется линейной зависимостью частоты десинхронизированных срывов от средней концентрации электронов в разряде. Для синхронизированных срывов классическая типизация неприменима, так как их частота равна частоте перезамыканий. С помощью диагностики томсоновского рассеяния [4,5] и кода VOUT++ [6] были проанализированы условия развития пилинг-баллонной моды в пьедестале. При возникновении синхронизированных срывов пьедестал Глобус-М2 находится в области параметров стабильной пилинг-баллонной моды, и, следовательно, дестабилизация пьедестала не наблюдается без внешнего возмущения. Десинхронизированные срывы присутствуют в разрядах с параметрами пьедестала, соответствующими неустойчивой пилинг-баллонной моде.

В работе обсуждается влияние примесей на стабильность пилинг-баллонной моды; описывается переход от режима с десинхронизированными срывами краевой неустойчивости к синхронизированным срывам, при неизменном градиенте давления в пьедестале, после спонтанного увеличения концентрации углерода. Также, авторами показана ограниченная предиктивная сила модели EPED в токамаке Глобус-М2, обусловленная наличием возмущённой микротиринговой моды в краевой плазме токамака, что подкрепляется гирокинетическими симуляциями [7] и экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект №18-72-10028. Эксперименты проведены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях".

Литература

- [1]. Minaev V.B. et al, 2017, Nucl. Fusion, 57 066047
- [2]. Bulanin, V.V. et al, 2021, Plasma Phys. Control. Fusion, 63 122001
- [3]. Maingi R. et al, 2005, Nucl. Fusion, 45 1066
- [4]. Tolstyakov S. et al, 2006, Technical Physics, Vol. 51 No. 7 pp. 846–852
- [5]. Kurskiev G. et al, 2020, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 963
- [6]. Dudson B. et al, 2009, Computer Physics Communications, 180 1467–1480
- [7]. Kiselev E. et al, 2019, J. Phys.: Conf. Ser., 1383 012003

СОЗДАНИЕ ПОТОКА ГАЗОВОЙ СТРУИ С ПОМОЩЬЮ УСКОРИТЕЛЯ ПЛАЗМЫ

^{1,2}Горяинов В.Ю., ¹Воронин А.В.

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия, vgoryainov@mail.ioffe.ru

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.042

Плазменные ускорители в настоящее время успешно применяются для задач управляемого термоядерного синтеза. Струя плазмы активно используется для инициирования разряда и подпитки топливом установок с магнитным удержанием плазмы, а также для моделирования условий взаимодействия плазмы с первой стенкой реактора [1,2]. В настоящее время активно применяется и напуск газа в плазму для решения различных задач. Так напуск гелия в водородную или дейтериевую плазму активно используется для диагностических целей в экспериментах на токамаках ФТ-2, COMPASS, MAST, DIII-D, TEXTOR, MST, JET, ASDEX-U, JT-60 и др. и стеллараторах TJ-II, LHD [3-5]. Скорость потока газа в этих экспериментах ограничена и близка к скорости звука (~1 км/с). Для более глубокого зондирования плазмы существует потребность в увеличении этой скорости. С этой целью в настоящей работе предлагается метод генерации потока струи гелия, движущегося со скоростью более 50 км/с. Метод состоял в трансформации плотной и холодной струи плазмы в поток газа. С этой целью плазма пропусклась через длинный канал, в котором по мере движения она практически полностью рекомбинировала. Таким образом, на выходе канала образовывался поток газа, скорость которого была близка к скорости движения потока плазмы.

Исследования проводились на стенде, представляющим собой набор диагностик и вакуумную камеру объемом 2.5 м³ с затвором, через который можно было присоединять различные варианты источников. Струя могла свободно вытекать в камеру. Коаксиальный ускоритель плазмы питался от накопителя емкостью 160 мкФ с напряжением на электродах до 5 кВ. Плотность и скорость истечения струи на выходе достигали 10¹⁶ см⁻³ и 100 км/с, соответственно. Вдоль движения плазменной струи соосно с ускорителем располагали различные варианты длинных каналов, в которых плазма могла рекомбинировать и трансформироваться в поток нейтрального газа, движущийся со скоростью в несколько десятков километров в секунду.

В работе представлены результаты формирования потока нейтрального гелия, создаваемого с помощью ускорителя плазмы и длинной рекомбинационной трубы. В ходе проведенных исследований обнаружены условия, при которых на выходе из патрубка выходила струя нейтрального гелия со скоростью 50-60 км/с.

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); поддержана Министерством науки и высшего образования РФ в рамках гос. задания в сфере науки по проекту №0784-2020-0020.

Литература

- [1]. Воронин А.В. и др. Физика плазмы, том 47, № 8, с. 675-683
- [2]. Новохацкий А.Н. и др. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 4
- [3]. Лашкул С.И. и др. Физика плазмы, 2012, Т. 38, В. 11, С. 923–936
- [4]. Ahn J.W., Craig D., Fiksel G. et al. // Phys. Plasmas. 2007. V. 14. P. 083301.
- [5]. Goto M. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2003. V. 76. P. 331

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ ШИРА СКОРОСТИ МЕТОДОМ РАДИАЛЬНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

¹Пономаренко А.М., ^{1,2}Яшин А.Ю., ²Жильцов Н.С., ²Курский Г.С., ²Минаев В.Б., ¹Петров А.В., ²Петров Ю.В., ²Сахаров Н.В., ²Щеголев П.Б.

¹ ФГАОУ ВО «СПбПУ», г. Санкт-Петербург, Россия

² ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.043

На сферическом токамаке Глобус-М2, где эксперименты проводились при тороидальном магнитном поле до 0,9 Тл и токе плазмы до 0,43 МА, были изучены свойства плазмы в режиме улучшенного удержания или H-моды [1]. Поведение плазменных флуктуаций было исследовано при LH-переходе с помощью метода доплеровского обратного рассеяния (ДОР) [2]. Данная диагностика позволила измерить значения ширины скорости, а также проследить за поведением турбулентности плазмы. Было выявлено, что значение ширины скорости на сепаратрисе увеличилось с $3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ в L-моды до $6 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ в H-моды. Также одновременно с ростом ширины наблюдалось резкое уменьшение амплитуды плазменных флуктуаций на периферии плазмы. Это свидетельствует о том, что явление LH-перехода связано с тем, что ширина скорости играет значительную роль в подавлении турбулентности или аномального переноса, что напрямую способствует стабильной H-моды.

В дальнейших экспериментах была поставлена задача исследовать турбулентность на токамаке Глобус-М2 при LH-переходе с помощью диагностики радиальной корреляционной доплеровской рефлектометрии с целью изучения их корреляционных свойств. Для успешного применения данного метода было установлено несколько многочастотных систем ДОР с каналами с фиксированными частотами 50 - 75 ГГц, 20 - 48 ГГц [3-4], а также система с одним каналом с меняющейся частотой от 18 до 26 ГГц. Все перечисленные частоты соответствуют области исследования с нормированным малым радиусом $\rho = 0.5 - 1.1$, что говорит о возможности сбора данных из различных областей плазмы: центральной, пьедестала, сепаратрисы и обдирочного слоя.

В данной работе приведены результаты анализа данных о турбулентности в L- и H-моды. Для этого были посчитаны корреляционные функции между сигналами различных каналов диагностики ДОР (скорости и амплитуды) с целью получения корреляционных длин плазменных флуктуаций в различных областях плазмы токамака. Было исследовано влияние различных параметров плазмы и инжектируемых быстрых частиц, инициирующих LH-переход, на значения и поведение ширины скорости в разрядах. Кроме того, было выявлено уменьшение радиальной корреляционной длины после перехода в H-моду, что соответствует модели подавления турбулентности широким спектром скорости.

Настоящая работа поддержана Российским научным фондом (проект No. 18-72-10028). Эксперименты выполнены на УНУ "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав ФЦКП "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Литература

- [1]. Kurskiv G.S. et al., 2022 Nucl. Fusion **62** 104002
- [2]. Yashin A. Yu. et al., 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020) 10–15 May 2021, EX/P7-13
- [3]. Bulanin V. V. et al., 2021 Rev. Sci. Instrum. **92** 033539
- [4]. Yashin A.Y. et al 2022 JINST **17** C01023

КОНВЕРСИЯ МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ТОКА ПЛАЗМЫ В КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ СРЫВАХ В ТОКАМАКЕ

Пустовитов В.Д., Савин В.Ю.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия,

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.044

Одной из многих причин повреждений первой стенки вакуумной камеры токамака является большой поток тепловой энергии, локально выбрасываемый на стенку убегающими электронами (УЭ) при срывах. Исследования показывают [1, 2], что запасенная УЭ энергия может достигать 100 МДж на установке ITER, а площадь поверхности стенки камеры, на которой выделяется энергия, достаточно мала. Условия установления режима, при котором электроны аккумулируют большую энергию, на данный момент изучены неполно [1-3].

В работе в рамках модели, включающей в себя плазменный шнур, вакуумный зазор и стенку камеры токамака, исследуется процесс конверсии энергии магнитного поля тока плазмы в кинетическую энергию УЭ в терминальной фазе срыва разряда. Следуя работам [1, 2], энергия, переданная от магнитного поля УЭ, выражается формулой:

$$\Delta W_{kin} = \frac{1}{\pi^2 a^4} \int_{t_1}^{t_2} \int_{V_p} \left(\frac{1}{\sigma_p} (J_p - J_{RE}) - \pi a^2 E_C \right) J_{RE} dV dt. \quad (1)$$

Здесь a – малый радиус токамака, σ_p – проводимость плазмы, E_C – критическое поле, J_p и J_{RE} – полный ток плазмы и ток УЭ соответственно. Интегрирование производится по объему плазмы и по времени рассматриваемого процесса (терминальная фаза срыва разряда).

При условии отсутствия смещения плазмы как целого и однородного распределения плотности токов по сечению плазмы временные зависимости токов находятся из системы дифференциальных уравнений первого порядка с учетом закона Ома [4]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} (L_p J_p + L_w J_w) = -R_p (J_p - J_{RE}) - \frac{d\Psi_0^e(b)}{dt}, \\ \frac{d}{dt} (J_p + J_w) = -\frac{1}{\tau_w^0} J_w - \frac{d\Psi_0^e(b)}{L_w dt}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь J_w – ток в стенке камеры, R_p – сопротивление плазмы, L_p и L_w – индуктивности плазмы и стенки соответственно, $\Psi_0^e(b)$ – потоковая функция внешних токов на границе плазмы, τ_w^0 – постоянная времени.

При постоянной потоковой функции внешних токов для стандартных параметров разряда на токамаке ITER, используемых в работах [1, 2], полученное для конвертируемой в кинетическую энергию УЭ энергии поля значение в 66,47 МДж практически совпадает с соответствующим значением в работе [1] (~70 МДж) и в несколько раз меньше величины, указанной в работе [2] (~270 МДж). Это может быть связано с учетом в представленной работе конечной резистивности стенки камеры (значительная часть тока УЭ на терминальной стадии конвертируется в ток в стенке, что приводит к значительным энергетическим потерям в ней), а также с учетом в работе [2] генерации УЭ за счет лавинного механизма (усиливающей конверсию), которая не учитывается в данной работе.

Литература

- [1]. Riemann J., Smith H. M., Physics of Plasmas, 2012. – Т. 19. – №. 1. – С. 012507.
- [2]. Martin-Solis J. R. et al, Nuclear Fusion, 2014. – Т. 54. – №. 8. – С. 083027.
- [3]. Dai A.J. et al, Plasma Physics and Controlled Fusion, 2018. – Т. 60. – №. 5. – С. 055003.
- [4]. Pustovitov V.D., Plasma Physics Reports, 2019. – Т. 45. – №. 12. – С. 1114-1127.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЦР НАГРЕВА ПЛАЗМЫ НА ЧАСТОТЕ 140 ГГц В ТОКАМАКЕ Т-15МД

¹Минашин П.В., ^{1,2}Кукушкин А.Б.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, Minashin_PV@nrcki.ru,

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.045

Электронно-циклотронный (ЭЦ) резонансный нагрев (ЭЦРН) и ЭЦ-генерация тока (ЭЦГТ) рассматриваются как эффективные методы дополнительного нагрева плазмы и создания неиндукционного тока в токамаке Т-15МД [1]. Исследование по поиску оптимальных параметров системы ЭЦРН/ЭЦГТ (определение рабочей частоты волны гиротронов, выбор схем инжекции, оптимизация эффективности нагрева и генерации тока) проводились в ряде работ: поиск оптимальных параметров инжекции для нагрева и генерации тока с помощью необыкновенной волны на первой и второй гармониках ЭЦРН X₁, X₂ 56/112 ГГц [2], обоснование выбора рабочей частоты ЭЦРН X₂ 82,6 ГГц и X₂, X₃ ~102—110 ГГц [3], исследование возможности использования X₃ волны 140 ГГц в Т-15МД [4].

Оптимизация параметров системы ЭЦРН требует выполнения быстрых расчетов эффективности нагрева и генерации тока (см. [5] для ИТЭР). Для этого можно использовать лучевые коды, (например, коды GENRAY [6], TORAY [7], TORBEAM [8]) и коды для решения уравнения Фоккер-Планка (ФП) (например, код CQL3D [9]) для определения функции распределения электронов по скоростям или коды, объединяющие моделирование распространения гауссова пучка с решением уравнения ФП (например, код OGRAY [10]).

В настоящей работе для анализа эффективности поглощения ЭЦ нагрева в Т-15МД используется код GENRAY [6], т.к. он позволяет проводить расчеты для различных моделей дисперсионной функции, определяющей распространение ЭМ-волн в плазме, и для различных моделей коэффициента поглощения волн в плазме. Проведено сравнение результатов моделирования ЭЦРН на частоте 140 ГГц в Т-15МД кодом GENRAY с результатами аналогичных расчетов кодом OGRAY в [4].

Литература

- [1]. Хвостенко П.П., Анашкин И.О., Бондарчук Э.Н., Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез, 2019, 42, 15.
- [2]. Minashin P.V., Kukushkin A.B., Harvey R.W., Problems of Atomic Science and Technology, ser. Thermonuclear Fusion, 2017, 40, 65-72.
- [3]. Кирнева Н.А., Кислов Д.А., Рой И.Н., Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез, 2020, 43, 64-74.
- [4]. Кирнева Н.А., Борщеговский А.А., Куянов А.Ю., Пименов И.С., et al., Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез, 2021, 44, 24-36.
- [5]. Prater R., Farina D., Gribov Y., Harvey R.W., et al., Nuclear Fusion, 2008, 48, 035006.
- [6]. Smirnov A.P., Harvey R.W., Kupfer K., Bulletin of the American Physical Society, 1994, 39, 1626.
- [7]. Kritz A.H., Hsuan H., Goldfinger R.C., Batchelor D.C., Proc. 3rd International Symposium on Heating in Toroidal Plasmas, Brussels, Belgium, 1982, 2, 707.
- [8]. Poli E., Peeters A.G., Pereverzev G.V., Computer Physics Communications, 2001, 136, 90-104.
- [9]. Harvey R.W., McCoy M.G., Proc. IAEA Technical Committee Meeting on Advances in Simulation and Modeling of Thermonuclear Plasmas, Montreal, Canada, 1992, IAEA Institute of Physics Publishing, 489-526.
- [10]. Звонков А.В., Куянов А.Ю., Сковорода А.А., Тимофеев А.В., Физика плазмы, 1998, 24, 424-435.

ДИАГНОСТИКА FIDA ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЫСТРЫХ ИОНОВ ПРИ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ НА ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М

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

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: shuvalova-lyuba@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.046

Диагностика быстрых ионов FIDA (Fast-ion D-alpha) состоит в измерении и анализе спектра излучения, возникающего в результате девозбуждения атомов дейтерия или водорода, образовавшихся при перезарядке быстрых ионов на атомах нагревного пучка. Анализ этих спектров, регистрируемых обычно в разных ракурсах по отношению к направлению инжекции и области локализации быстрых ионов, позволяет получить информацию о функции распределения последних. На токамаке ТУМАН-3М проведены первые эксперименты по измерению сигналов FIDA при инжекции атомов водорода, в некоторых из которых обнаружены искажения спектра излучения, связанные с наличием в плазме быстрых атомов и ионов. Однозначная интерпретация этих спектров, однако, затруднена вследствие слабости сигналов и влияния более сильного излучения, вызванного другими процессами, например свечением атомов самого нагревного пучка. Кроме того, требуется учет конкретной геометрии наблюдения в каждом эксперименте.

Для количественной интерпретации зарегистрированных спектров использовался код FIDASIM, реализующий метод Монте-Карло. Он позволяет получить функцию распределения быстрых ионов через моделирование спектров, регистрируемых по реальным линиям наблюдения, с дальнейшим достижением наилучшего совпадения с экспериментально наблюдаемыми спектрами путем подбора параметров функции распределения быстрых ионов и коэффициентов, описывающих их торможение и потери.

Для работы FIDASIM необходимы параметры плазмы (данные о магнитных полях, профили температуры, концентрации, эффективного заряда и другие) и атомарного и ионного пучков, часть из которых доступна в эксперименте, а остальные получаются путем моделирования разряда совместно кодами ASTRA и NUBEAM. Требовательность FIDASIM к количеству входных данных и их виду привела к необходимости разработки специального интерфейса между этими кодами и FIDASIM. В первую очередь была установлена связь между транспортным кодом ASTRA и связанным с ним модулем NUBEAM посредством дополнительной утилиты обработки входных параметров на пространственную сетку NUBEAM, в их числе плазменные профили, карта магнитных поверхностей, геометрия нейтральной инжекции и информация о составе пучка. В результате взаимодействия двух кодов была получена функция распределения быстрых ионов. В дальнейшем была установлена связь между текущим набором данных с кодом FIDASIM через подпрограмму для считывания и преобразования на новую пространственную сетку параметров из созданных в процессе вывода из ASTRA и NUBEAM файлов. В качестве дополнения была добавлена реальная геометрия спектральной диагностики. После проведения полного описания требуемых входных параметров, а также поиска оптимальных настроек моделирования, таких как число пробных частиц для моделирования Монте-Карло, были получены синтетические спектры излучения FIDA и проведено сравнение их с зарегистрированными в эксперименте.

Обеспечение функционирования токамака ТУМАН-3М и работы стандартных диагностик осуществлялось при поддержке государственного контракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2019-0023. Создание комплекса диагностики FIDA и моделирование ее работы на токамаке ТУМАН-3М было осуществлено при поддержке государственного контракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0034-2021-0001.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НАГРЕВУ ПЛАЗМЫ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ ДИАМАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

¹Ткаченко Е.Е., ¹Сахаров Н.В., ¹Курские Г.С., ¹Жильцов Н.С., ¹Мирошников И.В.,
¹Петров Ю.В., ¹Минаев В.Б., ¹Бахарев Н.Н., ²Кавин А.А., ¹Киселев Е.О.,
²Лобанов К.М., ¹Новохацкий А.Н., ²Минеев А.Б., ¹Солоха В.В., ¹Тельнова А.Ю.,
¹Тюхменева Е.А., ¹Хромов Н.А., ¹Щеголев П.Б.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, erina.tkachenko@yandex.ru

²АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.047

В работе представлен анализ оценки запасенной в плазме тепловой энергии W_p в разрядах токамака Глобус-М2 с тороидальным магнитным полем до 0.9 Тл, током плазмы 0.3-0.4 МА в режиме с дополнительным нагревом. Для нагрева использовались два инжектора атомов с энергиями частиц $E_{NBI}^1 \leq 28$ кэВ и $E_{NBI}^2 \leq 45$ кэВ, суммарная вводимая мощность составила $P_{NBI} = 1.25$ МВт. С учетом мощности омического нагрева полная объемная плотность мощности нагрева достигла значения в $P_{total}/V_p \approx 3$ МВт/м³.

Эволюция W_p была промоделирована РЕТ [1] - равновесным кодом со свободной границей. Код решает уравнение Грэда-Шафранова и дает возможность определять диамагнитный поток от плазмы. Задача равновесия плазмы решалась итеративным методом минимизации двух параметров – евклидоваго расстояния между реконструированной границей плазмы и смоделированной кодом РЕТ, а также разности диамагнитного потока от плазмы из РЕТ и экспериментального.

Измеренный диамагнитный поток использовался для определения β_{dia} [2] и последующего расчета W_{approx} по приближенным формулам. Отличие W_p и W_{approx} в диапазоне от 6 до 16 кДж составило менее 10%.

Реконструкция крайней замкнутой магнитной поверхности плазмы осуществлялась с помощью метода токовых колец [3]. Данный метод моделирует ток плазмы набором из 19 токопроводящих колец. Входными данными являются магнитные потоки, измеренные 21 петлей, размещенной на стенке вакуумной камеры вблизи границы плазмы, ток плазмы, токи в катушках полоидального магнитного поля и ток соленоида. Сигналы магнитных петель дополнительно используются для определения распределения токов по стенке вакуумной камеры.

Внутренняя индуктивность (l_i) была определена из выражения для вертикального магнитного поля в приближении $\beta_p = \beta_{dia}$. Данная индуктивность соответствует l_i , полученной кодом РЕТ, с точностью 10% в рассмотренном диапазоне от 0,8 до 1,2.

Запасенную в плазме энергию (W_{kin}) можно также определить из кинетических измерений профилей температуры и концентрации электронов и ионов, полученных с помощью диагностики томсоновского рассеяния лазерного излучения, диагностики спектроскопии излучения атомов перезарядки (CXRS) и анализатора спектра нейтральных атомов (NPA). Эффективный заряд плазмы получен посредством диагностики тормозного излучения. В работе приведено сравнение W_{kin} и W_p .

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]. S.A. Galkin, A.A. Ivanov, S.Yu. Medvedev et al Nucl. Fusion, **37** (1997).
- [2]. L.L. Lao et al 1985 Nucl. Fusion 25 1421
- [3]. V.I. Vasiliev, Yu.A. Kostsov, K.M. Lobanov et al, Nucl. Fusion **46**, 625 (2006).

ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМУ ВАКУУМНОЙ МАГНИТНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В СТЕЛЛАРАТОРЕ

¹Ханаева Р.А., ²Михайлов М.И.

¹Московский физико-технический институт (НИИУ), г. Долгопрудный, Россия, e-mail: hanaeva@phystech.edu

²НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, mikhaylov_mi@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.048

Поперечное (перпендикулярное плоскости тора) магнитное поле часто применяется в стеллараторах для изменения как формы магнитных поверхностей, так и величины и фазы магнитных островов, используемых для создания островного дивертора. Априори не ясно, какими именно параметрами исходной конфигурации определяется чувствительность магнитной конфигурации к изменению внешнего поперечного поля. Попытка решить такую задачу сделана в этой работе. Эта задача решается при допущении, что исходная вакуумная магнитная конфигурация имеет вблизи периферии резонансную поверхность, но острова не образуются, так что можно с использованием кода VMES [1] найти равновесную вакуумную конфигурацию и определить её метрику (в данном случае метрику бузеровской потоковой системы координат).

Поперечное поле и изменение магнитной конфигурации считаются малыми. Уравнение магнитных поверхностей $\mathbf{B}\nabla a = 0$ ($\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_\perp$, $a = a_0 + \delta$) при однородном поперечном поле $\mathbf{B}_\perp = C\nabla Z$ приводится к виду (в качестве исходной используется цилиндрическая система координат R, Z, φ):

$$\Phi' \left(\mu \frac{\partial \delta}{\partial \theta} + \frac{\partial \delta}{\partial \zeta} \right) = -CR(\varphi'_\theta R'_\zeta - \varphi'_\zeta R'_\theta)$$

Правая часть выражения определяет величину изменения вакуумных поверхностей $\delta(a, \theta, \zeta)$. В случае, если используется потоковая система с выпрямленными силовыми линиями с неизменным тороидальным углом, то $\varphi \equiv \zeta$, $\varphi'_\zeta = 1$, $\varphi'_\theta = 0$, и уравнение для δ принимает вид:

$$\Phi' \left(\mu \frac{\partial \delta}{\partial \theta} + \frac{\partial \delta}{\partial \zeta} \right) = CRR'_\theta$$

Это уравнение может быть обобщено на случай «бочкообразного» поперечного магнитного поля.

Как видно из уравнения, для образования островов поперечным полем важна резонансная гармоника в R^2 , в отличие от самозалечивания островов при изменении давления плазмы [2].

Литература

- [1]. S.P. Hirschman. Phys. Fluids, 1983, 26, 3553.
- [2]. T. Hayashi, T. Sato, P. Merkel, J. Nührenberg, U. Schwenn. Physics of Plasmas, 1994, 1, 3262.

ТЕЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ В ВИНТОВОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРИ ИЗМЕНЯЕМОМ НАПРАВЛЕНИИ ВРАЩЕНИЯ

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

¹*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, e-mail: A.V.Sudnikov@inp.nsk.su*
²*Новосибирский государственный университет*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.049

Одной из основных задач исследований в области открытых ловушек является снижение продольных потерь частиц и энергии. Одним из новых методов подавления продольных потерь является динамическое многопробочное удержание вращающейся плазмы в магнитном поле с геликоидальной симметрией [1]. Теоретически предсказана экспоненциальная зависимость эффективности подавления потерь от длины участка с винтовым полем, приводящая к существенному повышению эффективного пробочного отношения в открытой ловушке [2]. Действующая на плазму сила, приводящая к повышению продольного градиента давления, зависит от доли запертых частиц и скорости вращения плазмы. Инверсия направления приводит к изменению направления действующей силы и, тем самым, к отсутствию эффекта винтового удержания.

Проверка данной концепции проводится на установке СМОЛА в ИЯФ СО РАН. Детальное описание установки приведено в [3]. 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 [4, 5].

В докладе представлены результаты исследования течения плазмы при различном направлении вращения плазмы в широком диапазоне плотности, соответствующим длине свободного пробега иона относительно кулоновских столкновений от одного периода винтового магнитного поля $\lambda \sim h$ до полной длины винтовой магнитной системы $\lambda \sim L$. При направлении вращения, отвечающем улучшенному удержанию, подавление потока истекающей плазмы наблюдается во всём диапазоне плотности. Наличие эффекта винтового удержания при низкой плотности плазмы может отвечать возникновению аномальной столкновительности, вызванной двухпоточковой неустойчивостью. При инвертированном направлении вращения и продольной силы поток существенно зависит от плотности плазмы. Наибольший поток наблюдается при средних значениях плотности, отвечающих длине свободного пробега ионов относительно кулоновских столкновений $\lambda \sim 3h$.

В докладе также будут приведены результаты экспериментов с изменяемой скоростью вращения плазмы.

Литература

- [1]. A.D. Beklemishev. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // Fusion Science and Technology, V.63, N.1T, May 2013. P.355
- [2]. A.D. Beklemishev. Radial and axial transport in trap sections with helical corrugation // AIP Conf. Proc. 1771 (2016) 040006, doi: 10.1063/1.4964191.
- [3]. 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.
- [4]. A.V. Sudnikov et al. Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness// J. of Plasma Physics, 86(5), 2020, 905860515
- [5]. 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

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ ВИНТОВОЙ ЛОВУШКЕ СМОЛА

¹Инжеваткина А.А., ¹Судников А.В., ¹Иванов И.А., ²Устюжанин В.О.

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
A.A.Inzhevatkina@inp.nsk.su*

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.050

В ИЯФ СО РАН проводится экспериментальное исследование физики удержания и ускорения плазменного потока в открытой винтовой ловушке СМОЛА [1]. Плазма вращается в скрещенных $E \times B$ полях, и во вращающейся системе отсчета продольная скорость магнитных пробок сопоставима с продольной скоростью течения плазмы. Режим удержания и ускорения плазменного потока регулируется направлением магнитного поля.

Продольная скорость движения плазмы в винтовой секции определяется с помощью диагностики на основе зонда Маха, представляющего собой два ассиметричных двойных зонда, отделенных друг от друга керамической перегородкой. Такая конструкция позволяет регистрировать токи насыщения ионов, летящих строго по направлению плазменного потока и против него. Получены радиальные зависимости продольной скорости движения плазмы в транспортной секции от ее основных параметров.

В режиме удержания плазменного потока продольная скорость движения падает при увеличении среднего по сечению пробочного отношения. В режиме ускорения максимальное значение продольной скорости движения достигнуто в условиях, обеспечивающих максимальный интегральный по сечению поток, посчитанный по измерениям зондов, установленных на выходе из транспортной секции и в выходном расширителе установки. Было определено направление движения плазменной струи относительно ведущего магнитного поля.

В выходном расширителе скорость определяется с помощью спектрометра с высоким пространственным разрешением на основе МДР-23 [2], установленного под углом 30° к оси установки, по доплеровскому смещению спектральной линии излучения $\text{H}\alpha$. Максимальная продольная скорость в центре плазменного шнура составляет $V_z \sim 3 \cdot 10^6$ см/с. Продольные скорости движения, полученные благодаря оптической и зондовой диагностикам, согласуются друг с другом и лежат в одном диапазоне.

В докладе будут представлены основные зависимости продольной скорости движения от параметров плазмы и конфигурации магнитного поля в режиме ускорения и удержания плазменного потока.

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).
DOI:10.31857/S0367292121080059

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ ОМИЧЕСКОГО НАГРЕВА НА ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М

Лебедев С.В., Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А., Жубр Н.А., Корнев В.А., Крикунов С.В., Мельник А.Д., Разуменко Д.В., Смирнов А.И., Тукачинский А.С., Чернышев Ф.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, sergei.lebedev@mail.ioffe.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.051

Ионное Циклотронное Излучение (ИЦИ, ICE) в диапазоне 5-125 МГц наблюдалось на токамаке ТУМАН-3М в режиме омического нагрева [1,2]. ICE характеризуется зависимостью частоты от расположения магнитного зонда ($f \propto 1/R_{pr}$), а также большим числом эквидистантно расположенных гармоник (до 15). Наблюдение этого излучения в водородных и гелиевых разрядах и в отсутствие дополнительного нагрева позволяет исключить из рассмотрения в качестве возможных механизмов генерации ICE неустойчивости, возбуждаемые в присутствии энергичных частиц.

Эксперименты [1] показали, что область генерации омического ICE расположена на периферии плазмы, а его частота соответствует ИЦ Резонансу в непосредственной близости от детектирующего зонда. В [1] рассматривался возможный механизм неустойчивости, ответственной за генерацию ICE – развитие ионно-циклотронной дрейфовой неустойчивости (ИЦДН, ICDI) [3]. Согласно [3] ICDI развивается при выполнении следующего критерия:

$$\rho_i/\alpha > 2(m_e/m_i)^{1/2} \quad (1)$$

где ρ_i – ионный ларморовский радиус, $\alpha = n/(\partial n/\partial r)$ – радиальный масштаб градиента плотности, m_e и m_i – массы электрона и иона. В приведенный критерий входят 2 плазменных параметра: периферийная температура – T_{i-edge} через ларморовский радиус и относительный градиент плотности на периферии $n/(\partial n/\partial r)|_{edge}$.

В докладе представлены эксперименты по возмущению параметров периферийной плазмы в режиме сильной модуляции скорости напуска рабочего газа (водорода) и анализ влияния этой модуляции на критерий (1). В экспериментах было обнаружено значительное изменение интенсивности ICE (~ 8-ми кратное) при модуляции напуска, см. рис.1.

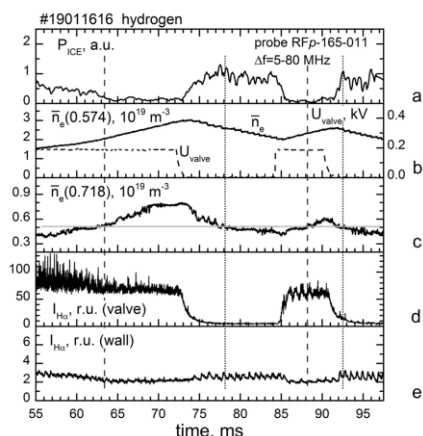


Рис.1. Эволюция мощности ICE в диапазоне 5-80 МГц – окно а, $\bar{n}_e(0,574)$ и $\bar{n}_e(0,718)$ – усредненная плотность, измеренная по вертикальным хордам на больших радиусах 0,574 м (вблизи магнитной оси) и 0,718 м (крайний канал СВЧ интерферометра) – окна b и c, U_{valve} – напряжение, подаваемое на пьезоэлектрический клапан напуска – окно b, сигналы мониторов H_α вблизи клапана напуска водорода – окно d и вдали от клапана – окно e.

Детектирующий магнитный зонд находится на 6,5 см выше экваториальной плоскости со стороны слабого поля.

Анализ показал, что наибольший вклад в изменение критерия (1) в описываемых экспериментах дает изменение ионной температуры, тогда как вклад от изменения относительного градиента плотности пренебрежим.

Литература

- [1]. S.V. Lebedev et al, EPJ Web Conf., 149(2017), 03010
- [2]. L.G. Askinazi et al, Nucl. Fusion, 58(2018), 082003
- [3]. A.B. Mikhailovsky, Nucl. Fusion, 11(1971), 323

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ НА ЛЕГКИХ ПРИМЕСЯХ В ПРИСТЕНОЧНОЙ И ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКОВ

^{1,2}Кукушкин А.Б., ¹Левашова М.Г., ^{1,2}Лисица В.С., ¹Сдвиженский П.А., ¹Шурыгин В.А.

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, Kukushkin_AB@nrcki.ru,

²НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.052

Актуальность повышения точности расчета радиационных потерь (РП) на примесях в установках для магнитного удержания термоядерной плазмы обусловлена тем, что линейчатое излучение легких примесей (азота, неона, аргона) в существующих и планируемых экспериментах с термоядерной плазмой используется, во-первых, для охлаждения диверторной плазмы с целью защиты диверторных пластин и, во-вторых, для охлаждения всей плазмы при аварийном гашении разряда массивированной инъекцией инертного газа.

В настоящей работе исследованы эффекты влияния структуры атомных уровней на различные способы расчета РП на линейчатое излучение легких примесей (азота, неона, аргона). Продемонстрирована необходимость уточнения алгоритмов пользования всеми базами данных для расчета РП низкотемпературной плазмы. Эта проблема является заведомо актуальной для атомов и ионов легких и средних по массе элементов, поскольку используемое в расчетах упрощение структуры атомных уровней в той или иной степени присутствует во всех базах данных. Этот вывод основан на анализе наиболее развитой и широко используемой в мировых термоядерных исследованиях базы данных OPEN-ADAS [1] для расчета РП плазмы. В частности, показано, что для аргона в диапазоне относительно малых температур T , характерном для диверторной плазмы в стационарном режиме и всей плазмы на стадии гашения разряда, прямое суммирование вклада сильных линий в РП может превышать (вплоть до нескольких раз для ионов аргона с зарядом +3 и +2 при $T \sim 3-10$ эВ) РП в модели атомных уровней, упрощенной путем их группировки и, соответственно, перемещения нижних возбужденных уровней на более высокие значения энергии относительно основного состояния иона.

В общем виде проанализированы эффекты упрощения кинетической модели расчета РП при группировке атомных уровней, приводящие к переоценке или недооценке РП в случае перемещения сильно излучающих возбужденных состояний на, соответственно, большие или меньшие энергии возбуждения при усреднении положения возбужденных состояний. Сформулирована реалистичная модель детализации структуры атомных уровней для корректного учета их мультиплетности с одновременной редукцией числа учитываемых радиационных переходов при расчете удельных радиационных потерь.

Литература

[1]. OPEN-ADAS database, <https://open.adas.ac.uk/>

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ КОРРЕЛЯЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИХ И ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ФЛУКТУАЦИЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКАХ

^{1,2}Кукушкин А.Б., ¹Куличенко А.А.

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, Kukushkin_AB@nrcki.ru,

²НИЯУ «МИФИ», Москва, Россия.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.053

Для объяснения наблюдаемых корреляций спектральных характеристик рефлектометрических и зондовых измерений флуктуаций плотности плазмы в токамаках (см. напр. [1, 2]) развитая ранее кинетическая теория [3, 4] для спектра флуктуаций плотности среды с нелокальным (недиффузионным) характером движения индивидуальных флуктуаций применена к расчету спектра флуктуаций плотности плазмы, измеряемой зондами.

Проведенные расчеты основаны на подходе, использующем идею [5] о возможности применения общей концепции прогулок Леви к описанию нелокальных свойств флуктуаций плотности турбулентной среды. Такой подход позволил сформулировать в [3, 4] задачу определения этих свойств по спектрам рассеяния электромагнитных (ЭМ) волн и кросс-корреляционной рефлектометрии. Эффективность предлагаемого метода была показана на примере интерпретации данных радиальной и полоидальной корреляционной рефлектометрии ЭМ волн радиочастотного диапазона для диагностики турбулентной плазмы в осесимметричных тороидальных установках магнитного удержания термоядерной плазмы. В частности, в [3, 4] получено универсальное описание связи наблюдаемой квази-когерентной компоненты [6, 7] в спектре рассеянных ЭМ волн в плазме токамака Т-10 с процессом типа рассеяния Мандельштама-Бриллюэна. Было также показано, что нелокальность пространственных корреляций в турбулентной среде, соответствующая отклонению парной корреляционной функции флуктуаций плотности плазмы от гауссовской, обусловлена длиннопробежными переносчиками флуктуаций плотности среды, для которых функция распределения по длине свободного пробега описывается распределением Леви.

В настоящей работе найдены общие черты у спектров рефлектометрических и зондовых измерений, связанные с их зависимостью от распределения флуктуаций плотности по скоростям. Проанализированы возможные причины сходства основных параметров квази-когерентных колебаний плотности плазмы, регистрируемых с помощью корреляционной рефлектометрии, и аналогичных максимумов в спектре сигналов зондовых измерений в токамаках.

Литература

- [1]. Уразбаев А.О. Кандидатская диссертация "Развитие методики определения характеристик турбулентности в плазме в токамаке из корреляционных рефлектометрических и зондовых диагностик с помощью численного моделирования", М., 2005.
- [2]. Вершков В.А. Докторская диссертация «Аномальный перенос и мелкомасштабная турбулентность в токамаке», М., 2009.
- [3]. Кукушкин А.Б., Куличенко А.А. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2022. Т. 45. Вып. 2. С. 105-122.
- [4]. Kukushkin A.B., Kulichenko A.A. Symmetry. 2022. V. 14. №. 6. P. 1265 (32 pages).
- [5]. Shlesinger M.F., West B.J., Klafter J. 1987 Phys. Rev. Lett. 58, 11.
- [6]. Vershkov V.A., Soldatov S.V., Dreval V.V. Rev. Sci. Instrum. – 1999. – Vol. 70. – P. 1700.
- [7]. Osipenko M.B. et al. Nucl. Fusion. 2003. Vol. 43. P. 1641.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ТОКАМАКА Т-15МД НА ОСНОВЕ ТРАНСПОРТНОЙ МОДЕЛИ КАНОНИЧЕСКИХ ПРОФИЛЕЙ

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

¹НИЦ «Курчатовский Институт», Москва, Россия, e-mail: Kasyanova_NV@nrcki.ru

²МФТИ (НИУ), Долгопрудный, Россия

³НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.054

В работе проводится моделирование омических разрядов токамака Т-15МД на первой стадии работы с уменьшенными значениями магнитного поля $B = 1 - 1.8$ Т и тока плазмы $I < 1.5$ МА. Рассматривается плазма круглой конфигурации (вытянутость $k = 1$, треугольность $\delta = 0$ и малым радиусом $a = 0.67$ м).

Для расчетов используется стандартная транспортная модель канонических профилей [1]. Решаются уравнения для температуры электронов T_e , ионов T_i и диффузии тока. Профиль плотности плазмы задается таким образом, чтобы нормированный расчетный профиль давления $p(\rho)/p(0)$, построенный в нормированных координатах $\rho = r/(IR/kB)^{1/2}$, во всех режимах был одинаковым, как наблюдается в экспериментах на разных токамаках [2]. Рассматривается зависимость электронной и ионной температуры от средней плотности в широком диапазоне значений $\bar{n}_e < 0.8n_{Gr}$ (где $n_{Gr} = I/\pi a^2$ – плотность Гринвальда).

Используя понятие эквивалентности пар разрядов для разных токамаков [1], проводится сравнение расчетных профилей электронной температуры токамака Т-15МД с экспериментальными профилями, полученными на установке Т-10 в разрядах с низкими значениями тороидального магнитного поля ($B = 1.7 - 2.1$ Т).

Сравнение показывает, что среднеквадратичные отклонения (RMS) между нормированными эквивалентными экспериментальными и расчетными профилями электронной температуры составляют $\sim 6-8\%$.

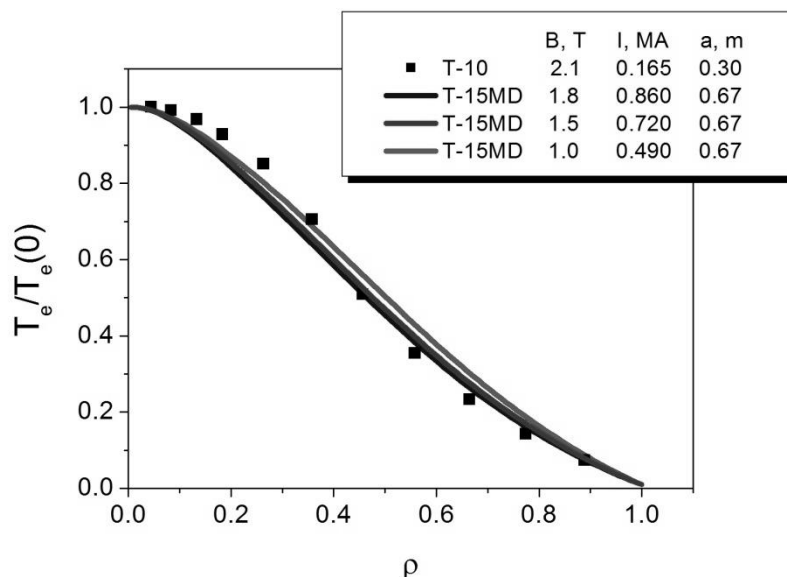


Рис.1. Нормированные профили электронной температуры в омическом режиме: расчетные профили (Т-15МД) для разных значений тороидального поля, тока плазмы и экспериментальный профиль (Т-10), запас устойчивости на границе плазмы $q_a = 4$.

Литература

- [1]. Днестровский Ю.Н. и др., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т.45, вып.1
 [2]. Razumova K.A. et al. Nucl. Fusion. 49 (2009) 065011

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ ГАМ И ЕЁ САТЕЛЛИТОВ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА T-10

²Крохалев О.Д., ^{1,2,3}Мельников А.В., ¹Драбинский М.А., ¹Елисеев Л.Г.

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

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

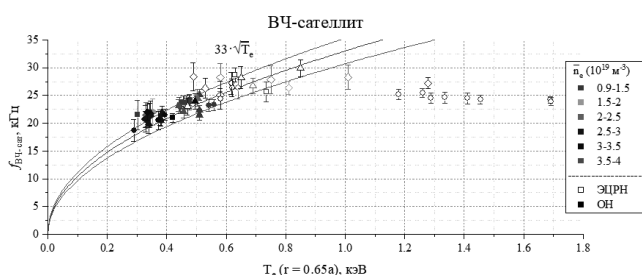
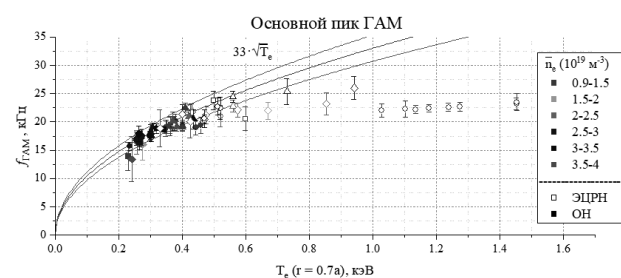
³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.055

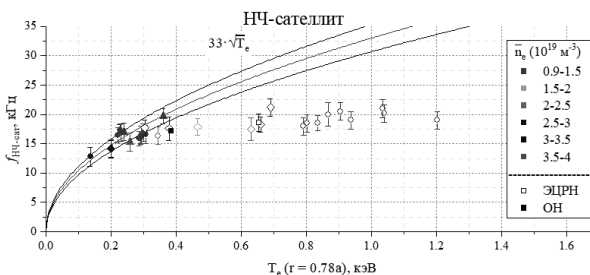
Геодезическая акустическая мода (ГАМ) – высокочастотная ветвь зональных потоков – в плазме токамака T-10 наблюдается в виде трех отдельных частотных пиков: основного, высокочастотного (ВЧ) и низкочастотного (НЧ) сателлитов [1]. Для каждого из этих пиков показано постоянство амплитуды и частоты по радиусу [2].

В данной работе ГАМ исследована с помощью зондирования пучком тяжёлых ионов [3]. Электронная температура T_e получена с помощью диагностик мягкого рентгеновского излучения и второй гармоники ЕСЕ. Применен новый метод аппроксимации спектра колебаний потенциала: суммой трёх гауссиан, соответствующих основному пику ГАМ, ВЧ-сателлиту и НЧ-сателлиту, приблизительные значения частот пиков при необходимости определялись по данным, измеренным в других радиальных положениях в том же режиме. Этот подход позволил более надежно разделить основной пик ГАМ и его сателлиты и построить зависимости $f(T_e)$ для каждого из трех пиков ГАМ в расширенной области параметров плазмы: $n_e = 0.9-4.3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $T_e(0) = 0.9-3.5 \text{ кэВ}$, включающей режимы с максимально мощным СВЧ-нагревом $B_{\text{tor}} = 2.3 \text{ Тл}$, $I_{\text{pl}} = 220-230 \text{ кА}$, $P_{\text{ECRH}} = 2.2 \text{ МВт}$. Показано, что классическая корневая зависимость частоты от температуры справедлива не только для основного пика ГАМ, но также и для обоих сателлитов, причём в широком диапазоне $T_e(0) = 0.9-2.0 \text{ кэВ}$. Однако, при дальнейшем росте температуры $f(T_e)$ насыщается, причём температура выхода на насыщение индивидуальна для каждого пика. Сравнение экспериментальной зависимости с предсказаниями двух моделей – модифицированной двухжидкостной МГД ($f_{\text{ГАМ}}^e = \frac{1}{\sqrt{2m_i \pi R}} \sqrt{T_e}$) и одножидкостной Винзора ($f_{\text{GM}}^W \cong \frac{1}{\sqrt{2m_i \pi R}} \sqrt{\gamma T_e}$) с изменяемой в пределах 1- 5/3 адиабатической постоянной γ – показало, что выбранные модели не описывают насыщение частоты ГАМ и её сателлитов.

Литература



- [1]. Крохалев О.Д., Мельников А.В. // Труды 63 всероссийской научной конференции МФТИ – 2020 – стр. 215-217
- [2]. Крохалев О.Д. и др. // 49 международная Звенигородская конференция по ФП и УТС, сборник тезисов – ISBN 978-5-6042115-6-4 – 2022
- [3]. Мельников А.В и др. // Nuclear Fusion



2017 57 (6) 072004.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПЛАЗМЫ В ОТКРЫТОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ С ГЕЛИКОИДАЛЬНЫМ ПОЛЕМ СМОЛА

¹Устюжанин В.О., ²Беклемишев А.Д., ²Иванов И.А., ²Инжеваткина А.А., ²Судников А.В.,
²Толкачёв М.С., ²Христо М.С.

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия, e-mail:
vikust9623@gmail.com

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.056

В настоящее время одной из нерешённых задач в исследованиях, связанных с магнитным удержанием плазмы в открытых системах, является эффективное подавление продольного потока частиц и энергии. Одним из новых методов подавления продольных потерь является динамическое многопробочное удержание вращающейся плазмы в магнитном поле с геликоидальной симметрией [1]. Плазма вращается из-за $E \times B$ дрейфа, и во вращающейся системе отсчёта плазмы продольная скорость магнитных пробоч сопоставима с продольной скоростью течения плазмы. Направление скорости движения зависит от направлений электрического и магнитного полей. В режиме улучшенного удержания скорость плазменного потока направлена по градиенту плотности плазмы, в режиме ускорения – против. В ИЯФ СО РАН данный метод проходит экспериментальную проверку на установке СМОЛА [2]. Полученные на установке результаты согласуются [3] с теоретическими оценками.

Установка СМОЛА состоит из 3 частей: источника плазмы с входным расширителем, транспортной секции, где задаётся необходимая конфигурация винтового магнитного поля, и выходного расширителя, куда плазма выходит, попадая на радиально сегментированный плазмприёмник. Формируемая источником плазма имеет следующие параметры: $n = 10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 10 \div 30 \text{ эВ}$ и $T_i = 3 \div 7 \text{ эВ}$ [4]. Одним из параметров плазмы, важным с точки зрения эффективности исследуемого метода, является электрическая проводимость. Её учёт позволяет оценить баланс частиц, потенциалов и токов в установке.

Для исследования проводимости плазмы используется комплекс зондовых, оптических и вакуумных диагностик. Электронная температура и ионная плотность плазмы измеряются с помощью двойных ленгмюровских зондов. Температура ионов вычисляется путём определения доплеровского сдвига собственного излучения плазмы с помощью спектрометров с высоким пространственным разрешением. Исследование радиального и продольного распределения электрического потенциала и поля в плазме осуществляется системой двойных эмиссионных зондов. Продольное распределение токов в установке регистрируется с помощью датчиков тока. Газовые измерения проводятся с помощью газоразрядных вакууметров.

В докладе будут представлены результаты изучения проводимости плазмы в установке СМОЛА, полученные в последних экспериментальных сериях в режиме удержания и ускорения плазменного потока.

Литература

- [1]. Beklemishev A.D. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // Fusion Science and Technology, V.63, N.1T, May 2013. P.355
- [2]. Sudnikov A.V. et al., 2017, "SMOLA device for helical mirror concept exploration", Fusion Engineering and Design, vol. 122, pp. 86-93.
- [3]. Sudnikov A.V. et al., 2020, "Preliminary experimental scaling of the helical mirror confinement effectiveness", Journal of Plasma Physics.
- [4]. Ivanov I.A. et al., 2021, "Long-pulse plasma source for SMOLA helical mirror", Journal of Plasma Physics.

КОНЦЕПЦИЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛООВОГО ГЕЛИЕВОГО ПУЧКА ДЛЯ Т-15МД

¹Толпегина Ю.И., ¹Горбунов А.В., ²Ялынская Н.Д., ²Тимохин В.М., ²Сергеев В.Ю.,
¹Горшков А.В.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, *Yulia.tolpegina@gmail.com*

²СПБПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.057

Взаимодействие плазмы со стенкой оказывает значительное влияние на условия удержания и достижение высоких параметров плазмы в термоядерных установках, поэтому исследование свойств пристеночной плазмы является актуальной задачей. Для этого на токамаках широко применяется диагностика теплового гелиевого пучка (ТГП), с помощью которой проводят измерения профилей плотности (n_e) и температуры (T_e) электронов в области сепаратрисы и пристеночного слоя, так называемого *scrape-off layer (SOL)* [1, 2]. Диагностика теплового гелиевого пучка была предложена для проведения измерений в пристеночной и диверторной плазме токамака Т-15МД.

В методе ТГП определение n_e и T_e основано на анализе соотношений интенсивностей синглетных и триплетных линий атома гелия при его дополнительной локальной инжекции в интересующую область плазмы. Для того, чтобы оценить применимость диагностики для Т-15МД, были проведены расчёты ожидаемых сигналов в линиях гелия. С этой целью использовалась стационарная столкновительно-излучательная модель (СИМ) атома гелия, которая описывает населённости на 19 нижних состояниях HeI (основное и 18 возбуждённых до $n \leq 4$) и предполагает локальное столкновительно-излучательное равновесие. Поскольку в пристеночной и диверторной плазме токамаков основным механизмом заселения и опустошения населённостей возбуждённых состояний являются соударения со свободными электронами, в СИМ учитываются только процессы спонтанного излучения, возбуждения и ионизации электронным ударом. На основе результатов расчётов выбраны наиболее подходящие линии HeI для определения n_e и T_e в ожидаемом диапазоне параметров SOL и дивертора. Графики соотношений интенсивностей линий сравнивались с аналогичными графиками из других работ [3, 4]. Для отработки метода определения n_e и T_e , был проведен тестовый эксперимент с гелиевой газоразрядной лампой.

Диагностика ТГП может использоваться для измерений n_e и T_e , ожидаемых в районе пристеночной плазмы Т-15МД, с высоким временным (порядка 100 кГц) и пространственным (порядка нескольких мм) разрешением. В дальнейшем планируется разработка динамической СИМ для обработки экспериментальных данных, полученных диагностикой ТГП на токамаке Глобус-М2, и детального моделирования сигналов разрабатываемой диагностики ТГП для токамака Т-15МД.

Литература

- [1]. Griener M. и др. Helium line ratio spectroscopy for high spatiotemporal resolution plasma edge profile measurements at ASDEX Upgrade (invited) // Review of Scientific Instruments. 2018. Т. 89. № 10.
- [2]. Barbui T. и др. The He/Ne beam diagnostic for line-ratio spectroscopy in the island divertor of Wendelstein 7-X // Journal of Instrumentation. 2019. Т. 14. № 7.
- [3]. Muñoz Burgos J. M. и др. Hybrid time dependent/independent solution for the He i line ratio temperature and density diagnostic for a thermal helium beam with applications in the scrape-off layer-edge regions in tokamaks // Phys Plasmas. 2012. Т. 19. № 1.
- [4]. Zholobenko W. и др. Synthetic helium beam diagnostic and underlying atomic data // Nuclear Fusion. 2018. Т. 58. № 12.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ТОКА В ТОКАМАКЕ НА ОСНОВЕ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С УЧЕТОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Зотов И.В., Вертелецкий Н.В.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, факультет ВМК,
г. Москва, Россия, iv-zotov@cs.msu.ru, nikvert322@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.058

В работе рассматривается обратная задача восстановления профиля тока в токамаке с использованием магнитных измерений и дополнительной информации, полученной по различным диагностикам. Известно, что однозначно определить профиль тока в центральной части шнура, основываясь только на магнитных измерениях, затруднительно. Однако, если привлечь дополнительно информацию, такую как распределение электронной температуры, профили плотности, давления, то надежность определения профиля тока из обратной задачи существенно возрастает.

Задача особенно актуальна в связи с подготовкой физического пуска установки токамак Т-15МД в НИЦ "Курчатовский институт". На данной установке предусмотрена обширная система электромагнитной диагностики, включающая в себя более чем 500 датчиков, расположенных в нескольких поперечных сечениях [1-3]. В этот набор входят одно- и двухкомпонентные датчики для измерения магнитного поля и магнитного потока, пояса Роговского для измерения тока плазмы и наведенных токов на элементах конструкции, датчики диамагнитного сигнала и др. Кроме этого присутствует диагностика немагнитного характера - комбинированная диагностика CXRS и MSE, позволяющая получать распределения температуры и плотности $T_i(r), n_i(r)$ с хорошим пространственным и временным разрешением. И хотя указанные распределения сами являются результатом решения соответствующей обратной задачи, появляется возможность использовать эти данные для решения задачи восстановления профиля тока.

Таким образом, можно использовать распределение давления для формулировки постановки и разработки алгоритма решения обратной задачи для профиля тока. Численное решение обратной задачи построено на интегро-дифференциальном подходе. Решение прямой задачи МГД-равновесия основано на дифференциальном методе. Решение обратной задачи базируется на линейном интегральном уравнении Фредгольма первого рода. Поскольку задача нелинейна, применяется итерационный процесс последовательных приближений. Интегральное уравнение решается на основе метода регуляризации Тихонова.

Проведено численное исследование зависимости точности восстановления профиля тока от количества магнитных датчиков, погрешности магнитных измерений, погрешности задания дополнительной информации (профиля давления). По результатам моделирования выработаны рекомендации по качеству подготовки исходных данных и необходимым условиям для их получения в эксперименте на установке Т-15МД.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-07-00391.

Литература

- [1]. Melnikov A.V. et al. Physical program and diagnostics of the T-15 upgrade tokamak (brief overview). - Fusion Engineering and Design, 96-97 (2015), pp.306-310.
- [2]. Зотов И.В., Белов А.Г., Сычугов Д.Ю., Лукаш В.Э., Хайрутдинов Р.Р. Численное моделирование системы электромагнитной диагностики токамака Т-15 // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т.38, вып.2, с.51-61.
- [3]. Андреев В.Ф., Балашов А.Ю., Белов А.М. и др. Моделирование магнитных измерений на токамаке Т-15МД с учетом наведенных токов в вакуумной камере // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т.44, вып.4, с.25-42.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ КОЛЛЕКТИВНОГО ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ

Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г., Хусаинов Т.А.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия, egos@ipfran.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.059

Прогресс в методах удержания высокотемпературной плазмы в современных открытых магнитных ловушках и планирование экспериментов на установках следующего поколения привели к необходимости переноса и адаптации хорошо зарекомендовавших себя методов диагностики тороидальной плазмы для применения в больших открытых системах. В работе [1] предложено использовать регистрацию спектров коллективного рассеяния миллиметрового излучения для диагностики функции распределения энергичных ионов в самой большой работающей открытой магнитной ловушке – установке ГДЛ, функционирующей в ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера. Предложенная система диагностики была создана и получены первые экспериментальные результаты [2].

Предложенная и реализованная схема предполагала рассеяние слаборефрагирующих почти гауссовых пучков 54.7 ГГц излучения обыкновенной поляризации. Это не позволило в полной мере воспользоваться преимуществами перехода к более низкой частоте излучения для получения выигрыша в интенсивности рассеянного сигнала. Кроме того, большие размеры области, из которой принимается рассеянный сигнал, не позволяли анализировать распределение энергичных ионов в поперечном сечении ловушки.

В данной работе обсуждаются альтернативные схемы ввода зондирующего излучения и приема рассеянного излучения, в которых за счет сильной рефракции удастся добиться повышения как интенсивности рассеянного излучения, так и локализации области рассеяния в радиальном направлении.

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

Литература

- [1]. Shalashov A.G. et al. Plasma Phys. Control. Fusion. 2020, 62, 065010.
- [2]. Shalashov A.G. et al. Phys. Plasmas, 2022, 29, 080702.

О СТРУКТУРЕ КВАЗИОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОГО ПУЧКА, ОТРАЖЕННОГО ОТ ОБЛАСТИ О-Х ТРАНСФОРМАЦИИ

Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия, ags@ipfran.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.060

Линейное взаимодействие нормальных волн в магнитоактивной плазме в последнее время активно исследуется в связи с задачами микроволнового нагрева и диагностики плазмы с плотностью выше критической в магнитных ловушках различной конфигурации [1-3]. Естественно, что ключевой задачей исследований было определение эффективности трансформации вводимого в плазму квазиоптического волнового пучка и поиск условий, при которых такая трансформация наиболее эффективна. Однако при численном моделировании было обращено внимание и на интересные свойства отраженного пучка, в частности на формирование при отражении от области О-Х трансформации слабодифрагирующих пучков с провалом интенсивности на оси пучка [4-6].

В данной работе была аналитически исследована структура квазиоптического волнового пучка, отраженного от области О-Х трансформации. Было показано, что при отражении от области трансформации пучок приобретает ненулевой угловой момент и с этим связано формирование вблизи оси отраженного волнового пучка нулевой точки вихря (точки с неопределенной фазой и, как следствие, нулевым значением амплитуды). Обсуждаемый эффект может оказаться полезным для тонкого прицеливания пучка и диагностики магнитного поля в области линейного взаимодействия О и Х волн.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № 0030-2021-0002) и договора с ФТИ им. Иоффе № ОК 44-2-21 от 06/08/2021.

Литература

- [1]. Laqua H. P., Plasma Phys. Control. Fusion., 2007, 49, P.R1
- [2]. Хусаинов Т.А., Шалашов А.Г., Господчиков Е.Д., Физика плазмы. 2018. 44(5), 416
- [3]. Хусаинов Т.А., Господчиков Е.Д., Физика плазмы, 2020, 46(10), 904
- [4]. Köhn A, Cappa Á, Holzhauser E, Castejón F, Fernández Á and Stroth U Plasma Phys. Control. Fusion., 2008, 50, 085018
- [5]. Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Khusainov T.A., and Köhn A. Plasma Phys. Control. Fusion, 2018, 60, 105009
- [6]. Aleynikov P. and Marushchenko N. EPJ Web of Conferences, 2019, 203, 01003

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СДВИГЕ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА И МОЩНОСТИ ЭЦРН ДО 1.5 МВТ В ТОКАМАКЕ T-10

Неудачин С.В., Борщеговский А.А., Пименов И.С.

НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, e-mail: sneudat@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.061

Эксперименты с программируемым линейным по времени сдвигом (до 20% от малого радиуса плазмы a), выполненные в плазме с обратным широм токамака JT-60U, позволили выявить тонкие детали профилей T_e и T_i . В частности, переход от плоского профиля T_e в центральной части шнура к очень крутому внутри ВТБ (до $\text{grad } T_e = 1 \text{ кэВ/см}$) происходит в пределах 3% от a [1]. Этот факт позволил оценить сверху и пространственную ширину приемников 2-й гармоники ЭЦ-излучения. Позднее стало ясно, что это режим без тока в центральной части шнура («current hole») и особым равновесием [2] в центре.

В докладе дополнены результаты T-10 как с быстрым [3] (до 6 см за 60 мс при $a=30$ см) так и медленным сдвигом шнура [4-5]. При ЭЦРН с мощностью 0.4 и 0.8 Мвт и почти поперечном вводе ЭЦ-волн полная пространственная ширина приема детекторов ЭЦ-излучения составляет около 1 см. Плоский профиль T_e в центре указывает на полное перезамыкание магнитных поверхностей при внутренних срывах «по Кадомцеву». Никаких заметных ВТБ около поверхности $q=1$ не обнаружено. В одном случае эксперименты можно трактовать как существование очень узкого ВТБ шириной около 0.5 см и двойным градиентом T_e , который исчезает при росте мощности. В плазме T-10 с вольфрамовым лимитером и $P_{\text{эц}} = 1.5$ Мвт с одновременным ко- и контр-инжекцией ЕС-тока двумя гиротронами, обнаружен новый тип L-H переходов [6-7]. Результаты быстрого сдвига на 3 см (10% малого радиуса) неочевидны в данном случае. Увеличилась пространственная ширина приема детекторов ЭЦ-излучения, видны и признаки улучшения удержания в процессе сдвига, хотя заметных ВТБ нет.

При медленном сдвиге нами показано (см. рис. 30 в [5]), что генерация небольшого ЭЦ-тока именно в зоне шириной 1 см приводит к появлению ВТБ после пилообразных колебаний. При уменьшении ЭЦ-тока по сравнению с [5] ширина зоны сужается до 6 мм, что лишь усиливает нашу спекуляцию [5] о важности генерации во внешней зоне магнитного острова $q=1$, где теоретически [8] предсказаны особенности радиального электрического поля. ВТБ отсутствует при генерации ЭЦ-тока вне данной зоны.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский Институт».

Литература

- [1]. Neudatchin S.V., Takizuka T., Shirai H. et al 1997 24th EPS Conf. on Cont. Fus. and Pl. Phys. Bechtsegaden v2 p. 497
- [2]. T. Takizuka J. Plasma Fusion. Res. 78 (2002) 1282
- [3]. S.V. Neudatchin, D.A. Shelukhin, A.A. Borshegovskii, et al 2014 Proc. 25th Fusion Energy Conference (St. Petersburg, 2014) EX/P1-43
- [4]. Kislov D.A. et al, 2007 Nucl. Fusion 47 S303
- [5]. V.A. Vershkov, D.V. Sarychev, G.E. Notkin et al Nuclear Fusion 57 (2017) 102017
- [6]. A. Borshegovskiy, S. Neudatchin, I. Pimenov et al, 2019 EPJ Web of Conf. 203, 02004
- [7]. S.V. Neudatchin, A.A. Borshegovskiy, I.S. Pimenov, I.A. Zemtsov 2020 Proc. 28-th Fusion Energy Conference (virtual Conf. 2021) EX/P4-26
- [8]. Кавеева Е.Г., Рожанский Е.А. 2004 Письма в ЖТФ т. 30 вып. 13 272

СРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В ПЛАЗМЕ С ЭЦ-НАГРЕВОМ НА СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М И ТОКАМАКЕ Т-10

¹Днестровский Ю.Н., ¹Мельников А.В., ¹Лысенко С.Е., ²Мещеряков А.И., ^{1,2}Харчев Н.К.,
²Гребенщиков С.Е., ²Вафин И.Ю., ²Васильков Д.Г., ¹Черкасов С.В., ¹Елисеев Л.Г.,
³Сычугов Д.Ю.

¹НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия, Dnestrovskiy_YN@nrcki.ru

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия, meshch@fpl.gpi.ru

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, sychugov@cs.msu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.062

Нагрев плазмы в стеллараторе Л-2М и токамаке Т-10 производится на второй электронно-циклотронной (ЭЦ) гармонике. Концепция эквивалентных разрядов токамака и стелларатора, имеющих одинаковые температуры электронов и ионов, введенная в [1] при одной и той же полностью поглощенной ЭЦ-мощности, расширена в [2] на случай как полного, так и частичного поглощения ЭЦ-мощности. В настоящей работе рассмотрены примеры эквивалентных экспериментальных разрядов стелларатора Л-2М и модельных разрядов токамака Т-10. Особенностью Л-2М является малое вращательное преобразование ι на границе плазмы ($\iota(a) = 0.8$), в то время как на W-7X, $\iota(a) = 1.2$, а на ТЖ-II $\iota(a) = 1.56$ [1, 2]. Поэтому значения параметра $q(a)$, определенные по формуле $q(a) = 2\pi / \iota(a)$ [1], довольно велики, $q(a) \sim 8 - 10$. Еще одной особенностью Л-2М является малый объем плазмы по сравнению с ТЖ-II. В результате при небольшой плотности плазмы удельная мощность на один электрон оказывается слишком высокой, и функция распределения электронов искажается. Появляются надтепловые электроны, и понятие температуры теряет смысл. Области появления надтепловых электронов на плоскости (\bar{n} [10^{19} м^{-3}], Q_{EC} [МВт]) приблизительно отделяются от областей с максвелловским распределением электронов наклонной прямой, описываемой уравнением $Q_{\text{EC}} = 0.2 \cdot \bar{n}$, где Q_{EC} – введенная мощность, \bar{n} – среднехордовая плотность плазмы (Рис. 1). В области (А) поглощение ЭЦ-волн частичное; в области (В) – полное; в области (С) появляются надтепловые электроны; в области (D) ЭЦ-волны подвергаются сильной рефракции. Граница раздела подобластей с полным и частичным поглощением определяется соотношением $n = n_{cr}$, где $n_{cr} = 1.2 \cdot B$, B – магнитное поле [Тл]. Для серии импульсов Л-2М определены значения поглощенной мощности и энергетическое время жизни. Показано, что температура электронов и поглощенная мощность Q_{ab} в эквивалентных разрядах совпадают. На Рис. 2 показана эффективность нагрева $\eta = Q_{ab}/Q_{\text{EC}}$ в зависимости от плотности плазмы для серии импульсов Л-2М.

Работа поддержана грантом РФФИ № 20-07-00-991.

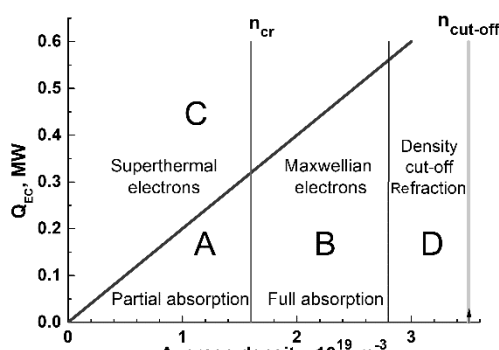


Рис. 1.

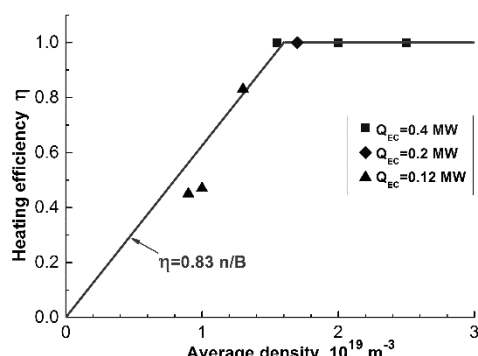


Рис. 2.

Литература

- [1]. Dnestrovskij Yu.N. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion **63** (2021) 055012
- [2]. Днестровский Ю.Н. и др. // XLIX Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, ICRAF-2022. Сборник тезисов докладов, с. 61.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ТРИТИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК В РФ

¹Ананьев С.С., ¹Иванов Б.В., ^{1,2}Кутеев Б.В., ³Юхимчук А.А.

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, Ananyev_SS@nrcki.ru

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

³РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.063

Одной из важнейших систем, необходимых для обеспечения работы термоядерного реактора с тритием является комплекс систем тритиевого топливного цикла (далее – ТЦ). Начиная с 2007 года в НИЦ «Курчатовский институт» выполняются работы по выбору и обоснованию характеристик, а также проектирование систем ТЦ. За это время выработаны подходы и разработаны программные продукты для определения параметров ТЦ в зависимости от параметров термоядерной установки (ТЯР), для которой он предназначен. Комплекс ТЦ необходим для обеспечения работы любой термоядерной или гибридной установки, использующей тритий в любом, даже самом минимальном количестве, так как необходимо организовать оборот топливной смеси с выделением трития и очисткой от продуктов реакции синтеза.

В России исторически хорошо развиты технологии обращения с тритием, однако они в первую очередь ориентированы на двойное применение. Поэтому создание систем ТЦ в России возможно, но требует кооперации и координации работы десятка различных институтов – ведущих организаций в своих областях.

Для создания действующей системы ТЦ в составе токамака необходимо пройти несколько этапов:

1. Создание комплекса лабораторных стендов для проведения исследований и улучшения отдельных систем топливного цикла (системы на новых физических принципах с улучшенными характеристиками). Создание таких стендов необязательно, но крайне желательно для подготовки научного персонала и улучшения характеристик системы в целом.

2. Создание безтритиевого протий-дейтериевого топливного цикла ТЯР, тестирование и ресурсные испытания всех систем топливного цикла в ходе совместной работы. Эта система может быть создана на любой площадке, близость к токамаку не нужна.

3. Создание тритиевого топливного цикла. Эта система может быть создана на любой площадке, где есть разрешение и опыт работы с большим количеством трития.

4. Создание системы тритиевого топливного цикла на токамаке (на том токамаке, который Родина решит строить первым).

Реализация сразу 4 этапа без реализации 2 и 3 этапов несёт существенные риски, связанный с тем, что комплекс топливного цикла, создаваемый сразу в составе термоядерной установке без предварительной отработки систем и проведения ресурсных испытаний, может оказаться неработоспособным или его запуск потребует неоправданно длительное время.

Стоит отметить, что НИЦ «Курчатовский институт» может быть научным руководителем и координатором создания системы замкнутого термоядерного ТЦ, поскольку имеет большой задел по проектированию схем топливного цикла термоядерных установок.

Описанию этапов дорожной карты развития технологий ТЦ для токамаков, а также путей реализации посвящен данный доклад.

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт».

РАСЧЕТЫ СОГЛАСОВАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ДЕМО-ТИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОННЫХ УРАВНЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИТИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

¹Ананьев С.С., ¹Нургалиев М.Р., ²Кукушкин А.С.

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, Ananyev_SS@nrcki.ru

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.064

В докладе описывается развитие подхода к моделированию потоков частиц в системах тритиевого топливного цикла (ТЦ) термоядерного источника нейтронов на базе токамака [1] согласованно с основной и диверторной плазмой. Используется не прямое объединение кодов ASTRA, SOLPS4.3 и FC-FNS [2]. Реализуется обратная связь между системами откачки и инжекции в виде изменения изотопного состава основной и диверторной (пристеночной) плазмы. В коде ASTRA вместо электронов в уравнениях переноса частиц используются ионы. Это позволяет более корректно оценивать парциальные времена удержания ионов в плазме от разных источников (нейтральная инжекция, пеллеты, газовая инжекция, рециклинг). В диапазоне параметров удержания $\tau_p/\tau_E = 0.75-2.5$ рассчитаны парциальные времена удержания частиц от различных источников – пучков быстрых атомов, пеллет и нейтралов через сепаратрису. С их использованием найдены потоки компонентов D/T топлива, которые должны обеспечиваться системами инжекции и обработки газа. Потоки частиц в плазму от пеллет для обеспечения заданной плотности плазмы составляют до 10^{22} частиц/с. Увеличение потока топлива для компенсации потерь частиц в ELM [3] происходит от 2 до 3 раз в зависимости от значения α_{ELM} , что меньше чем было оценено ранее. Проанализирована величина газонапуска с учетом вероятного выделения газа со стенок вакуумной камеры [4]. Показаны ограничения, обусловленные выбранными инженерными решениями. В большей части рабочего диапазона необходимо применять дополнительную стимуляцию ELM (пеллетами ~ 1 мм с LFS) для поддержания контролируемых потерь энергии $\delta W_{ELM} \sim 0.5$ МДж. Для стартовой загрузки ТЦ и стационарной работы установки потребуется около 500 г трития с учетом потерь за счет радиоактивного распада. Запасы трития на площадке установки (без учета долговременного хранилища) для сценария конвективных ELM возрастут до 600 г.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (грант № 18-72-10162).

Литература

- [1]. Kuteev V.V., Shpanskiy Yu.S., and DEMO-FNS project team, *Nucl. Fusion*, 59, 076014 (2019); <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab14a8>.
- [2]. Ананьев С.С., Днестровский А.Ю., Кукушкин А.С., Совместное моделирование топливных потоков в плазме и в системах инжекции и откачки ДЕМО-ТИН, *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2020, т. 43, вып. 4, doi:10.21517/0202-3822-2020-43-4-96-109
- [3]. Ананьев С.С., Днестровский А.Ю., Кукушкин А.С., Потоки в системах топливного цикла ДЕМО-ТИН с учетом D- и T-пеллет инжекции, *Физика плазмы*, 2022, том 48, № 3, с. 195–211, 10.31857/S0367292122030015
- [4]. Кукушкин А.С., Роль водородного обмена плазмы с материальными поверхностями в термоядерном реакторе, *Сборник докладов 11 международной школы молодых ученых и специалистов IHISM 16 Junior* под ред. А.А.Юхимчука, Саров: «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017.

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОДОРОДНОГО НАСОСА В ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ ТЯР

Иванов Б.В., Иванова Н.А., Меншарапов Р.М., Синяков М.В., Шкандыбина В.В.,
Ананьев С.С., Фатеев В.Н.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: kapjicohh@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.065

Одной из важнейших систем термоядерных установок является топливный цикл (ТЦ), который представляет собой совокупность подсистем, направленных на подготовку топлива (изотопы водорода), инъекцию топлива в плазму и последующую переработку и очистку топлива, извлеченного из камеры токамака; примером таких систем могут служить ТЦ ЖЕТ [1], ИТЭР [2], CFETR [3] и ДЕМО-ТИН [4].

Электрохимический водородный насос (ЭВН) является новой, активно развивающейся технологией, которая, несмотря на широкую область применения, высокий КПД, возможность очищать и компримировать водород в одну стадию, в настоящее время применяется только в ограниченной сфере [5]. В первую очередь ЭВН интересен для водородной энергетики. Другой возможной областью применения ЭВН является термоядерная энергетика, а состав разделяемых газовых смесей в ТЦ термоядерных установок во многом похож на газовые смеси, образующиеся при производстве и использовании водорода [5].

ЭВН может быть применен в различных частях ТЦ для выделения, очистки или компримирования водорода, а также в аналитических целях для концентрирования малых количеств водорода. В настоящее время для разделения водородсодержащих смесей в ТЦ термоядерных установок, кроме ЭВН, рассматриваются: мембранные реакторы на основе палладий-серебряного сплава, криоадсорбционные колонны, адсорбционные колонны на основе гидридообразующих материалов. Наиболее разработанным является метод разделения в мембранных реакторах, который позволяет получить высокочистый водород в одну стадию и устойчив к радиационному воздействию трития. Однако он требует значительного перепада давления с разных сторон мембраны для осуществления процесса разделения с заметной скоростью, что, во-первых, приводит к необходимости в дополнительном оборудовании (компрессоры и вакуумные насосы) и, во-вторых, к увеличению количества дорогостоящего и радиационно-опасного трития в системе.

В работе будет рассмотрено использование устройств на основе электрохимического водородного насоса различных типов в следующих системах ТЦ:

- откачка токамака;
- выделение водорода из «выхлопных» газов;
- выделение трития из водородсодержащих соединений (H_2O , CH_4 и др.);
- выделение водорода из «бланкетного газа».

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22–29–01367

Литература

- [1]. R. Lässer et al., Fusion Eng. Des., vol. 47, no. 2–3, pp. 173–203, 1999.
- [2]. M. Glugla et al., Fusion Eng. Des., vol. 82, no. 5–14, pp. 472–487, Oct. 2007.
- [3]. X. Wang et al., J. Fusion Energy, vol. 38, no. 1, pp. 125–137, Feb. 2019.
- [4]. S.S. Ananyev et al., Fusion Eng. Des., vol. 161, no. December 2019, p. 111940, 2020.
- [5]. L. Vermaak et al, Membranes (Basel), vol. 11, no. 2, pp. 1–32, 2021

СРАВНЕНИЕ ЗАХВАТА ЛИТИЯ ЛИТИЕВЫМИ КОЛЛЕКТОРАМИ РАЗЛИЧНОГО ИСПОЛНЕНИЯ В РАМКАХ МОДЕЛИ ЗАМКНУТОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ЛИТИЯ НА ТОКАМАКЕ Т-11М

¹Щербак А.Н., ¹Мирнов С.В., ¹Лазарев В.Б., ¹Джигайло Н.Т., ¹Васина Я.А.,
¹Пришвицын А.С., ¹Лешов Н.В., ¹Джурик А.С., ¹Отрощенко В.Г., ¹Антонов П.А.,
¹Зорин А.В., ²Вертков А.В., ²Жарков М.Ю

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия, shcherbak@triniti.ru

²АО «Красная Звезда», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.066

Как показали эксперименты, проведенные на отечественных и зарубежных токамаках, использование лития в качестве возможного материала компонентов, контактирующих с плазмой, в будущих энергетических термоядерных реакторах является перспективным решением проблемы защиты первой стенки токамака и проблемы чистоты плазмы [1]. Кроме того, использование лития в варианте его замкнутого контура циркуляции могло бы решить проблему накопления продуктов эрозии первой стенки стационарного реактора УТС [2].

За годы работы над литиевой концепцией было исследовано много различных вариантов литиевых лимитеров в рамках модели «эмиттер-коллектор». В качестве эмиттеров лития использовались горизонтальный литиевый лимитер на основе капиллярно-пористых систем (КПС), литиевый лимитер продольного исполнения на основе КПС и вертикальный литиевый лимитер на основе КПС, в том числе и квазистационарного типа, позволяющий осуществлять внешнюю подпитку в перерывах между разрядными импульсами. При этом сбор лития и удаление ранее инжектированного осуществлялось кольцевым коллектором, коллектором поперечного исполнения и продольным литиевым лимитером как «гладким», так и на основе КПС.

В рамках работы обобщены результаты исследований совместного использования различных эмиттеров и коллекторов на токамаке Т-11М, исследованных ранее, а также приводятся результаты сравнения эффективности сбора лития при таких комбинациях.

Показано, что максимальный захват лития составил около 250 мкг/разряд при использовании коллекторной мишени совместно с вертикальным литиевым лимитером в случае заливки мишени жидким азотом. При этом также было показано, что охлаждение коллектора жидким азотом не является обязательным для эффективного сбора лития. Введение дополнительного коллектора (продольный лимитер на основе КПС) приводило к снижению сбора лития примерно в 2 раза. Захват лития пористой поверхностью, образованной набором проволочных сеток, выше всего лишь в 2 раза по отношению к «гладкой». То есть удаляемый «гладкий» коллектор имел эффективность сбора лития около 50% по отношению к падающему на него литию.

Кроме того, в работе представлены новые результаты по сбору лития в зависимости от различных параметров плазмы в рамках модели: вертикальный эмиттер и мишень-коллектор. Исследования сбора лития убираемым коллектором показали зависимость от положения эмиттера лития. Было показано, что при уменьшении радиуса плазменного шнура за счет введения вглубь камеры токамака лимитера сбор лития увеличивался в 1,5 раза.

Литература

- [1]. И.Е. Люблинский, "Литий в энергетическом термоядерном реакторе", ВАНТ Сер. Термоядерный синтез, 2006, вып. 3, с. 3-26
- [2]. S. Mirnov et al, "Experiments at the T-11M device in support of the tokamak concept with closed Li cycle", Fusion Engineering and Design, 2010, Vol. 85, I. 6, 919-923

ПУЧОК УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИВОДИТ К ПОЯВЛЕНИЮ CHIRPING-НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ

¹Балаченков И.М., ¹Бахарев Н.Н., ¹Гусев В.К., ¹Ильясова М.В., ²Коньков А.Е.,
²Коренев П.С., ¹Минаев В.Б., ¹Патров М.И., ¹Петров Ю.В., ¹Сахаров Н.В., ¹Скрекель
О.М., ¹Хилькевич Е.М., ¹Шевелев А.Е.

¹ФТИ им. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, balachenkov@mail.ioffe.ru

²МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.067

Два различных типа МГД-неустойчивостей с быстро меняющейся частотой были обнаружены в сферическом токамаке Глобус-М2 [1] в существенно отличающихся частотных диапазонах. Первый тип [2] возникает в омических разрядах при относительно низкой концентрации $\langle n_e \rangle < 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в широком диапазоне магнитных полей и токов по плазме на частоте порядка 1 МГц. Этот тип неустойчивости был идентифицирован как компрессионные альфвеновские волны, возбуждаемые электронами во время пилообразного срыва, динамика частоты которых находится в соответствии с предсказанием т.н. hole-clump модели [3]. Еще один тип неустойчивостей возникает в особом режиме работы токамака без реверса тока центрального соленоида. Эта неустойчивость возникает во время распада плазменного шнура при экстремально низких плотностях $\langle n_e \rangle < 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и токах по плазме $I_p < 20 \text{ кА}$, и фактически является неустойчивостью пучка убегающих электронов. Эти моды регистрировались во всем наблюдаемом частотном диапазоне, из которого можно выделить несколько (два или три) основных поддиапазона: приблизительно 0 – 30 МГц, 60 – 120 МГц и, в некоторых разрядах, 30 – 60 МГц. Также наблюдалось пересечение этих диапазонов. Изменение частоты в отдельных всплесках оказалось более быстрым, чем для альфвеновских мод в диапазоне 1 МГц и происходит в соответствии с экспоненциальным законом. Восстановление [4] спектра убегающих электронов на основе данных удаленного от токамака спектрометра жесткого рентгеновского излучения [5] показало, что наблюдаемая неустойчивость может существенно модифицировать функцию распределения убегающих электронов. В этой работе, по всей видимости, приводится первое наблюдение chirping неустойчивости, вызванной электронами на сферическом токамаке.

Измерения основных параметров плазмы были проведены на уникальной научной установке "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав Федерального центра коллективного пользования "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" в рамках государственного задания по проекту №0040-2019-0023 в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Литература

- [1]. V.B. Minaev et al., Nucl. Fusion **57** 066047 (2017)
- [2]. I.M. Balachenkov et al, Tech. Phys. Lett. **47** 583–588 (2021)
- [3]. H.L. Berk, B.N. Breizman et al., Phys. Rev. Lett. **68** 3563 (1992)
- [4]. E.M. Khilkevitch et al, Tech. Phys. Lett. **39** 63–67 (2013)
- [5]. M.V. Iiasova et al, Nucl. Instr. and Methods in Phys. Research Section A **983** 164590 (2020)

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ВВОДУ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ ГИРОТРОНА В ВАКУУМНУЮ КАМЕРУ ТОКАМАКА Т-15МД

Пименов И.С., Борщеговский А.А., Новиков В.Н., Павлов В.Н., Рой И.Н.,
Шапотковский Н.В.

НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, pimenowigor@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.068

В настоящий момент проводится завершающая стадия работ для первых экспериментов с круглой плазмой на токамаке Т-15МД. На первом этапе будет применяться гиротрон с рабочей частотой 82,6 ГГц и выходной мощностью около 1 МВт [1]. На данный момент в одном из экваториальных патрубков Т-15МД установлена фокусирующая система ввода СВЧ-излучения [2], которая может быть использована как для предыонизации рабочего газа, так и для нагрева плазмы [3,4]. Плотность СВЧ-мощности в поперечном сечении сфокусированного пучка составляет 250 кВт/см². СВЧ-предыонизация будет происходить на второй гармонике необыкновенной волны.

После монтажа системы СВЧ-ввода была произведена сборка вакуумированного волноводного тракта, общая длина которого 37 м. В конце линии передачи между Т-15МД и волноводным трактом установлена диэлектрическая развязка. Для предотвращения механических нагрузок на оконечный участок СВЧ-тракта связь между волноводом и токамаком осуществляется посредством сильфона. Волноводный тракт оснащён двумя вакуумными постами, расположенными на расстоянии, исключающем влияние рассеянных магнитных полей токамака. На основании результатов предварительных испытаний смонтированного волноводного тракта были установлены дополнительные опоры в области компенсаторов линейного теплового расширения и волноводных откачных портов, уменьшающие потери передаваемой СВЧ-мощности.

Результаты, полученные в ходе проводимых испытаний, войдут в доклад.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

Литература

- [1]. Г.Г. Денисов, В.И. Малыгин, А.И. Цветков и др., Известия вузов. Радиофизика, том LXIII, №5-6, стр. 369
- [2]. И.С. Пименов, В.И. Белоусов, А.А. Борщеговский, М.Ю. Жарков, С.В. Неудачин, И.Н. Рой, Э.Н. Хайрутдинов, Л.Г. Попов, М.В. Агапова, Л.М. Бельнова, «Система ввода СВЧ-излучения гиротронного комплекса токамака Т-15МД на первой стадии работ», Прикладная физика, 2022, № 1, стр. 5-11.
- [3]. N.A. Kirneva et al., *34th EPS Conference on Plasma Phys. Warsaw, 2 - 6 July 2007 ECA Vol.31F, P-1.164 (2007)*
- [4]. A. Borshchegovskiy, M. Dremin, V. Il'in, N. Kirneva et al., EPJ Web of Conferences **32**, 02004 (2012)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ПЛАЗМЫ НА ЦЕНТРАЛЬНУЮ ЭЛЕКТРОННУЮ ТЕМПЕРАТУРУ НА ТОКАМАКЕ ТУМАН-3М

¹Абдуллина Г.И., ¹Аскинази Л.Г., ¹Белокуров А.А., ¹Жубр Н.А., ¹Корнев В.А.,
¹Крикунов С.В., ¹Лебедев С.В., ^{1,2}Литвинова Д.И., ¹Мельник А.Д., ¹Разуменко Д.В.,
¹Смирнов А.И., ¹Тукачинский А.С., ¹Чернышев Ф.В.

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: Abdullina@mail.ioffe.ru

²ФГАОУ ВО "СПбПУ", г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: litvinova.di@edu.spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.069

Проведен анализ базы данных водородных и дейтериевых разрядов токамака ТУМАН-3М (круглое сечение, большой и малый радиусы плазмы соответственно: $R_{pl} = 53$ см и $a_{pl} = 22$ см, ток плазмы $I_{pl} = 126 - 152$ кА, тороидальное магнитное поле $B_T = 0.8 - 1$ Тл, центральная среднехордовая электронная концентрация $\bar{n}_e = (1.5 - 3.6) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) за 2019 - 2022 годы. Исследовались омические разряды с низким уровнем жесткого рентгеновского излучения, в которых сведения об электронной температуре были получены на основе анализа мягкого рентгеновского излучения методом фольг. Предварительный анализ на основе 60 разрядов показал, что центральная электронная температура $T_e(0)$ в водородной плазме выше, чем в дейтериевой.

Данное наблюдение противоречит многочисленным экспериментальным исследованиям изотопного эффекта в токамаках, когда с увеличением массы изотопа улучшается удержание в омическом режиме [1,2] и в режимах с дополнительным нагревом [3].

Для более детального исследования изотопного эффекта было решено выбрать пару разрядов из данной базы данных. Влияние изотопного состава плазмы на время удержания энергии исследовалось с помощью транспортного кода АСТРА. Для моделирования были выбраны водородный #19040902 и дейтериевый #20101909 разряды со сходными сценариями разрядов и основными параметрами плазмы. Эти разряды имели следующие параметры в момент времени $t = 47$ мс: $I_{pl} = 152$ кА, напряжение на обходе $U_{loop} = (2.5 - 3)$ В, $B_T = 0.9$ Тл, $\bar{n}_e = 1.8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. При этом $T_e(0)$ отличается существенно: $T_e(0) = 600$ эВ – в водородном разряде и $T_e(0) = 450$ эВ – в дейтериевом разряде. Профили электронной концентрации были получены по данным СВЧ-интерферометра (длина волны 2 мм) с 10 вертикальными каналами. Ионная температура T_i определялась по данным диагностики, основанной на анализе энергетического спектра потоков атомов перезарядки. В рассматриваемых разрядах величина T_i составила ~ 260 эВ вне зависимости от изотопного состава плазмы.

В докладе обсуждаются первые результаты, полученные на основе предварительного анализа базы данных омических разрядов токамака ТУМАН-3М, а также представлены результаты моделирования.

Работа выполнена при поддержке государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2019-0023 (функционирование токамака ТУМАН-3М и его диагностик), исследования изотопного эффекта в удержании осуществлялись при поддержке ФП-3 КП РТТН (государственное задание 0034-2021-0001).

Литература

- [1]. Delabie E., Nave M.M.F., Baruzzo M. et al. 44th EPS Conf. on Plasma Physics. Preliminary interpretation of the isotope effect on energy confinement in Ohmic discharges in JET-ILW (European Physical Society) Geneva. 2017. p 4.159.
- [2]. Kuprienko D.V., Altukhov A.B., Gurchenko A.D. et al. Plasma Phys. Rep. 2019. V.45. p.1128.
- [3]. ITER Physics Expert Group on Confinement and Transport et al. Nucl. Fusion. 1999. V.39 p. 2186.

ГЕНЕРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ В ПЛАЗМЕ ТЕРМОЯДЕРНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ АТОМОВ

Длугач Е.Д., Шленский М.Н.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, edlougach@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.070

Пучково-плазменный термоядерный синтез является основным источником нейтронов в плазме термоядерных источников нейтронов (ТИН) из-за высокого вклада реакций с участием ионов высокой энергии в общий выход нейтронов синтеза из плазмы токамака. Величина этого вклада зависит от относительной доли горячих ионов («надтепловых хвостов») в энергетической функции распределения ионов.

Код NESTOR, созданный в НИЦ КИ в 2021, позволяет рассчитать распределение интенсивности реакций синтеза в объеме плазмы токамака с учетом мощного источника быстрых ионов, создаваемого при инжекции нейтральных пучков в токамак. Нейтральный пучок в коде NESTOR представляет собой набор лучей (до 10^9), который детально воспроизводит пространственно-угловое распределение пучка на выходе из инжектора. Ионизация атомов (лучей) пучка и вероятность выгорания ионов рассчитывается аналитическими методами, что позволяет оперативно получать фазовые распределения ионов в замагниченной плазме, практически без ограничений на форму магнитных поверхностей.

В данной работе рассмотрено влияние геометрии тороидальной плазмы, ее компонентного состава и кинетических профилей на генерацию нейтронов синтеза с участием быстрых ионов. Анализируется вклад пучкового компонента в общий выход нейтронов из плазмы ТИН. Приводятся оценки потерь быстрых ионов и связанного с ними снижения нейтронного выхода. Показаны основные результаты применения кода NESTOR в нейтронно-физических моделях гибридной реакторной установки ДЕМО-ТИН.

Работа проведена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия.

Литература

- [1]. Shpanskiy Yu.S. and DEMO-FNS Team. Progress in the design of the DEMO-FNS hybrid facility // Nucl. Fusion. 2019. Т. 59. № 7. С. 076014.
- [2]. Длугач Е.Д., Шленский М.Н., Программа для расчета объемного источника термоядерных нейтронов в плазме ТИН «NES-TOR». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610362, Реестр программ для ЭВМ, 11.01.2022
- [3]. Wesson J., *Tokamaks*, 4th Edition, Oxford: Oxford University Press, 2011
- [4]. Длугач Е.Д., Кутеев Б.В., О влиянии параметров нейтральной инжекции на генерацию неиндукционного тока и выход нейтронов в компактном токамаке, Физика Плазмы, 2022, том 48, № 10, с.881–889 DOI: 10.31857/S0367292122600558

ОБРАБОТКА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПО ТЕПЛОВЫМ НАГРУЗКАМ В СИСТЕМЕ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Кичик М.Г., Длугач Е.Д.

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, kichik.mg@phystech.edu

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.071

Код VTR (*Beam Transmission with Re-ionization*) [1,2] используется для проектирования и анализа систем нейтральной инжекции (NBI). В частности, он активно использовался при разработке конструкции нагревных и диагностических инжекторов ИТЭР [3-5]. Основное назначение VTR кода - моделирование эволюции пучка путем трассировки большого числа (миллиарды) частиц от ионного источника до входа в токамак. Благодаря высокой производительности и интерактивному интерфейсу, VTR подобен симулятору реальной установки и может применяться в учебных целях. VTR активно используется также для верификации других инжекционных кодов. Возможности и объем входных/выходных данных, включая уровень детализации геометрии, статистику частиц, разрешение профилей выделенной мощности, гибко адаптируются к различным задачам проектирования систем инжекции.

Поскольку спектр применения VTR кода включает получение карт тепловой нагрузки на элементах инжектора и анализ вклада отдельных составляющих пучка, его можно использовать для генерации синтетических данных, в целях анализа и классификации нагрузок в системах диагностики и управления пучком. Синтетические тепловые карты нагрузки в инжекторе могут использоваться также для восстановления параметров пучка и режимов работы инжектора.

В данной работе решается задача классификации карт тепловых нагрузок в инжекторе с помощью средств машинного обучения Python [6,7]. Реализован алгоритм машинного обучения, который включает следующие основные этапы: 1) генерация данных VTR кодом в виде 2-мерных массивов нагрузки; 2) разметка данных (классификация типа нагрузки); 3) подготовка данных для обучения (фильтрация, стандартизация, нормировка); 4) выбор функции потерь и критерия качества; 5) обучение нейронной модели (NN) на основном наборе данных; 6) оценка качества обучения модели на контрольном наборе данных. Приводится сравнительный анализ производительности и качества обучения для различных типов и архитектур NN. Исследованы основные способы борьбы с переобучением.

При обучении линейной модели (LNN) достигнута точность предсказаний классификатора 79%, при использовании архитектуры CNN (сверточная нейронная сеть) точность предсказаний достигает 86%. Дальнейшее совершенствование алгоритмов обучения и оптимизация архитектуры модели позволит использовать созданную систему обработки экспериментальных данных для отслеживания фокусировки ионного пучка и условий его транспортировки. Это позволит оперативно корректировать параметры источника для повышения эффективности инжектора и всей термоядерной установки.

Работа проведена при поддержке НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия.

Литература

- [1]. E. Dlugach, VTR code for neutral beam design. <https://sites.google.com/view/btr-code/home>
- [2]. E.D. Dlugach VTR code for NBI design and study. VANT, Fusion series, 2021, v.44, No.1, pp. 68–79
- [3]. R.S. Hemsworth et al 2017 New J. Phys. 19 025005, /doi.org/10.1088/1367-2630/19/2/025005
- [4]. G. Serianni et al 2017 New J. Phys. 19 045003 doi.org/10.1088/1367-2630/aa64bd
- [5]. D. Palma et al. Fusion Eng. Des. 2021, 171, 112559.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112559
- [6]. A.C. Müller, S Guido, Introduction to Machine Learning with Python, O'Reilly Media, Inc., 2016, ISBN: 9781449369415
- [7]. I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, Deep Learning, MIT Press, 2016

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕОКЛАССИЧЕСКОЙ ТИРИНГ-МОДЫ МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ВО ВРЕМЯ СРЫВА ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

^{1,2}Яшин А.Ю., ²Балаченков И.М., ²Жильцов Н.С., ²Курские Г.С., ^{1,2}Киселев Е.О.,
²Минаев В.Б., ¹Петров А.В., ²Петров Ю.В., ¹Пономаренко А.М., ²Сахаров Н.В.

¹ФГАОУ ВО «СПБПУ», г. Санкт-Петербург, Россия

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.072

На сферическом токамаке Глобус-М/М2 наблюдались магнитогидродинамические (МГД) моды, которые значительно влияют на плазменный разряд (см., например, [1]). В частности, МГД моды могли приводить к ухудшению удержания плазмы, например, к выходу из Н-моды обратно в L-моду, или даже к срывам разряда. Одним из наиболее опасных МГД возмущений является неоклассическая тиринг-мода (НТМ), которая приводит к формированию магнитных островов в плазме и, тем самым, накладывает ограничения на параметры плазмы, в частности на ее давление. Ключевыми параметрами, определяющими влияние острова на удержание, являются ширина и частота вращения образующихся островов [2].

В ранних экспериментах на Глобус-М2 было продемонстрировано, что метод доплеровского обратного рассеяния (ДОР) может быть использован для детектирования и изучения НТМ [3]. В частности, данная диагностика может быть успешно использована для определения их ширины и локализации. На сферическом токамаке Глобус-М2 с целью изучения НТМ, значительно влияющих на характеристики плазмы, был применён метод ДОР совместно с массивами магнитных зондов. Одновременно было использовано три многочастотные системы ДОР с частотами зондирования от 18 до 26 ГГц, от 20 до 48 ГГц и от 50 до 75 ГГц [4-5]. Применение таких систем позволило одновременно проводить измерения от половины малого радиуса плазмы до сепаратрисы ($\rho = 0.5 - 1.1$). Кроме детектирования самих тиринг-мод, метод ДОР использовался для наблюдения ухудшения удержания плазмы или выхода из Н-моды по поведению турбулентности.

В данной работе продемонстрированы результаты исследования НТМ, приводящих к выходу из Н-моды или срыву, на токамаке Глобус-М2. Представлены результаты анализа данных мониторинговых диагностик с целью выявления характерных особенностей плазменного разряда во время развития таких НТМ. Были получены их характеристики, такие как их модовые числа, а также частота. Кроме того, с помощью диагностики ДОР была выявлена область их локализации. Было проведено сравнение полученных параметров МГД мод, чтобы выявить отличия между НТМ, приводящих к выходу из Н-моды и НТМ, приводящих к срыву плазменного разряда. Был проведен сравнительный анализ влияния различных параметров плазмы на развитие разных типов тиринг мод.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-72-10028, с использованием Федерального центра коллективного пользования "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" ФТИ им. А.Ф. Иоффе, включающего Уникальную научную установку "Сферический токамак Глобус-М".

Литература

- [1]. Kurskiv G.S. et al 2011 Tech. Phys. Lett. **37** 1127–1131
- [2]. Waelbroeck F.L. 2009 Nucl. Fusion **49** 104025
- [3]. Yashin A.Yu. et al «The study of neoclassical tearing modes using Doppler backscattering in the Globus-M2 tokamak» 49th ICPCPF, March 14 – 18, 2022, Zvenigorod
- [4]. Bulanin V.V. et al 2021 Rev. Sci. Instrum. **92** 033539
- [5]. Yashin A.Y. et al 2022 JINST **17** C01023

РАСЧЕТ СИНТЕТИЧЕСКОГО СИГНАЛА АНАЛИЗАТОРА НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ КОДА FIDASIM В СФЕРИЧЕСКИХ ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М/М2

Киселев Е.О., Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Курские Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Токарев В.А., Тюхменева Е.А., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Щеголев П.Б.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.073

Инжекция нейтральных частиц – важная часть будущего термоядерного источника нейтронов, которая позволяет плазме нагреться до высоких температур, невозможных при чисто омическом нагреве. При этом быстрые частицы, возникающие при дополнительном нагреве, могут инициировать неустойчивости, вызывающие высокие потери мощности дополнительного нагрева. По этой причине остро встает вопрос о валидации моделирования поведения быстрых частиц, используемом для определения поглощенной мощности нагрева при анализе переноса тепла. При наличии неустойчивостей расчет с классическим удержанием дает завышенные значения поглощенной мощности. Для учета влияния неустойчивостей на удержание быстрых частиц в уравнение, описывающее замедление ионов, может быть введен дополнительный коэффициент аномальной диффузии. В этом случае валидация расчетов может осуществляться через сравнение измерений анализатора атомов перезарядки (NPA) и синтетического сигнала, получаемого с помощью кодов FIDASIM [1] и NUBEAM [2].

Моделирование замедления быстрых частиц осуществляется с помощью Монте-Карло кода NUBEAM, работающего в приближении ведущих центров с поправкой на конечность ларморовского радиуса. В токамаке Глобус-М/М2 потери быстрых частиц велики в основном за счет потерь на первой орбите из-за относительно малой величины магнитного поля и расстояния между плазмой и стенкой. Большой вклад в потери также оказывает перезарядка быстрых частиц на нейтральных атомах.

Для получения синтетического сигнала анализатора атомов перезарядки используется код FIDASIM. Первый этап моделирования – расчет плотности нейтральных частиц, поступающих из инжектора, а также расчет атомов гало. Второй этап – вычисление потока на анализатор методом Монте-Карло. На основе заданной из NUBEAM функции распределения быстрых частиц генерируется ансамбль частиц, траектория которых попадает в NPA. При расчете результирующего потока учитывается как вероятность рождения рассматриваемых атомов, так и аттенюация потока по пути в NPA.

В работе представлены результаты расчетов кодами для четырех разрядов в токамаках Глобус-М/М2. Показано, что в разрядах без неустойчивостей, приводящих к дополнительным потерям быстрых частиц, модель классического удержания быстрых частиц достаточна для описания замедления быстрых ионов. При наличии неустойчивостей требуется введение эвристического коэффициента аномальной диффузии. В этом случае наблюдается совпадение формы синтетического сигнала с экспериментальным. При этом поглощенная мощность инъекции падает на 30-40%.

Литература

- [1]. Benedikt Geiger et al 2020 Plasma Physics and Controlled Fusion 62
- [2]. N.N. Bakharev et al 2015 Nucl. Fusion 55 043023 1421

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО РАВНОВЕСИЯ СО СВОБОДНОЙ ГРАНИЦЕЙ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИНЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Киселев Е.О., Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Курский Г.С., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е., Токарев В.А., Тюхменева Е.А., Хромов Н.А., Щеголев П.Б.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.074

Реконструкция равновесия является важной частью анализа экспериментальных данных токамаков, позволяющей узнать границу плазмы, положения измерений диагностики томсоновского рассеяния в потоковых координатах, энергосодержание, геометрию магнитного поля и т.д.

Для анализа измерений на сферическом токамаке Глобус-М2 был написан код равновесия с свободной границей на языке `python`. Решение уравнения Грэда-Шафранова осуществляется с помощью метода итераций Пикарда, интегрируя функцию Грина [1,2,3]. Самая вычислительно затратная часть кода, была оптимизирована с помощью библиотеки для транскомпиляции кода в `llvm - numba`. Базисные функции, представляющие p' - градиент давления и ff' - градиент полоидального тока представлены в виде [3]:

$$\begin{aligned} p'(\psi_n) &= A_1 \psi_n (1 - \psi_n) \\ ff'(\psi_n) &= B_0 + B_1 \psi_n - (B_0 + B_1) \psi_n^2 \end{aligned}$$

где A_1 , B_0 , B_1 - свободные параметры плазмы, а ψ_n - нормализованный поток полоидального магнитного поля. Параметры A_1 , B_0 , B_1 определяются на основе сравнения с доступными экспериментальными данными: потоком полоидального магнитного поля, измеренным магнитными петлями, сигналом диамагнитной петли и кинетическим давлением плазмы (получено с использованием диагностики томсоновского рассеяния и CXRS).

В работе представлены результаты применения кода для нескольких серий разрядов в токамаке Глобус-М2 с омическим и NBI нагревом в широком диапазоне электронной плотности от $0.5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ до $13 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, магнитным полем 0.8 и 0.9 Т и плазменным током от 300 кА до 400 кА. Проведено сравнение данных расчета равновесия с существующими экспериментальными измерениями – диамагнитным и кинетическим энергозапасом, положением внешней ноги сепаратрисы, получаемым с помощью тепловизора и т.д. Сравняется также диамагнитный сигнал и энергозапас, полученный с помощью расчета равновесия, где используются только измерения магнитных петель. Проведено сравнение с вычислениями кода PET.

Литература

- [1]. Y.M. Jeon et al 2015 Journal of the Korean Physical Society 67, 843–853.
- [2]. L.L. Lao et al 1985 Nucl. Fusion 25 1421
- [3]. S.A. Sabbagh et al 2001 Nucl. Fusion 41 1601

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МАГНИТНЫХ ОСТРОВОВ В ТОКАМАКЕ ФТ-2 МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ В ВЕРХНЕМ ГИБРИДНОМ РЕЗОНАНСЕ

Батырев Д.Ю., Алтухов А.Б., Гурченко А.Д., Гусаков Е.З., Есипов Л.А.,
Кантор М.Ю., Куприенко Д.В., Лашкул С.И.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург, Россия, e-mail: d.batyre@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.075

В омическом водородном разряде токамака ФТ-2 (большой радиус 55 см, радиус диафрагмы 7.9 см) с плазменным током 34 кА, плотностью $2.2 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, электронной температурой 560 эВ и магнитным полем 2.18 Тл исследовалась неоднородность полоидального вращения плазмы в присутствии магнитных островов. Для измерения полоидальной скорости v_θ использовалась методика доплеровского обратного рассеяния в верхнем гибридном резонансе (ВГР) [1]. Радиальное сканирование плазмы обеспечивалось изменением частоты микроволнового зондирования. Характерными особенностями временной эволюции сигнала доплеровского частотного сдвига $2\pi f_D(t) = \kappa_\theta v_\theta$ являются смещение его среднего уровня от нулевого значения, пропорциональное средней скорости полоидального вращения плазмы и полоидальной проекции волнового числа рассеивающих флуктуаций плотности κ_θ , а также наличие интенсивных когерентных колебаний, связанных с осцилляциями полоидального вращения из-за развития геодезической акустической моды (ГАМ). Указанные колебания проявлялись в широком диапазоне по малому радиусу от 4.5 до 6.3 см. В области $4.6 \text{ см} < r < 5.1 \text{ см}$, где находилась резонансная магнитная поверхность с $q = 2$, на спектре доплеровского сдвига фиксировалась дополнительная спектральная составляющая. Ее частота была идентична частоте линии, доминирующей на спектре сигнала МГД-зонда, а когерентность двух указанных сигналов на этой частоте доходила до 88%. При этом по величине кросс-фазы сигналов двух полоидально разнесенных МГД-зондов было подтверждено, что эта линия в их спектре относится именно к моде $m = 2$ ($n = 1$). При радиальном смещении области рассеяния от центра магнитного острова на $\Delta r = \pm 0.25 \text{ см}$ наблюдалось значительное падение корреляции сигналов доплеровского сдвига и МГД-зонда. При среднем значении доплеровского сдвига $\langle f_D \rangle = 1.2 \pm 0.1 \text{ МГц}$ вблизи $r = 5 \text{ см}$ амплитуды его колебаний, ассоциируемые с ГАМ и МГД, составляли $\delta f_{DGAM} = 0.24 \pm 0.05 \text{ МГц}$ и $\delta f_{DMHD} = 0.29 \pm 0.05 \text{ МГц}$. Полагая, что колебания доплеровского сдвига спектра рассеяния на МГД-частоте связаны только с модуляцией самой скорости полоидального вращения в острове, можно получить оценку сверху для величины этих колебаний $\delta v_{\theta MHD}$. Для определения величин скоростей были выполнены корреляционные измерения волновых чисел флуктуаций плотности, на которых происходило рассеяние вблизи $r = 5 \text{ см}$. При значении средней скорости $\langle v_\theta \rangle \approx 2.5 \text{ км/с}$ амплитуды ее скорости, связанные с ГАМ и МГД, оказались $\delta v_{\theta GAM} \approx 0.5 \text{ км/с}$ и $\delta v_{\theta MHD} \approx 0.6 \text{ км/с}$ соответственно. Альтернативным механизмом появления колебаний доплеровского сдвига на МГД-частоте является колебание величины κ_θ . Причина этого явления может быть связана с периодическим искажением формы поверхности ВГР вблизи магнитного острова как из-за возмущения радиального профиля плотности в нём, так и в связи с изменением формы магнитной поверхности, связанным с модуляцией магнитного поля МГД-возмущением. Оценки влияния указанных эффектов на модуляцию доплеровского частотного сдвига были выполнены для различных возмущений плотности и магнитного поля.

Литература

[1]. Gurchenko A.D. et al., Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, 55, 085017

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ В
ТОКАМАСЕ С ПОМОЩЬЮ МЕДЛЕННЫХ И БЫСТРЫХ ВОЛН (ГЕЛИКОНОВ)
ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА
С УЧЕТОМ ДВУМЕРНОГО СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ АНТЕННЫ**

Трошин Г.А., Теплова Н.В., Гусаков Е.З., Хавин В.Э., Крыжановский А.К.,
Коновалов А.Н., Дьяченко В.В.

ФТИ им. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, g.troshin@mail.ioffe.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.076

В данной работе представлены результаты численного моделирования генерации тока увлечения в токамаке с помощью волн промежуточного частотного диапазона с помощью обновленного численного кода FRTC, инкорпорированного в код ASTRA [1].

Для расчета стартового спектра показателя преломления электромагнитной волны, запущенной в плазму, с учетом геометрии антенны и параметров плазмы в токамаке используется численный код Grill3D [2]. Рассчитанный спектр является двумерным, то есть содержит полоидальные и тороидальные компоненты показателя преломления. В более ранней версии численного кода FRTC[3, 4] 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 волн промежуточного диапазона частот применяется для моделирования генерации нижнегибридного и геликонного тока увлечения для водородных и дейтериевых экспериментов на токамаке Глобус-М2. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными и расчетами с учетом одномерного спектра. Было показано, что введение двумерного спектра в расчеты позволяет существенно повысить рассчитанный ток увлечения, что соответствует экспериментальным данным.

Работа выполнена при поддержке Государственного задания № 0034-2021-0002.

Литература

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ТОКА УВЛЕЧЕНИЯ В ТОКАМАКЕ С ПОМОЩЬЮ МЕДЛЕННЫХ И БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ФОККЕРА-ПЛАНКА

Хавин В.Э., Теплова Н.В., Гусаков Е.З., Трошин Г.А., Крыжановский А.К.

ФТИ им. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, havinvasilij@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.077

Одним из самых эффективных безындукционных методов генерации тока является генерация тока с помощью нижнегибридных волн (LHCD). Однако для данного метода существует предел по плотности, который не позволяет волнам проникать вглубь термоядерной плазмы. Поэтому было предложено [1] поддерживать ток быстрыми волнами промежуточного частотного диапазона, часто называемыми геликонами. Эти волны находятся в области частот значительно выше ион-циклотронной, но меньше нижнегибридной (НГ) ($\Omega_{ci} \ll \omega < \Omega_{LH}$). Для данной волны поглощение улучшается с ростом плотности. Помимо этого, геликоны распространяются преимущественно вдоль линий магнитного поля с небольшой радиальной составляющей, что позволяет волне медленно и спирально проникать вглубь плазмы, где она эффективно поглощается. А намного более низкая частота в сравнении с НГ волной позволяет решить проблему связи антенна-плазма для крупных установок, например ИТЭР. Недавно было продемонстрировано [3], что для случая геликона, так же, как и в случае НГ волны, квазилинейный коэффициент диффузии можно найти из анализа энерговыделения пучка волн без расчета пространственного распределения электрических полей. Это обстоятельство позволяет ограничиться рассмотрением поведения лучевых траекторий волн с помощью нестационарного моделирования тока увлечения с использованием транспортного кода ASTRA [4] и кода FRTC [5,6] и решением одномерного уравнения Фоккера-Планка.

В настоящей работе мы представляем результаты нестационарного моделирования тока увлечения в токамаках ФТ-2 и Глобус-М2 с помощью медленных (НГ) и быстрых (геликонов) волн промежуточного частотного диапазона. Ток увлечения был рассчитан с помощью функции распределения, полученной в ходе решения уравнения Фоккера-Планка с учетом постоянного электрического поля. Численное решение последнего производилось с помощью схемы, которая использует специальные весовые коэффициенты для предотвращения появления отрицательных значений функции распределения. Этот подход оправдан в данном случае, т. к. использующийся коэффициент квазилинейной диффузии, который как раз и несет в себе информацию о взаимодействии волна-плазма, представляет собой кусочно-линейную функцию, производная которой может создавать скачки, неприемлемые для численного решения. Также обосновывается необходимость учета релятивистских эффектов, которые не могут быть включены в одномерную модель из-за вычислительной сложности. Для расчета спектра показателя преломления НГ волны была использована программа Grill3D [7].

Работа выполнена при поддержке Государственного задания ФТИ № 0034-2021-0003.

Литература

- [1]. V.L. Vdovin, Plasma Phys. Rep. Rev. 39 (2013) 95.
- [2]. M. Ono, Phys. Plasmas 2 (1995) 4075.
- [3]. А.Ю. Попов, Е.З. Гусаков, Письма в ЖТФ т.48 (2022) 24.
- [4]. G.V.Pereverzev and P.N. Yushmanov, ASTRA IPP-Report IPP 5/98, (2002).
- [5]. A.R. Esterkin and A.D. Piliya 1996 Nucl. Fusion 36 1501
- [6]. A.N. Saveliev, EPJ Web of Conferences 157, 03045 (2017).
- [7]. M.A. Irzak and O.N. Shcherbinin, Nucl. Fusion 35, 1341 (1995)

АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ И СБОРА ДАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВОК

Пурьга Е.А., Хильченко А.Д., Квашнин А.Н., Иваненко С.В., Зубарев П.В.,
Хильченко В.А., Моисеев Д.В.

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.078

Доклад посвящен обзору регистраторов, разработанных в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (Россия, Новосибирск) и предназначенных для использования в системах сбора данных плазменных установок. Все разработанные регистраторы имеют общую архитектуру построения, основанную на применении ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) со встроенным процессорным модулем ARM. Формально все рассматриваемые регистраторы можно разделить на три типа: сверхбыстродействующие регистраторы ADC105000/8 и ADC105000/4, быстродействующие регистраторы ADC12500/2, ADC14250/4, ADC14500/4 и ADC14125/2, и гальванически изолированные регистраторы ADC161/4 и ADC13-9/8.

Особенностью первого вида регистраторов (ADC105000/8 и ADC105000/4) является использование метода масштабного-временного преобразования (SCA – switch capacitor array) для построения основных трактов регистрации. В его рамках производится фиксация текущих амплитудных значений сигналов в аналоговой форме большим количеством элементарных ячеек выборки и хранения. Эти значения в дальнейшем считываются и преобразуются в цифровой эквивалент с помощью АЦП мегагерцового диапазона. Восьмиканальный регистратор ADC105000/8 (5ГГц, 10 бит) является основой диагностического комплекса томсоновского рассеяния на установке ГДЛ ИЯФ СО РАН. Четырехканальная версия регистратора ADC105000/4 ориентирована на использование в диагностике потерь электронного пучка источника синхротронного излучения СКИФ (Россия, Новосибирск).

В регистраторах ADC12500/2, ADC14250/4, ADC14500/4 и ADC14125/2 для фиксации формы сигналов используется метод прямого преобразования, основанный на «оцифровке» текущих амплитудных значений сигналов быстродействующими АЦП. На основе двухканального регистратора ADC12500/2 (500МГц, 12 бит) в ИЯФ СО РАН были реализованы нейтрон-гамма спектрометр с разделением событий в режиме реального времени и регистратор энергетического спектра и интенсивности потока термоядерных нейтронов. В диагностике плотности плазмы на токамаке Глобус-М2 (Россия, Санкт-Петербург) при помощи дисперсионного интерферометра используется двухканальный регистратор ADC14125/2 (125МГц, 14 бит). Четырехканальный регистратор ADC14250/4 (250МГц, 14 бит) ориентирован на построение систем сбора данных установок и комплексов, используемых в исследованиях по физике плазмы и УТС, а также в области физики высоких энергий. В настоящее время находится в разработке четырехканальный модуль универсального назначения ADC14500/4 (500МГц, 14 бит).

Особенностью третьего типа регистраторов (ADC161/4 и ADC13-9/8) является возможность работы в высоковольтных диагностических системах плазменных установок; при этом передача данных серверу диагностики осуществляется через специальный интерфейсный узел, связанный с регистраторами через оптоволоконные линии связи. Восьмиканальный модуль ADC13-9/8 (1,25МГц, 13-9 бит) используется для измерений продольных потоков частиц и тепла на установке ГДЛ ИЯФ СО РАН. Четырехканальные регистраторы ADC161/4 (1МГц, 16 бит) предназначены для проведения измерений в условиях высоких наводок на установке ГДЛ ИЯФ СО РАН.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-20201).

ДИСПЕРСИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ДЛЯ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2

¹Иваненко С.В., ¹Соломахин А.Л., ¹Хильченко А.Д., ¹Зубарев П.В., ¹Коваленко Ю.В.
^{1,2}Солоха В.В., ^{1,2} Шулятьев К.Д., ¹Пурьга Е.А., ¹Квашнин А.Н., ¹Багрянский П.А.

¹Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
S.V.Ivanenko@inp.nsk.su

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

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.079

Для регистрации характера поведения плотности плазмы во время разряда и реализации в будущем возможности управления этим параметром на токамаке Глобус-М2 (Санкт-Петербург, Россия) в ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера был создан дисперсионный интерферометр (ДИ) на основе СО2 лазера с искусственной фазовой модуляцией зондирующего излучения. В качестве прототипа при разработке данного ДИ использовались схемы интерферометров, ранее созданные командой авторов для установок ГДЛ (Новосибирск, Россия) [1] и TEXTOR (Юлих, Германия) [2]. Для регистрации сигналов ДИ и вычисления плотности плазмы был разработан описанный в [3] измерительный модуль.

В рамках экспериментальных кампаний 2021-2022 гг ДИ в комплекте с измерительным модулем был протестирован на токамаке Глобус-М2. Измерения производились в разрядах с током плазмы $I_p = 0.2-0.4$ МА, тороидальным магнитным полем $B_T = 0.6-0.9$ Тл в диверторной и лимитерных магнитных конфигурациях. Перед испытаниями ДИ был откалиброван с помощью подвижного клина, установленного в области прямого и обратного лучей, пересекающих плазму. Калибровка показала совпадение результатов измерений и расчетов в пределах неопределённости ожидаемого сдвига по фазе. Ошибка измерения абсолютного значения фазового сдвига составила менее 2,5%.

На сегодняшний день ДИ является полноценной частью диагностического комплекса токамака Глобус-М2 и позволяет в реальном времени получать надежные данные об абсолютной величине электронной плотности плазмы во всех режимах работы установки. Размах шумовой компоненты при измерениях линейной плотности не превышает $\langle n_l \rangle_{\min} \approx 6 \times 10^{12}$ см⁻² при временном разрешении в 20 мкс. В модернизированной версии измерительного модуля реализована возможность управления клапаном для инъекции газа в вакуумную камеру токамака в процессе рабочего импульса с целью планируемого в дальнейшем построения системы с обратной связью для управления плотностью плазмы, используя ДИ в качестве детектора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-20201).

Литература

- [1]. Соломахин А.Л., Багрянский П.А., Воскобойников Р.В., Зубарев П.В., Квашнин А.Н., Лизунов А.А., Максимов В.В., Хильченко А.Д. Дисперсионный интерферометр на основе СО2 лазера. – Приборы и техника эксперимента, 2005, N5, с. 96-106.
- [2]. Dreier H., Bagryansky P., Baumgarten N., Biel W., Lambertz H. T., Lehnen M., Lizunov A., Solomakhin A. First results from the modular multi-channel dispersion interferometer at the TEXTOR tokamak. – Review of Scientific Instruments, 2011, 82, 063509
- [3]. Иваненко С.В., Гринемайер К.А., Пурьга Е.А., Квашнин А.Н., Багрянский П.А. Измерительный модуль дисперсионного интерферометра на основе СО2 лазера для управления плотностью плазмы. – ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 1, с.67 - 78

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТАРТОВОЙ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ КОТ

¹Мурахтин С.В., ¹Коробейникова О.А., ¹Багрянский П.А., ¹Яковлев Д.В.,
²Колесниченко К.С., ²Иванов Р.С.

¹ИЯФ им. Г.И.Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²НГУ, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.080

В ИЯФ СО РАН введена в эксплуатацию новая экспериментальная установка Компактный Осесимметричный Торойд (КОТ). Программа исследований ориентирована на изучение удержания горячей плазмы с высоким относительным давлением в осесимметричном пробкотроне малого объема с мощной атомарной инжекцией, демонстрацию диамагнитного удержания и обращения ведущего магнитного поля [1].

Программа исследований включает в себя:

1. Выбор режима работы генератора плазмы, оптимального для захвата инжектируемых атомарных пучков и накопления необходимого азимутального тока.
2. Создание и стабилизация плазмоида с $\beta^1 \approx 1$.

В настоящее время ведутся экспериментальные работы по оптимизации работы плазменного генератора [2]. Результаты численного моделирования [3] показывают, что необходимая для эффективного захвата пучков плотность мишенной плазмы должна быть $1-5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, а её температура - 30-40 эВ.

Проведены первые эксперименты по измерению радиальных профилей плотности и температуры электронной компоненты мишенной плазмы, отработана методика измерений её диамагнетизма. Регистрируется энергетический спектр ионов, покидающих центральный пробкотрон вдоль силовых линий магнитного поля. Быстрое дифференциальное вращение плазмы, вызванное значительным радиальным градиентом потенциала, приводит к развитию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Этот механизм эффективно повышает среднюю энергию ионов в плазме. В эксперименте получена стартовая плазма с плотностью 10^{13} см^{-3} , электронной температурой 30 эВ и средней энергией ионов 200 эВ.

Литература

- [1]. A.A. Ivanov et al., “SUSTAINMENT OF HIGH-BETA MIRROR PLASMA BY NEUTRAL BEAMS”, Plasma Physics and Technology 5(3):125–127, 2018.
- [2]. А.А. Кабанцев, Неустойчивости плазменной струи, Дисс. к.ф.-м.н., Новосибирск, 1991.
- [3]. Yu.A. Tsidulko and I.S. Chernoshtanov, Particle-in-cell simulation of field reversal in mirror trap with neutral beam injection, AIP Conference Proceedings 1771, 040005 (2016), <https://doi.org/10.1063/1.4964190>.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНТЕННЫ И ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО НАГРЕВУ ИОНОВ ПО СХЕМЕ МАГНИТНОГО БЕРЕГА В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЛОВУШКЕ УСТАНОВКИ ГОЛ-NB

Мельников Н.А., Сквородин Д.И., Калинин П.В., Полосаткин С.В., Холопов М.А.,
Поступаев В.В., Иванов И.А., Маслаков И.Д., Кондаков А.А., Шиховцев И.В.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, N.A.Melnikov@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.081

Нагрев ионов с помощью электромагнитного излучения является хорошим методом для расширения области рабочих параметров для эксперимента по многопробочному удержанию на установке ГОЛ-NB [1]. Для проверки возможности реализации такого нагрева предложена схема, основанная на методе “магнитного берега” [2,3]. В такой схеме альфвеновская волна запускается из области с более сильным полем. Передача энергии ионам наступает при достижении волной условий ионно-циклотронного резонанса в рабочей зоне.

Магнитные поля в установке ГОЛ-NB [4] составляют 0,3 Тл в центральной части и 4,5 Тл в многопробочных секциях. Соответствующие циклотронные частоты ионов водорода лежат в диапазоне 4,56-68,4 МГц. Исходя из конфигурации магнитного поля в центральной части, для возбуждения волны была выбрана частота 13,56 МГц, имеющая резонанс в поле 0,89 Тл. Запускающая волна антенна располагается в поле 1,1 Тл. Расчеты, проведенные для имеющей схожие параметры установки ГАММА-10, показывают, что при рабочей плотности плазмы в ловушке $3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ передача энергии будет происходить преимущественно в периферийной области [5], что позволит дополнительно наблюдать передачу энергии плазме по изменению профиля ее свечения.

Для возбуждения волны в плазме предложена антенна, состоящая из двух полувитков. Антенна промоделирована с использованием пакета трехмерного моделирования. Были рассчитаны создаваемые антенной поля, проведена оптимизация параметров. Кроме того, были рассчитаны параметры подводящего ВЧ излучение тракта.

Система подачи мощности к антенне состоит из ВЧ генератора с изменяемой мощностью до 25 кВт, согласующего устройства и связывающего их коаксиального кабеля.

В экспериментах по передаче энергии от альфвеновской волны к ионам в центральной ловушке установки ГОЛ-NB предполагается использовать имеющиеся на установке диагностики: фотокамеры и быстрые видеокамеры для визуального контроля отсутствия сбоев в работе антенны и изменения профиля свечения плазмы, спектрографические диагностики для обнаружения изменения температуры плазмы по ширине профиля линии Н-альфа. Кроме того, для обнаружения распространения волны в плазме планируется создание подвижных ВЧ зондов.

Литература

- [1]. Postupaev V.V et.al., Start of experiments in the design configuration of the GOL-NB multiple-mirror trap // Nuclear Fusion, 62(8), 086003 (2022).
- [2]. Звонков А.В., Тимофеев А.В., «Магнитный берег» в открытых ловушках // Физика плазмы, Т.3, С. 282 (1987).
- [3]. Сквородин Д.И. и др., РАСЧЕТЫ СХЕМЫ ИЦР-НАГРЕВА ИОНОВ В ГОЛ-NB МЕТОДОМ «МАГНИТНОГО БЕРЕГА» // в этом сборнике
- [4]. Поступаев В.В., Юров Д.В., МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕФЕРЕНСНОГО СЦЕНАРИЯ РАБОТЫ МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКИ ГОЛ-NB // ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, том 42, № 11, с. 966–977 (2016).
- [5]. Ikezoe R. et.al., A Full Wave Simulation on the Density Dependence of a Slow Wave Excitation in the GAMMA 10/PDX Central Cell with TASK/WF3D // Plasma and Fusion Research: Regular Articles Volume 14, 2402003 (2019).

РАСЧЕТЫ СХЕМЫ ИЦР-НАГРЕВА ИОНОВ В ГОЛ-NB МЕТОДОМ «МАГНИТНОГО БЕРЕГА»

Сковородин Д.И., Калинин П.В., Мельников Н.А., Полосаткин С.В., Поступаев В.В.,
Бурдаков А.В.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, d.i.skovorodin@inp.nsk.su.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.082

В 2021 году в ИЯФ СО РАН начаты эксперименты на полной конфигурации многопробочной ловушки ГОЛ-NB [1]. Установка предназначена для изучения многопробочного удержания плазмы в квазистационарном режиме. Магнитная система установки состоит из центральной ловушки, длинных пробок и расширителей на торцах установки. В длинных пробках может создаваться многопробочное либо однородное магнитное поле. Стартовая мишенная плазма инжектируется в центральную ловушку через сильную пробку с торца установки и нагревается при помощи инъекции пучков нейтральных атомов. Основной задачей научной программы установки является изучение удержания теплой плазмы многопробочными магнитными системами. Для расширения экспериментальных возможностей установки и доступного диапазона параметров актуальна разработка методов дополнительного нагрева плазмы в ловушке. Отдельный интерес представляет возможность нагрева ионов мишенной плазмы. Такой нагрев позволил бы в некоторых пределах управлять частотой столкновения ионов, изменяя режим их течения в многопробочных секциях. В данной работе анализируется возможность ИЦР-нагрева ионов в центральной ловушке ГОЛ-NB методом «магнитного берега».

На основе анализа областей прозрачности плазмы [2] и численного моделирования в двумерной цилиндрической геометрии оценена возможность возбуждения в плазме ГОЛ-NB альфвеновской волны. Референсный сценарий работы установки [3] предполагает создание в центральной ловушке плазмы с плотностью $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что является сравнительно большой величиной для использования нагрева на альфвеновской волне. Для возбуждения волны в плазме высокой плотности благоприятным является размещение антенны в сильном поле вблизи пробки и соответствующее увеличение частоты [4]. В расчетах выбрана частота 13,56 МГц и величина магнитного поля 1-1,5 Тл. Показано, что нагрев на альфвеновской волне может реализовываться вплоть до плотностей плазмы $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что может позволить расширить доступный для эксперимента на ГОЛ-NB диапазон плотностей плазмы. При проектной плотности $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ введение ВЧ мощности может способствовать подогреву периферии плазмы и улучшению удержания горячих ионов в ловушке.

Также рассмотрена возможность возбуждения в плазме ГОЛ-NB БМЗ волны. Показано что нагрев на быстрой волне можно рассматривать только при плотности выше проектной $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Литература

- [1]. Postupaev V.V et.al., Start of experiments in the design configuration of the GOL-NB multiple-mirror trap // Nuclear Fusion, 62(8), 086003 (2022).
- [2]. Звонков А.В., Тимофеев А.В., «Магнитный берег» в открытых ловушках // Физика плазмы, Т.3, С. 282 (1987).
- [3]. Поступаев В.В., Юров Д.В., МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕФЕРЕНСНОГО СЦЕНАРИЯ РАБОТЫ МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКИ ГОЛ-NB // ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, том 42, № 11, с. 966–977 (2016).
- [4]. Ikezoe R. et.al., A Full Wave Simulation on the Density Dependence of a Slow Wave Excitation in the GAMMA 10/PDX Central Cell with TASK/WF3D // Plasma and Fusion Research: Regular Articles Volume 14, 2402003 (2019).

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МОЩНЫЙ АТОМАРНЫЙ ИНЖЕКТОР С ТОКОМ ПУЧКА 150 А ДЛЯ НАГРЕВА И СТАБИЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНЫХ ЛОВУШКАХ

Дейчули П.П., Амиров В.Х., Ахметов Т.Д., Белов В.П., Бруль А.В., Вахрушев Р.В., Горбовский А.И., Давыденко В.И., Дейчули Н.П., Иванов А.А., Капитонов В.А., Колмогоров В.В., Рашенко В.В., Сорокин А.В., Ступишин Н.В., Орешонок В.В., Шиховцев И.В.

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: pdeichuli@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.083

Атомарный инжектор на базе источника положительных ионов с извлеченным током 150 А мощностью до 2.5 МВт для нагрева плазмы описан в [1]. Благодаря большому току пучка (до 175 А) эти инжекторы используются также для стабилизации плазмы и в системах с обращенным магнитным полем. Недостатком инжектора является небольшая рабочая длительность импульса и сравнительно высокая расходимость в поперечном направлении относительно щелевой структуры ИОС. В данной работе описываются исследования, направленные на уменьшение данных недостатков и создание модернизированного мощного атомарного инжектора.

Для получения рекордного ионного тока инжектора в источнике плазмы применена схема слияния струй плазмы от 4-х источников, при этом для сохранения компактности используются дуговые генераторы с холодным катодом. Причиной ограничения длительности импульса является эрозия катода и прикатодных элементов генераторов при повышении мощности разряда. Основываясь на результатах исследований [2] удалось создать компактный источник плазмы с рабочей длительностью импульса до 0.6 сек и эмиссией ионов 150 А.

В используемой 3-электродной ИОС измеренная угловая расходимость пучка в направлении вдоль щелей является практически предельно низкой, т.е. определяется температурой ионов плазмы эмиттера. Расходимость пучка в поперечном направлении в большей степени определяется точностью изготовления первой (плазменной) сетки ИОС и значительно в $\approx 1.5 \div 2$ раза могла превышать расчетную. Моделированием формирования пучка и экспериментальной проверкой найдены оптимальная форма геометрии плазменной сетки, минимизирующая влияние погрешности изготовления на расходимость пучка.

Для повышения высоковольтной надежности ИОС и быстреего вывода инжекторов на рабочие параметры разработана и применена технология кондиционирования электродов, основанная на тренировке дозированных пробоями на фоне тлеющего разряда [3]. Установлено, что хаотичные колебания на токе разряда (“шумы”) также приводят к повышенной расходимости пучка. Модернизация системы питания дугового разряда с целью уменьшения шумов тока разряда позволила улучшить угловую расходимость пучка.

Литература

- [1]. 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. Т. 86. № 11. С. 113509.
- [2]. Дейчули П.П., Бруль А.В., Вахрушев Р.В., Дейчули Н.П., Иванов А.А., Ступишин Н.В., Колмогоров В.В. Модернизация дугоразрядного генератора плазмы для мощных атомарных инжекторов секундного диапазона. В книге: XLIX Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу ICRAF-2022. Сборник тезисов докладов. 2022. С. 100.
- [3]. Емельянов, А. А., Емельянова В.А. Импульсные технологии повышения электрической прочности в вакууме. М. : Физматлит, 2009.

ДВУМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА В ОМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА Т-10

^{1,2}Аммосов Я.М., ³Хабанов Ф.О., ¹Драбинский М.А., ^{1,2,4}Мельников А.В.,
¹Елисеев Л.Г., ^{1,5}Харчев Н.К., ¹Лысенко С.Е.

¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия

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

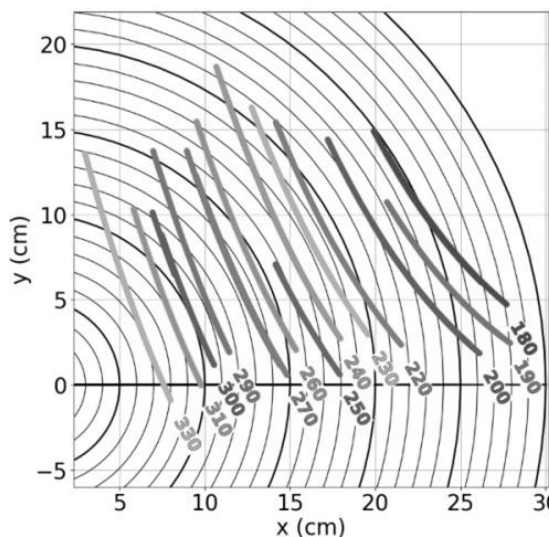
³University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA

⁴Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", г. Москва, Россия

⁵Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.084

Исследование механизмов переноса тепла и частиц в плазме тороидальных установок – одна из ключевых задач физики горячей плазмы. Одним из механизмов регулирования переноса являются шировые течения $E \times B$, вызываемые радиальным электрическим полем, поэтому экспериментальное исследование пространственных распределений электрического потенциала является актуальной задачей.



Первые попытки построения двумерных распределений потенциала плазмы методом зондирования пучком тяжелых ионов (ЗПТИ) были сделаны в плазме с ЭЦР-нагревом на стеллараторах LHD (Япония) [1, 2] и TJ-II (Испания) [3]. Затем на TJ-II в режимах с ЭЦР и инжекционным нагревом были построены подробные двумерные распределения потенциала и его колебаний, которые показали, что эквипотенциальные линии согласуются с вакуумными магнитными поверхностями установки [4].

Токамак Т-10 ($R = 1.5$ м, $a = 0.3$ м, $B_t \leq 2.5$ Тл, $I_{pl} \leq 300$ кА, $\bar{n}_e \leq 6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) оснащен

ЗПТИ, которая позволяет проводить измерения электрического его флуктуаций, а также флуктуаций магнитного потенциала в горячей плазмы [5].

Рис. 2 Область измерения ЗПТИ на токамаке Т-10 ($B_t = 2.2$ Тл, $I_{pl} = 230$ кА). Показаны детекторные линии равной энергии для ионов цезия в интервале 180-330 кэВ. локальные потенциала и плотности и области

В докладе представлено двумерное распределение электрического потенциала в омической плазме с магнитным полем $B_t = 2.2$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 230$ кА, среднечордовой электронной плотностью $\bar{n}_e = 1.1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Измерения потенциала проводились в первом квадранте сечения плазменного шнура (рис. 1).

Установлено, что в рассматриваемом режиме токамака Т-10:

- распределение потенциала согласуется с магнитными поверхностями установки;
- в центральной области плазмы потенциал достигает значения $\phi(r/a = 0.24) \approx -1500$ В;
- на периферии плазмы потенциал равен $\phi(r/a = 0.9) \approx +170$ В.

Литература

- [1]. Shimizu A. et al. // Rev. Sci. Instrum., 2014. V. 85. № 11. P. 11D853-1.
- [2]. Shimizu A. et al. // Rev. Sci. Instrum., 2016, V. 87, № 11, P. 11E731.
- [3]. Sharma R. et al. // Phys. Plasmas, 2020. V. 27. P. 062502.
- [4]. Melnikov A.V. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion, 2022. V. 64. № 5. P. 054009 (10pp).
- [5]. Melnikov A.V. et al. // Fusion Eng. Des., 2019. V. 146. P. 850-853.

ПАРАМЕТРЫ ИСТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ИЗ СОПЛА МАГНИТОПЛАЗМЕННОЙ УСТАНОВКИ ПЛМ-М

^{1,2}Рогозин К.А., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Федорович С.Д., ^{1,2}Карпов А.В., ^{1,3}Кавыршин Д.И.,
¹Лукашевский М.В., ¹Губкин М.К., ¹Чан Куанг В., ^{1,2}Коньков А.А., ^{1,2}Белоусов С.В.,
^{1,2}Квасков В.С., ¹Губанова А.И., ¹Анисимов Д.А., ¹Чилин М.С., ¹Евдокимов О.И.,
¹Никулина А.М.

¹ ФГБОУ «НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

³ОИВТ РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.085

Для успешного освоения космического пространства требуется развитие космических транспортных систем. Одно из перспективных направлений в области развития тяговых систем – магнитоплазодинамические ускорители (МПДУ) [1].

Установка ПЛМ-М [2] в «НИУ «МЭИ» может использоваться для отработки технологий и перспективных конструкций МПДУ. Установка оснащена тремя соленоидами, которые могут формировать конфигурацию плазменного сопла. Радиусы соленоидов равны 90 мм, 82,5 мм и 150 мм. Проведено моделирование конфигурации магнитных полей при токах в основном и дополнительных соленоидах 200 А, 85 А и 120 А соответственно. По результатам расчета в центре основных соленоидов магнитное поле достигает значения 35 мТл, в зоне истечения плазменного потока в ресивер от 5 до 15 мТл. Для дополнительного нагрева плазмы предусмотрена система ИЦР нагрева с помощью геликоновой антенны.

Измерены параметры плазмы зондовым методом в ресиверной области установки ПЛМ-М. Измерения проводились подвижной зондовой диагностикой, ход зондов - 150 мм. Поток плазмы сформирован при токах в соленоидах: в основном соленоиде 200 А; 40 А и 120 А в дополнительных соленоидах. В основном объеме удержания плазменный поток имел диаметр 3,5 см. В зоне после анода в ресивере поток плазмы расширяется до плазменного потока радиусом более 150 мм. Получены данные о пространственном распределении потенциала и плотности плазмы. Измеренные оптическим методом с использованием спектрометра в ресиверной области температура электронов ~2 эВ, концентрация электронов $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Измерения параметров плазмы в зоне истечения потока в ресивер позволят оценить характеристики тяги, в том числе при использовании дополнительного ИЦР нагрева плазмы и жидкометаллических литиевых электродов в схеме магнитоплазменного ускорителя.

Литература

- [1]. Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И., Кулыгин В.М. Плазменные двигатели и будущее космонавтики // Природа №12 2017 33-44
- [2]. Будаев В.П., Федорович С.Д., Дедов А.В. и др. Плазменная установка ПЛМ-М для испытаний теплозащитной облицовки внутрикамерных компонент и диагностики пристеночной плазмы термоядерного реактора-токамака // «Диагностика высокотемпературной плазмы XIX» г. Сочи. - С.207-209.

ВЕРИФИКАЦИЯ ТРЁХМЕРНОЙ МОДЕЛИ КОМПЛЕКСА ТОКАМАКА Т-15МД ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ

^{1,2}Шелегеда И.А., ¹ Драбинский М.А.

¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана (НИУ), г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.086

При разработке комплекса токамака Т-15МД (его диагностик, систем нагрева, вспомогательных технических систем) предлагается использовать совместное проектирование отдельных узлов в системах трёхмерного автоматизированного проектирования. Используемая для этого трехмерная модель комплекса Т-15МД представлена на рисунке 1 [1]. Ориентиром в данном подходе является применение данного метода при разработке международного экспериментального реактора ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER). Практика его создания показала, что при разработке экспериментальной установки такой сложности необходимо учесть большое количество факторов: возможность единовременного бесконфликтного размещения большого количества систем в ограниченном пространстве, доступ ко всем конструкционным элементам для их обслуживания, а также требования безопасности. Применение единой трехмерной модели позволяет учесть эти факторы. Разработкой различных систем ИТЭР занимаются независимые коллективы из разных стран мира [2]. Все системы встраиваются в единую трехмерную модель ИТЭР. Данный подход позволяет отдельным коллективам осуществлять согласованное проектирование, опираясь на данные о расположении узлов соседних систем и деталей конструкции токамака. Таким образом, обеспечивается бесконфликтное размещение различных систем, а процесс разработки ускоряется.

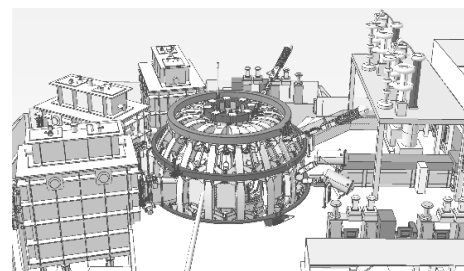


Рис. 1 3D-модель комплекса Т-15МД

Однако данный метод имеет также ряд недостатков, важнейшим из которых является возможное несоответствие элементов конструкции в трехмерной модели реальным элементам токамака и его систем. Возможные причины несоответствия трёхмерной модели и реальной конструкции установки – изменение или замена элементов реальной конструкции или неточность исполнения деталей.

В докладе приведен способ учета указанных недостатков при разработке систем Т-15МД, основанный на верификации трехмерной модели по данным лазерного геодезического сканирования установки, обеспечивающего точность измерений с погрешностью 1-3 мм. Результаты сканирования, представленные в виде облака точек, стали основой для уточнения размеров и расположения элементов конструкции Т-15МД и дополнительных систем токамака. Учет несоответствий позволит проводить разработки комплексов токамака таким образом, чтобы соблюсти требования по безопасности, эргономике, доступности оборудования для ремонта и обслуживания.

Литература

- [1]. Драбинский М.А. и др. 3D модель комплекса токамака Т-15МД // Сборник тезисов докладов XLIX Международной звенигородской конференции по физике плазмы и УТС стр. 68 (2022)
- [2]. F. Louche et al. 3D modeling and optimization of the ITER ICRH antenna // AIP Conference Proceedings 1406, 69 (2011)

РАСЧЁТЫ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТРЕУГОЛЬНОСТЬЮ ДЛЯ УСТАНОВОК Т-15МД И ТРТ

Скопинцев Д.А., Мирнов С.В., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия, scopintsev.d.a@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.087

В представленной работе приведены данные расчётов с использованием кода ДИНА магнитных конфигураций с отрицательной треугольностью для установки Т-15МД с штатной системой обмоток полоидального поля. Предлагается вариант полоидальной системы токамака ТРТ, в котором появляется возможность реализации разрядов в конфигурации с положительной и отрицательной треугольностью.

Перенос энергии в плазме с магнитным удержанием зависит от ряда параметров, таких как величина магнитного поля и плотность плазмы, но также существенно зависит от конфигурации плазменного шнура. Значительное влияние на удержание имеет форма поперечного сечения. До недавнего времени концепция диверторной вертикально вытянутой конфигурации плазмы с положительной треугольностью рассматривалась в качестве базовой для современных и проектируемых установок токамак.

Несколько лет назад на токамаке TCV в ходе экспериментов по сканированию треугольности от сильно положительной до сильно отрицательной исследовали конфигурации с отрицательной треугольностью. Было обнаружено, что при отрицательной треугольности уменьшался перенос, разряды с треугольностью $\delta = -0,4$ имели коэффициент диффузии электронов в два раза ниже сопоставимых разрядов с $\delta = +0,4$ [1]. На DIII-D, в экспериментах с дополнительным нагревом плазмы, было показано, что в конфигурации с отрицательной треугольностью (NT) получено улучшенное удержание по сравнению с плазмой D-формы с положительной треугольностью (PT). При этом конфигурация с отрицательной треугольностью даёт возможность достигать значительного нормализованного бета с профилями давления без краевого пьедестала и режимов без ELM. В работе [3] предложена концепция использования конфигурации с отрицательной треугольностью (NT) в качестве альтернативного сценария при эксплуатации термоядерного реактора на основе токамака.

Представленные расчёты конфигурации плазмы на установке Т-15МД для более широкого диапазона изменения отрицательной треугольности показывают необходимость внесения незначительных конструктивных изменений в расположении обмоток индуктора токамака Т-15МД. Также выполнены расчёты базовых конфигураций для разрядов с положительной и отрицательной треугольностью для проектируемого токамака ТРТ. Предлагается расширить программы исследований на Т-15МД и ТРТ с включением изучения влияния треугольности на процессы переноса.

Литература

- [1]. Y. Camelon, A. Pochelon, R. Behn, et al, “Impact of plasma triangularity and collisionality on electron heat transport in TCV L-mode plasmas,” Nucl. Fusion 47 (2007) 510-516.
- [2]. M.E. Austin, A. Marinoni, M.W. Brookman, et al, “High confinement in negative triangularity discharges in DIII-D”, IAEA-CN-391/EX/P6-6
- [3]. M. Kikuchi, T. Takizuka, S. Medvedev, et al, “L-mode-edge negative triangularity tokamak reactor”, Nucl. Fusion 59 (2019) 056017 (15pp)

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ГИРОТРОНА 82,6 ГГц ТОКАМАКА Т-15МД

Саврухин П.В., Шестаков Е.А., Лисовой П.Д., Тепикин В.И., Храменков А.В.,
Рой И.Н., Пименов И.С

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.088

Измерение рентгеновского излучения при работе генераторов СВЧ излучения (гиротронов) представляет интерес с точки зрения реконструкции распределений энергии электронных пучков, расчета траекторий электронов высоких энергий и оптимизации рекуперации энергии и торможения электронных пучков в коллекторе (см. например [1]). Важной задачей является также разработка систем экранирования для уменьшения потоков рентгеновского излучения при оперативном обслуживании гиротронов.

На токамаке Т-15МД установлен гиротрон с рекуперацией энергии электронного пучка. Основные параметры: мощность 1 МВт, длительность импульса 30 с, частота СВЧ излучения 82,6 ГГц, ускоряющее напряжение 71 кВ (напряжение катода – 46,5 кВ, напряжение анода + 24,5 кВ), ток катода 37 А. Комплект оборудования гиротрона и линии передачи разработан и изготовлен институтом ИПФ РАН совместно с компанией ЗАО НПП «ГИКОМ» (г. Нижний Новгород).

Проведены предварительные измерения рентгеновского излучения при работе гиротрона 82,6 ГГц в тестовом режиме при коротком импульсе длительностью до 1 мс. Для регистрации рентгеновского излучения использовались два сцинтилляционных детектора LaBr₃ (Ø38.1×38.1мм) расположенные в герметичном корпусе с ФЭУ и предусилителем сигнала 2007P. Система сбора данных построена на базе АЦП NI PXIe-5105. Для калибровки детекторов использовалась рентгеновская трубка Eclipse-IV Amptek Inc (анодный ток I_a ~ 2.0 – 49.9 мкА при катодном напряжении до 45 кВ).

Измерения интенсивности рентгеновского излучения показали неоднородное распределение излучения вдоль оси гиротрона. Максимальная интенсивность излучения наблюдается вблизи выходного окна СВЧ тракта. При удалении от гиротрона наблюдается значительное ослабление интенсивности рентгеновского излучения в соответствии с обратной квадратичной зависимостью.

Для снижения возможной дозы облучения персонала гиротронами Т-15МД предусмотрена установка защитных свинцовых экранов вблизи коллекторов электронного пучка. Свинцовые экраны обеспечивают ослабление интенсивности рентгеновского излучения до 8-9 раз при полном покрытии всего гиротрона со стороны расположения детектора.

Для определения абсолютных величин потоков рентгеновского излучения планируется проведение дополнительных измерений с помощью CdTe детекторов в потоковом режиме и с помощью детекторов LaBr₃ в спектрометрическом режиме, а также проведение калибровки детекторов на сертифицированном рентгеновском стенде.

Литература

- [1]. A. Arkhipov et al, Reconstruction of Energy Distributions in Electron Beams on the Basis of Bremsstrahlung X-Ray Spectra, IEEE Trans. Plasma Sci., VOL. 41, NO. 10, 2013, p 2786.

УЧЁТ ВЛИЯНИЯ КОНЕЧНОГО ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ ФЛУКТУАЦИЙ НА ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА

^{1,2,3}Владимиров И.А., ^{1,3}Вершков В.А., ^{1,3}Субботин Г.Ф., ^{1,3}Шелухин Д.А.

¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия

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

³УТС-Центр, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.089

Измерение скорости вращения мелкомасштабных флуктуаций плазмы является одним из важных вопросов физики плазмы. Исследования в термоядерных установках показали существенную роль вращения плазмы в формировании внешнего транспортного барьера (Н-моды), однако ряд вопросов в физике формирования барьера нуждается в дальнейшем исследовании. Одной из диагностик, позволяющих измерять полоидальную скорость флуктуаций в большей части плазменного шнура, является корреляционная рефлектометрия.

При традиционном подходе измерение скорости вращения флуктуаций с помощью рефлектометрии основано на измерении временной задержки при распространении возмущения плазмы и расстояния между областями измерения. Такой подход основан на гипотезе Тейлора о замороженных потоках [1]. Однако было показано, что измерения скорости вращения, выполненные с помощью рефлектометра, зачастую не согласуются со скоростью диамагнитного вращения плазмы, полученного с помощью других диагностик [2]. Такое несоответствие может возникать из-за конечного времени жизни возмущений. Альтернативный метод оценки скорости распространения возмущений (так называемый метод эллиптического приближения) основан на эволюции пространственно-временной кросскорреляционной функции; впервые он был использован для измерений скорости на стеллараторе W-7X [3].

На основе работы [4] построена эмпирическая модель турбулентной плазмы с характерными параметрами турбулентностей, измеренными на токамаке T-10, проведено моделирование сигнала ленгмюровского зонда и полноволновое моделирование распространения зондирующего сигнала рефлектометра для этой модели. Сравнение традиционного Тейлоровского и эллиптического метода для полученных данных показало, что подход эллиптического приближения дает лучшее согласие с модельными значениями скорости.

Разработанная методика была применена для обработки данных измерений скорости вращения турбулентности на периферии плазменного шнура ($r/a \sim 0.95 - 1.1$) в токамаке T-10. Полученные данные показали, что эллиптический подход дает существенную поправку к скорости вращения, измеренной с помощью ленгмюровских зондов. В докладе также представлены данные сравнения измерений скорости с помощью корреляционной рефлектометрии в рамках традиционного и эллиптического подходов.

Литература

- [1]. Taylor G.I. The spectrum of turbulence //Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences. – 1938. – Т. 164. – №. 919. – С. 476-490.
- [2]. Vershkov V.A. et al. Summary of experimental core turbulence characteristics in ohmic and electron cyclotron resonance heated discharges in T-10 tokamak plasmas //Nuclear fusion. – 2005. – Т. 45. – №. 10. – С. S203.
- [3]. Han X. et al. Application of the elliptic approximation model for the edge turbulence rotation measurement via the poloidal correlation reflectometer in Wendelstein 7-X //Nuclear Fusion. – 2021. – Т. 61. – №. 6. – С. 066029.
- [4]. Urazbaev A.O. et al. Direct comparison of turbulence measurements by Langmuir probe technique and by reflectometry //Plasma physics reports. – 2006. – Т. 32. – №. 8. – С. 619-641.

КАЗАХСТАНСКИЙ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ ТОКАМАК КТМ. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Батырбеков Э.Г., Тажибаяева И.Л., Чектыбаев Б.Ж., Ольховик Д.А., Бакланов В.В.

*Национальный ядерный центр Республики Казахстан, г. Курчатов, Республика
Казахстан, tazhibayeva@ntsc.kz*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.090

Токамак КТМ представляет собой специализированную установку, предназначенную для исследования конструкционных и функциональных материалов, элементов и узлов будущих установок термоядерного синтеза, а также исследования по физике плазмы. Основные особенности данного токамака – это аспектное отношение, равное 2, что является пограничной областью между сферическими и классическими токамаками; наличие транспортно-шлюзового и подвижного диверторного устройства, позволяющих производить замену образцов диверторных пластин без разгерметизации вакуумной камеры. Базовыми параметрами плазмы КТМ являются: ток плазмы 750 кА, диверторная конфигурация с вытянутостью $k=1,7$ и длительностью разряда 5 с, треугольность 0,1 – 0,2. Номинальное тороидальное магнитное поле 1 Тл. Внутренняя поверхность вакуумной камеры КТМ облицована графитовыми тайлами марки FP-479. В качестве дополнительного нагрева плазмы будет использоваться ионно-циклотронный резонансный нагрев (ИЦР).

В настоящий момент на токамаке КТМ выполняются работы по выводу установки на номинальные параметры и достигнуты следующие параметры плазменного разряда в режиме омического нагрева: ток плазмы $I_p \approx 500$ кА, плотность $1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, с длительностью разряда ~ 1 с.

В настоящее время на токамаке КТМ реализуется программа совместных научных исследований, которая была разработана в целях реализации межправительственного Соглашения стран СНГ о совместном использовании экспериментального комплекса на базе токамака КТМ. В программе совместных исследований принимают участие от РФ специалисты НИЦ «Курчатовский институт», НИИЭФА им. Ефремова, ФТИ им. Иоффе, Томского политехнического университета и АО «Красная Звезда» (ныне отделение НИКИЭТ), НИЯУ МИФИ. От Республики Беларусь в совместных исследованиях принимают участие: ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН РБ, НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета. Программа совместных работ с использованием КТМ состоит из следующих этапов: отработка методик проведения исследований на КТМ; разработка инновационных технологий для создания термоядерного реактора; модернизация технологии подготовки токамака КТМ, исследование взаимодействия плазма-стенка; совершенствование технологических, физических методов диагностики плазмы и системы управления.

Литература

- [1]. Chektybayev V. et al., Study of breakdown and plasma formation in the KTM tokamak with the massive conductive vacuum chamber, Fusion Engineering and Design, v. 163, February 2021, # 112167. DOI 10.1016/j.fusengdes.2020.112167.
- [2]. Киреева Н.А. и др., Сравнение рабочих параметров токамака КТМ с операционными пределами установки, ВАНТ, 2022, сер. Термоядерный синтез, т.45, вып.2, стр. 50-54.

РАЗРАБОТКА И СТЕНДОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ ДЛЯ УСТАНОВКИ Т-15МД

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

НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, eduard@khayrutdinov.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.091

В случае нарушения устойчивости вертикально вытянутая плазма в токамаке Т-15МД переходит в неконтролируемое вертикальное смещение (VDE), которое заканчивается тепловым пробоем с вероятностью последующего разрушения элементов камеры. Для предотвращения этого явления, оптимизации начальной фазы плазменного разряда и управления положением плазменного шнура необходима система стабилизации вертикального положения плазмы. Специальная обмотка будет противодействовать предотвращению вертикальных срывов плазмы в Т-15МД - HFC (Horizontal Field Coil). Особенности конструкции и применения этой катушки накладывают определенные требования на скорость и качество управления ее источником питания [1]. Для определения начала вертикального смещения используется набор датчиков вертикального потока, что позволяет обнаружить изменение поля плазменного шнура при вертикальном смещении.

Кроме того, особая структура контура управления позволяет использовать HFC для реализации функции дополнительной коррекции поля.

Это означает, что в управлении питанием HFC используются два асинхронных высокоскоростных регулятора, переназначающих приоритет системы управления в любой момент времени. Для получения оптимальных временных значений контур управления реализован в ПЛИС. В представленной работе описывается общий состав и технические решения, которые были выбраны для реализации источника питания HFC и контура управления. Описанные решения были смоделированы (как техническая составляющая источника питания, так и предложенный метод управления) с применением модели вертикальной неустойчивости плазмы, которая состоит из уравнений Кирхгофа для HFC [2] и уравнения движения плазмы. В предлагаемом проекте используются те же принципы, что и при реализации системы управления плазмой Т-15МД, поэтому новое решение легко интегрировать в существующую систему.

Литература

- [1]. В.А. Альхимович, Е.П. Велихов, В.А. Вершков, А.В. Звонков, Д.П. Иванов, В.И. Ильин, Н.А. Кирнева, Г.С. Кирнев, Д.А. Кислов, Г.П. Костин, В.А. Кочин, Б.В. Кутеев, В.М. Леонов, В.Э. Лукаш, С.Ю. Медведев, В.А. Михайличенко, А.В. Николаев, Г.Е. Ноткин, В.Д. Пустовитов, П.В. Саврухин, В.П. Смирнов, М.М. Соколов, В.С. Стрелков, Г.Н. Тилинин, А.С. Трубников, А.Е. Угроватов, П.П. Хвостенко, С.В. Цаун, А.Н. Чудновский. Инженерно-физическое обоснование реконструкции токамака Т-15 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 3, с. 3—15.
- [2]. М.С. Лурье, О.М. Лурье Имитационное моделирование схем преобразовательной техники // Красноярск: СибГТУ. 2007 г. 145 с.

2D И 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ПЛАЗМЫ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКОЙ НА СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М

Мещеряков А.И., Вафин И.Ю., Гребенчиков С.Е., Гришина И.А.

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

e-mail: meshch@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.092

На стеллараторе Л-2М проводится модернизация корпускулярной диагностики, измеряющей потоки нейтральных частиц из плазмы. Для корректной интерпретации спектров нейтралов плазмы, измеренных корпускулярной диагностикой, необходимо использовать радиальный профиль концентрации нейтралов и величину потока нейтралов из плазмы. Эти параметры можно получить, моделируя процессы проникновения в плазму нейтралов, летящих со стенки вакуумной камеры.

При моделировании проникновения в плазму нейтралов наиболее часто используется простая плоско-слоистая модель, в которой используются одномерные функции распределения нейтралов и ионов в пространстве скоростей [1]. Такое моделирование с одной пространственной координатой и одномерной функцией распределения по скоростям называют 2D моделированием. При использовании плоско-слоистой модели считается, что нейтралы перезарядки после столкновения могут лететь только вдоль одного направления – вперед или назад. Очевидно, эта картина далека от реальности. После перезарядки ионы могут приобретать скорость в любом направлении с равной вероятностью.

Более адекватно процессы перезарядки описываются моделью, в которой распределение нейтралов по скоростям после перезарядки является двумерным, а для описания плазмы используется одномерная цилиндрическая модель. Такое моделирование мы называем 3D моделированием. Авторам известно лишь небольшое количество работ, где проводится такое 3D моделирование, например, [2]. Возможно, это связано с тем, что при 3D моделировании расчеты существенно усложняются, хотя и обеспечивают более точное моделирование экспериментальных данных о потоке атомов перезарядки.

В данной работе проведено 2D моделирование потоков нейтральных частиц, по результатам которого установлено, что в стеллараторе Л-2М при средней плотности водородной плазмы, превышающей 8×10^{19} частиц в кубическом метре, возникает необходимость учета вклада рекомбинации в формирование распределения нейтралов по радиусу. При таких плотностях в центральных областях плазмы количество нейтралов, возникающих в результате радиационной рекомбинации, превышает количество нейтралов, образующихся в результате перезарядки.

В работе также проведено 3D моделирование потоков нейтральных частиц при тех же параметрах плазмы. Сравнение результатов 2D и 3D моделирования показало, что при 3D моделировании концентрация нейтралов перезарядки в центре плазменного шнура оказывается в 3,5 раза меньше, чем при 2D моделировании. По результатам более точного 3D моделирования оказалось, что необходимость учета вклада рекомбинации возникает уже при средних плотностях плазмы порядка 7×10^{19} частиц в кубическом метре.

Полученные результаты моделирования будут использоваться для интерпретации экспериментальных данных корпускулярной диагностики на стеллараторе Л-2М. В настоящий момент корпускулярная диагностика готова к работе: проведены необходимые калибровки энергетической ширины каналов и усилителей-дискриминаторов каналов.

Литература

- [1]. Ю.Н. Днестровский, Д.П. Костомаров // Математическое моделирование плазмы, М: Наука, 1993 г, стр. 236.
- [2]. А.Б. Извозчиков, М.И. Петров // Физика плазмы **2**, 212 (1976).

ПРОЯВЛЕНИЕ САМООРГАНИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ В СТЕЛЛАРАТОРЕ Л-2М В РЕЖИМЕ ЭЦР НАГРЕВА

Мещеряков А.И., Гришина И.А.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия,
meshch@fpl.gpi.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.093

Самоорганизация является фундаментальным свойством физических (и многих других) систем, которое проявляется в упорядочении параметров этих систем за счет внутренних факторов, без специфического внешнего воздействия. Плазма, удерживаемая в тороидальных магнитных ловушках, также подвержена действию процессов самоорганизации [1]. Одним из проявлений самоорганизации плазмы в тороидальных магнитных ловушках является формирование канонических профилей давления электронной компоненты.

В данной работе проанализировано удержание плазмы в стеллараторе Л-2М в течение импульса ЭЦР нагрева и после его выключения. Выделены основные фазы удержания энергии плазмы и основные механизмы потерь энергии в этих фазах. Выявлено влияние процессов самоорганизации на удержание плазмы и показано, в каких фазах удержания это влияние является определяющим.

Выделены четыре фазы удержания энергии в процессе нагрева и охлаждения плазмы в стеллараторе Л-2М в режиме ЭЦР нагрева. В фазе 1 происходит начальный нагрев плазмы. Фаза 2 является квазистационарной фазой. В фазе 3 после выключения импульса ЭЦР плазма охлаждается в отсутствие воздействия СВЧ излучения. После остывания края плазмы и прекращения взаимодействия плазмы со стенкой, начинается фаза 4 удержания плазмы.

Экспериментально установлено, что в фазе 1 не происходит формирования канонических профилей давления электронной компоненты. По-видимому, механизм формирования этих профилей связан с наличием взаимодействия плазмы со стенкой, которое является слабым в фазе 1 из-за наличия относительно холодного слоя плазмы на периферии плазменного шнура. Фаза 4 по свойствам аналогична фазе 1.

В фазе 2, когда холодная периферия прогревается, плазма и стенка начинают активно обмениваться потоками частиц. Процессы самоорганизации стремятся установить канонический профиль давления, при котором потери из плазмы минимальны, а внешнее воздействие со стороны СВЧ излучения стремится вывести плазму из состояния с минимальными потерями. В результате в плазме устанавливаются профили давления, близкие к каноническим.

В фазе 3 после выключения СВЧ нагрева плазма начинает свободно релаксировать в отсутствие внешнего воздействия. В этой фазе устанавливаются канонические профили давления, а тепловые потери являются минимальными для каждого энергосодержания. Экспериментально установлено, что при уменьшении энергии плазмы общие тепловые потери уменьшаются пропорционально кубу энергосодержания плазмы. В этой фазе самоорганизация оказывает определяющее действие на удержание плазмы. Для фазы 3 получен скейлинг для энергетического времени жизни, который весьма близок к скейлингу стелларатора Л-2М для квазистационарной фазы. Авторы считают, что вид зависимости энергетического времени жизни от параметров плазмы и установки (скейлинг) определяется процессами самоорганизации плазмы в фазах 2 и 3.

Литература

- [1]. Ю.Н. Днестровский, Самоорганизация горячей плазмы (НИЦ Курчатовский институт, Москва, 2013).

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛОННОЙ МОДЫ В ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЕ С ПРОВОДЯЩИМИ ТОРЦАМИ

^{1,2}Константинов С.Е., ^{1,2}Беклемишев А.Д.

¹*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, s.konstantinov@g.nsu.ru*

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.094

Линейные осесимметричные ловушки являются наиболее простым способом для магнитного удержания плазмы. Удержание в таких системах ограничено наличием магнитной ямы, из-за которой возникает диамагнитная неустойчивость. Одним из способов подавить поперечный перенос вследствие этой неустойчивости является режим вихревого удержания [2], в котором при помощи стеночных потенциалов удается создать в области удержания зону вихревого течения, в которой происходит нелинейное насыщение желобковых мод. В работах [1-2] описано влияние проводящих торцов на удержание в магнитных системах с низким давлением в электростатическом приближении. В данной работе производится обобщение, позволяющее учесть влияние проводящих торцов на систему с продольным током, возмущающим магнитное поле.

В работе получена система уравнений, обобщающая уравнения [1] на трехмерный случай, так что диамагнитная неустойчивость образуется преимущественно продольным током, а давление плазмы остается несущественным. Модель построена на сокращенной МГД [3] и использует параксиальное равновесие, что позволяет рассматривать различные магнитные конфигурации. Процедура усреднения вдоль силовой линии введена не по всей плазме, а по нескольким продольным составляющим. Это дает возможность исследовать не только электростатические (желобковые) возмущения, но и баллонные, рассмотреть влияние режимов со свободной и проводящей границей на удержание, а также получить критерий устойчивости.

Литература

- [1]. 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
- [2]. Beklemishev A.D., Bagryansky P.A., Chaschin M.S., Soldatkina E.I. Vortex Confinement of Plasmas in Symmetric Mirror Traps. *Fusion Science and Technology*, 2010, 57, 351-360
- [3]. Б.Б. Кадомцев, О.П. Погуце, Э.И. Юрченко. Нелинейные МГД-уравнения и диссипативные баллонные моды — М. : ИАЭ, 1983. — 20 с. : граф.; 21 см.

ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ ДЛЯ ГДЛ НА ОСНОВЕ КООКСИАЛЬНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Колесников Е.Ю.

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.095

В данной работе рассмотрен источник плазменной струи для поперечной инъекции плазмы в ГДЛ. Для проникновения плазмы в ловушку при инъекции перпендикулярно силовыми линиям магнитного поля давление струи плазмы должно быть порядка давления магнитного поля ловушки. Это накладывает требования на минимальную удельную энергию плазменной струи.

Струя плазмы создается и ускоряется с помощью коаксиального импульсного ускорителя, также известного как пушки Маршалла.

Параметры плазменной струи измерялись с помощью интерферометра Майкельсона. С использованием двух оптических окон и двух интерферометров производилось одновременное измерение плотности и скорости струи. Плотность измерялась по сдвигу фаз в интерферометре, скорость оценивалась по временной задержке между пролетом плазмы мимо оптических окон, расположенных последовательно на пути плазмы на расстоянии 20 см. На выходе из ускорительного канала на пути струи ставился пьезодатчик, что позволяло напрямую наблюдать давление струи. Кроме того, для оценки полной энергии струи использовался калориметр в виде медного конуса с терморезистором.

Результаты одновременных измерений интерферометром и пьезодатчиком выявили приход ударного воздействия на пьезодатчик раньше, чем плазма проходит оптические окна для интерферометра. При этом два оптических окна расположены ближе к источнику плазмы на расстоянии 20 см друг от друга, а пьезодатчик находится после них на расстоянии 35 см от последнего окна. Кроме того, сигнал на пьезоэлемент приходит с задержкой порядка 10 нс из-за керамического стержня длиной 10 см, через который удар от плазмы передается на пьезокристалл. Таким образом, сигнал на пьезодатчике появляется значительно раньше, чем ионизированная плазма пересекает луч интерферометра. Это говорит о наличии в струе компоненты, которая содержит значительную долю энергии, но при этом невидима на интерферометре. Наиболее вероятно, что этой компонентой является нейтрализованная плазма — те разогнанные ионы, которые захватили электрон.

Измерения полного энергосодержания струи вещества дают оценку снизу на КПД в 20-30%.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ИОНОВ, ПОКИДАЮЩИХ УСТАНОВКУ ГДЛ С УКОРОЧЕННОЙ МАГНИТНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ

Коробейникова О.А., Мурахтин С.В., Багрянский П.А., Яковлев Д.В.,
Солдаткина Е.И.

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.096

Экспериментальные исследования по удержанию плазмы с субтермоядерными параметрами проводятся на установке ГДЛ (газодинамическая ловушка) [1]. Для создания высокоэнергетичных ионов и нагрева плазмы используется наклонная по отношению к оси установки инжекция мощных атомарных пучков с малой угловой расходимостью. Особенностью ГДЛ является то, что торможение горячих ионов происходит много быстрее их углового рассеяния. Другой важной особенностью установки ГДЛ является высокое значение относительного давления плазмы β^2 .

В настоящее время на установке ГДЛ проводятся эксперименты в новой конфигурации с укороченным магнитным полем. Плазма в ловушке состоит из двух компонент: относительно холодной “мишенной” плазмы с температурой около 200 эВ и плотностью $2.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и быстрых ионов со средней энергией 10 кэВ, плотностью в точках останова $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и энергосодержанием более 2 кДж, образующихся при захвате инжектируемых атомов.

Важной задачей является теоретическое и экспериментальное изучение процесса удержания горячих ионов в осесимметричном пробкотроне в режимах с высоким значением β и анизотропным распределением горячих ионов. В ряде экспериментальных выстрелов наблюдается развитие альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости, регистрируемой магнитными зондами, расположенными вблизи точки останова. Одним из способов получения дополнительной информации о влиянии неустойчивости на продольные потери является изучение энергетического спектра ионов, двигающихся вдоль силовых линий магнитного поля в расширителе. Для измерения потоков ионов, покидающих плазму, применяются многоканальные атомные анализаторы [2]. В баке расширителя был установлен доработанный электростатический энергоанализатор на основе пятиканального анализатора атомных частиц, разработанного в ФТИ им. А.Ф.Иоффе [3]. Регистрируемая плотность тока ионов позволила отказаться от эксплуатации энергоанализатора в счётном режиме с использованием ВЭУ и перейти в потоковый режим с заменой ВЭУ на цилиндры Фарадея, что заметно упростило схему регистрации.

Литература

- [1]. Ivanov A.A., Kotelnikov I.A, Kruglykov E.P. et al. In Proc. Of XVII Symp.on Fusion Technology, Rome, Italy, v.2. (1992) 1394.
- [2]. Давыденко В.И., Иванов А.А., Вайсен Г. “Экспериментальные методы диагностики плазмы”. МО РФ НГУ. 1999. стр. 57-80.
- [3]. Афросимов В.В., Березовский В.Л., Гладковский И.П. и др. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 1. стр, 56-63

² β - отношение поперечного давления плазмы к давлению вакуумного магнитного поля.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ СРЫВА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЁРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Богданов А.М., Капралов В.Г., Кривошеев А.Н.

СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: bogdanov_am@spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.097

Управление гашением плазменного разряда является актуальной проблемой исследований по управляемому термоядерному синтезу. Необходимость предсказания срыва плазменного разряда с достаточным упреждением для запуска систем его предотвращения и/или смягчения показана в работах [1, 2]. Сигнал вероятности срыва через определенный промежуток времени нужно формировать в течение всего разряда. Триггер запуска системы гашения плазменного разряда вырабатывается, когда вероятность срыва превысит пороговое значение.

Разработаны системы массивной газовой инжекции с подвижным клапаном, для активации которого требуется время около 4 мс. Это требует предсказания срыва плазмы с упреждением не менее 5 мс.

Существует несколько методик предсказания срыва. Из наиболее часто используемых стоит выделить нечеткую логику, различные виды нейронных сетей, машины опорных векторов, байесовские алгоритмы. Для расчета вероятности срыва в системах нечеткой логики происходит переход к лингвистическим переменным, которые обрабатываются с помощью базы продукционных правил, а затем выполняется переход к численному значению выходных переменных.

В случае применения нейронных сетей входные сигналы объединяются в векторный сигнал, задается топология нейронной сети, как правило, представляющей направленный граф, и на основе обучающих примеров подбираются весовые коэффициенты, связывающие узлы графа.

В машине поддержки опорных векторов выполняется отображение обучающих данных в N-мерное пространство, в котором возможно разделение данных на классы гиперплоскостью и задача предсказания сводится к задаче классификации.

Первый подготовительный этап включает отбор измеряемых сигналов и расчетных величин, которые будут использоваться в реальном времени для вычисления вероятности срыва через заданное время [3, 4]. Сначала определяются доступные для измерения в реальном времени сигналы установки и расчетные параметры. Затем выполняется корреляционный анализ с тем, чтобы выявить сильно коррелирующие величины и оставить в формируемом наборе только одну из них.

Для решения задачи предсказания срыва плазменного разряда предложена методика применения сверточной нейронной сети. Дополнительно появляется возможность использовать сигнал вероятности срыва для управления положением оборудования с целью защиты от тепловых нагрузок или ионизирующих излучений, а также для формирования сигналов готовности для других диагностик и элементов системы управления токамаком.

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]. Kapralov V.G. et al., Journal of Physics: Conf. Series, 2017, **907**, 1, 012010.
- [2]. Dremin M.M. et al., Problems of Atomic Science and Tech., Ser. Th. Fusion, 2012, **4**, 58.
- [3]. Kapralov V.G. et al., Journal of Physics: Conf. Series, 2017, **907**, 1, 012027.
- [4]. Gusev V.R. et. al., Proc of the 21st IAEA FEC. 2006, **16**, 21.

ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОННОГО ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА В ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЕ

Чувакин П.А., Господчиков Е.Д.

*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия,
chuvakin.pavel@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1. 279

Резонансный характер взаимодействия электромагнитной волны СВЧ диапазона с горячей магнитоактивной плазмой приводит к тому, что в области резонанса может нарушаться ВКБ-приближение. Наиболее практически интересным эффектом такого нарушения может быть отражение греющей электромагнитной волны от области электронного циклотронного резонанса. В реальном эксперименте по нагреву термоядерной плазмы в тороидальной магнитной ловушке мощным миллиметровым излучением такое отражение даже если и не меняет значительным образом эффективность нагрева, может достаточно сильно влиять на работу СВЧ диагностик.

В данной работе была рассмотрена задача об отражении необыкновенной волны распространяющейся поперек магнитного поля от области резонанса на второй гармонике электронной циклотронной частоты. Для такой задачи характерны как совместное влияние эффектов пространственной дисперсии и пространственной неоднородности, так и линейное взаимодействие электромагнитных и квазиэлектростатических волн [1]. В результате численного полноволнового решения задачи с тензором диэлектрической проницаемости, включающем релятивистские поправки [2] и корректно поставленными граничными условиями [3], были найдены распределение электромагнитного поля в окрестности резонанса и зависимость коэффициента отражения от параметров резонансной области.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № 0030-2021-0002) и договора с ФТИ им. Иоффе № ОК 44-2-21 от 06/08/2021.

Литература

- [1]. Г. М. Батанов, В. Д. Борзосеков, Л. В. Колик [и др.] // Физика плазмы. 2013. Т. 39, № 11. С. 987
- [2]. А. С. Сахаров // Физика плазмы. 2017. Т. 43, № 11. С. 903-909.
- [3]. А. Г. Шалашов, Е. Д. Господчиков // Успехи физических наук. 2011. Т. 181, № 2. С. 151-172.

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ»**

**SECTION
«INERTIAL FUSION»**

ФОРМИРОВАНИЕ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ТОПЛИВА В ДВИЖУЩИХСЯ МИШЕНЯХ УДАРНОГО ПОДЖИГА

Александрова И.В., Корешева Е.Р.

*Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия,
koreshevaer@lebedev.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.098

В докладе обсуждаются перспективы формирования криогенных мишеней ударного поджига на основе метода FST, предложенного и развитого в Физическом институте им. П.Н. Лебедева (ФИАН) [1]. Такие мишени предназначены для исследования альтернативных схем зажигания топлива на лазерных установках инерциального термоядерного синтеза (ИТС) среднего и мегаджоульного уровня. По существу, это мишени прямого облучения с низким начальным аспектным отношением (так называемые SI-мишени), поскольку предполагается, что именно такие мишени являются наиболее устойчивыми в процессе сжатия топлива по схеме ИТС [2].

Представлены результаты моделирования основных стадий реализации метода FST (FST это free-standing target, т.е. работа со свободной мишенью): 1) разгерметизация мишенного контейнера (МК), 2) формирование твёрдого топливного слоя внутри бесподвесных оболочек, свободно движущихся в спиральном канале формирования (КФ). Получены следующие результаты:

– Определена температура T_{diff} , ниже которой обратная диффузия газа из оболочки пренебрежимо мала для исследуемого класса полимеров, в том числе: для полистирола – $T_{diff} < 100$ К, для полиимида и GDP-полимера – $T_{diff} \sim T_{cp}$, где T_{cp} – критическая температура топливного вещества.

– Определена температура разгерметизации T_d , при которой возможно удаление топлива из МК без разрушения оболочек внутренним давлением: (а) при $T_d = 45$ К и прочности материала оболочек на растяжение $\sigma = 110$ МПа удаляется топливный газ, находящийся в МК вне оболочек; (б) для низко прочных оболочек ($\sigma < 50$ МПа) разгерметизация МК может быть проведена только при температуре $T_d < T_{cp}$ для обоих видов топлива (D_2 и D-T смесь).

– После разгерметизации МК и снижении температуры оболочек до $T_{in} \leq T_d$, оболочки с топливом инжектируются под действием гравитации в КФ для формирования в них твёрдого криогенного слоя по методу FST. Расчеты показали, что время формирования не превышает 30 сек для начальной температуры SI-мишени $T_{in} = 30$ К, и 22 сек для $T_{in} = 26$ К для обоих видов топлива (D_2 и D-T смесь).

– Определены оптимальные параметры КФ для производства SI-мишеней при их поточном движении внутри КФ: (а) КФ в виде двойной спирали (угол захода $\alpha = 11.5^\circ$, радиус и высота спирали $R = 21$ мм и $H = 450$ мм) или (б) тройной спирали ($\alpha = 16.7^\circ$, $R = 21$ мм и $H = 880$ мм). Выполнена серия контрольных экспериментов, которая подтвердила выводы проведенных расчетов: времена качения составили $\tau_{rol} = 23.5$ сек (двойная спираль) и $\tau_{rol} \sim 35$ сек (тройная спираль).

Литература

- [1]. Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Koshelev E.L. Nuclear Fusion, 2021, **61** (12), 126009
- [2]. Brandon V. et al. Nuclear Fusion, 2014, **54** (8), 083016

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОПЛОТНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ СЕТОК АЦЕНАФТИЛЕНА, АЛЬФА-МЕТИЛСТИРОЛА И ХИТОЗАНА

Пастухов А.В., Акунец А.А., Перваков К.С., Кувшинов И.Р., Громов А.И., Мордвинцев И.М., Пузырев В.Н., Рупасов А.А., Саакян А.Т., Борисенко Н.Г.

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия, e-mail: avpast@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.099

Изучение взаимодействия мощного лазерного излучения с наноструктурированными материалами является актуальной задачей для фундаментальной науки и, в перспективе, для энергетики России. Цель данной работы - получение малоплотных полимерных мишеней, изучение их пористой структуры и их свойств при лазерном облучении. Полимерные материалы с малой плотностью были получены на основе синтезированных сверхсшитых полимеров альфа-метилстирола (ПАМС) и аценафтилена с использованием бис-хлорметильного производного дифенила [1, 2]. Синтез ПАМС проведен методом катионной полимеризации при -70°C , полиаценафтилен синтезирован методом термической радикальной полимеризации аценафтилена. Методом гель-проникающей хроматографии установлено, что образцы полученных линейных полимеров имеют широкое распределение по молекулярным массам от 10^4 до 10^6 с максимумами $4.4 \cdot 10^5$ и $3.6 \cdot 10^4$. Малые плотности от 30–60 до 160–180 мг/см³ получены с лиофильным высушиванием гидрогелей сшитого хитозана и сверхкритической сушкой в диоксиде углерода органогелей сверхсшитых полимеров. Для определения параметров пористой структуры использовались данные измерений сорбции азота при 77 К (изотермы сорбции). Расчеты проведены для цилиндрической модели пор методами ВЈН (теория капиллярной конденсации) и DFT (теория функционала плотности, метод «quenched solid density functional theory») [3]. Наиболее развитую систему микропор размером 2–3.5 нм имеют образцы сверхсшитого полиаценафтилена. Удельная поверхность пор этого полимера достигает 1800 м²/г, а их суммарный объем 5.5 см³/г (поры до 140 нм). Установлено, что пористая структура полученных полимеров имеет три фракции пор, размером 2–3.5 нм, 3.5–5 нм и 10–30 нм. В зависимости от типа исходного линейного полимера объемная доля 1, 2, и 3-ей группы пор в образцах, высушенных в диоксиде углерода, может достигать 20, 10 и 65 % от суммарного объема пор размером 2–50 нм. При исследовании малоплотных материалов на основе хитозана методом низкотемпературной сорбции азота микро и мезопор менее 50 нм не обнаружено.

Первые эксперименты по облучению описанных малоплотных мишеней выполнены на лазере КАНАЛ-2 в ФИАНе. Авторы благодарны за финансирование в рамках Новой научной группы 55 ФИАН.

Литература

- [1]. Davankov V.A., Tsyurupa M.P. *Hypercrosslinked Polymeric Networks and Adsorbing Materials*. Elsevier, Amsterdam, Boston, etc., 2011, 670 p.
- [2]. Пастухов А.В., Акунец А.А., Борисенко Н.Г. Способ получения малоплотных сверхсшитых полимеров монолитного типа. Патент России ИЗ№2738607 С1, 14.12.2020 (БИ №35, 2020).
- [3]. Lowell S., Shields J.E., Thomas M.A., Thommes M. *Characterization of Porous Solids and Powders: Surface Area, Pore Size, and Density*, Springer, 2004, 347 p.

К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ТЕРМОЯДЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ МИШЕНЕЙ ПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МЕГАДЖОУЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 0.35 МКМ И 0.53 МКМ

Бакуркина Е.С., Борецких Д.В., Дембовский Д.В., Карлыханов Н.Г., Лыков В.А.,
Рыкованов Г.Н., Соколов Л.В., Черняков В.Е., Шушлебин А.Н.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Россия,
e-mail: v.a.lykov@vniitf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.100

В экспериментах с мишенями непрямого облучения на установке NIF получен выход термоядерной энергии $E_{ТЯ} \approx 1.37$ МДж при энергии лазера $E_L \approx 1.92$ МДж [1]. Возможность термоядерного зажигания мишеней прямого облучения еще предстоит выяснить. Основными проблемами при этом подходе являются развитие гидродинамических неустойчивостей и прогрев мишени быстрыми электронами (БЭ), возникающими в процессах двухплазмонного распада (ДПР) и вынужденного Рамановского рассеяния (ВРР) лазерного излучения (ЛИ) [2]. В докладе представлены результаты расчетов мишеней прямого облучения, проведенных в РФЯЦ-ВНИИТФ с целью изучения возможности достижения их термоядерного зажигания на мегаджоульных установках с длиной волны лазерного излучения $\lambda=0.35$ мкм и $\lambda=0.53$ мкм.

Расчеты однокаскадных мишеней прямого облучения, выполненные недавно по одномерной программе ЭРА с учетом переноса быстрых электронов в спектральном кинетическом приближении, подтвердили основной вывод работы [3], что генерация БЭ в процессах ДПР и ВРР будет препятствовать достижению термоядерного зажигания таких мишеней на установках с излучением во 2-ой гармонике Nd-лазера. При использовании ЛИ с $\lambda=0.35$ мкм, по-видимому, можно будет подавить генерацию БЭ, если использовать для мишени абляторы типа SiO_2 . В однокаскадных мишенях прямого облучения велика опасность гидродинамического развития коротковолновых возмущений, инициированных процессами филаментации ЛИ в плазме. Так двумерные расчеты однокаскадной мишени дали снижение выхода термоядерной энергии в ~ 3 раза при амплитуде 60-ой гармоники возмущения в симметрии поглощенной мишенью энергии ЛИ на уровне $\delta q_a/q_a \sim 0.1\%$.

В РФЯЦ-ВНИИТФ выполнены расчеты двухкаскадной мишени прямого облучения, предложенной в работе [4]. Для такой мишени ослабевают требования к длине волны ЛИ и амплитуде коротковолновых возмущений в симметрии поглощенной мишенью лазерной энергии. Наиболее опасными для мишени [4] являются возмущения в однородности поглощенной энергии ЛИ с номерами гармоник $l \sim 10-20$, амплитуда которых не должна превышать $\delta q_a/q_a \approx 0.5-1\%$. Для двухкаскадных мишеней существует проблема перемешивания ДТ-топлива и материала внутренней оболочки. Одномерные расчеты, выполненные для мишени [4] без учета генерации БЭ, дали выход нейтронов $N_{DT} \approx 1.8 \cdot 10^{18}$ и запас по термоядерному зажиганию [3] $W_Q \approx 6$. Учет перемешивания по $k\epsilon$ -модели с константами, отвечающими автотопливной «постоянной» $\alpha_b \approx 0.04$, привел к снижению величин W_Q и N_{DT} в 2-3 раза. Однако остается открытым вопрос о применимости эмпирических моделей турбулентного перемешивания для моделирования мишеней ИТС, поскольку числа Рейнольдса в этом случае не велики. Будущие эксперименты с двухкаскадными мишенями помогут дать ответ на этот вопрос.

Литература

- [1]. Kritcher A.L., Zylstra A.B., Callahan D.A., et al., Phys. Rev. E (2022) **106**, 025201
- [2]. Craxton R.S., Anderson K.S., Boehly T.R., et al., Phys. Plasmas (2015) **22**, 110501
- [3]. Бакуркина Е.С., Карлыханов Н.Г., Лыков В.А., Рыкованов Г.Н., Химич И.А., Черняков В.Е., Ядерная физика и инжиниринг (2019) **10** (3), 271–284
- [4]. Hu S.X., Epstein R., Theobald W., et al., Phys. Rev. E (2019) **100**, 063204

МГД-МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО РАЗВИТИЯ “СОСИСОЧНОЙ” НЕУСТОЙЧИВОСТИ Z-ПИНЧА

Гаранин С.Ф., Долинский В.Ю.

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская обл., Россия,
e-mail: VYuDolinskij@vniief.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.101

С помощью двумерных осесимметричных МГД-расчетов изучалось развитие перетяжки Z-пинча с учетом коротковолновых малых возмущений, т.е. с учетом развития двумерной турбулентности. Влияние магнитной диффузии и теплопроводности предполагалось малым и существенным лишь в зонах, где их необходимо учитывать (на границах плазма/вакуум и вблизи оси). Рассматривалась эволюция цилиндрического плазменного столба с синусоидальным возмущением границы и малыми случайными возмущениями плотности под действием постоянного тока. Расчеты показали, что из-за развития турбулентности формирования перетяжки с неограниченно уменьшающимся радиусом и вытеканием плазмы из зоны сжатия не происходит. Некоторое влияние на максимальные параметры сжатия оказывает амплитуда начального возмущения, поскольку при ее увеличении перетяжка развивается быстрее и коротковолновые возмущения успевают нарасти до меньшего уровня и слабее закрывают зону сжатия. При сжатии перетяжки не происходит и генерации высоких напряжений вблизи оси, что могло бы способствовать формированию ионных пучков и генерации нейтронов за счет ускорительного механизма. В расчетах довольно быстро устанавливается МГД равновесное состояние на границе перестановочной неустойчивости. Из-за отсутствия неограниченного сжатия в перетяжке Z-пинча зажечь плазму в перетяжке, по-видимому, затруднительно даже при мультимегаамперных токах источника.

МОДИФИКАЦИИ УПРОЧНЯЕМЫХ МЕТАЛЛОСОДЕРЖАЩИХ НАНОСЛОЁВ ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ МИШЕНЕЙ

Громов А.И., Акунец А.А., Борисенко Н.Г., 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.2023.50.2023.1.1.102

Упрочняемые слои из металлосодержащих наноматериалов представляют интерес при проведении экспериментов с лазерными мишенями. Такие слои более прочны при перемещениях и более стойки в начале откачки в вакуумной камере лазерной установки. Также при упрочнении может изменяться первоначальный удельный вес наноматериала при некотором его оседании. Изготовление нанодисперсий и идеи упрочнения параметров слоя из нанопорошков металла разрабатывались в ФИАН уже несколько лет. Проведён ряд экспериментов по изготовлению и контролю подобных слоёв [1, 2]. Слои с упрочнением получаются из нанопорошков Au, Ag и Cu, сделанных по нашей, длительное время отработываемой технологии, путём испарения или возгонки металла и последующего длительного осаждения наноматериала в объёме инертного газа. Размеры наночастиц и плотность слоя зависят от ряда изменяемых параметров. Упрочняемые слои нанодисперсного металла начинают сплавляться в отдельной термической установке при ~ 0.3 и даже менее от температуры плавления исходного вещества в зависимости от размера наночастиц. Большое значение имеют фазовые переходы. Для получения композитных малоплотных материалов с микрочастицами серебра в качестве полимерной матрицы использовали природный полисахарид хитозан [3]. Частицы серебра в виде дисперсии, полученной методом химического осаждения, вводили в раствор хитозана. Для получения композитного гидрогеля хитозан сшивали диальдегидом. Композитные полимерные материалы с малой плотностью 30-60 мг/см³ получены сублимационным высушиванием криогидрогелей сшитого хитозана. Содержание серебра в полимерной матрице составляло от 8 до 18 масс. %. Полученные нами в результате проведённых разработок образцы изучались оптическими и рентгеновскими методами, а также сканирующей электронной микроскопией. Проведенные исследования и полученные, в том числе и с упрочнением, слои из наноматериалов применяются в текущих и могут быть полезны для будущих экспериментов с лазерными мишенями [4,5].

Работа выполнена в рамках проекта гранта РФФИ № 15-52-46116.

Литература

- [1]. L.A. Borisenko, I.V. Akimova, A.A. Akunets, A.I. Gromov, A.S. Orekhov. Metal produced as nano-snow layers for converters of laser light into X-ray for indirect targets as intensive EUV sources / Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2014. V.299. N2. p.955.
- [2]. A.S. Orekhov, 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.
- [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: a mini-review / Cellulose, 2016, 23(4), p.2273.
- [4]. 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, N8, 084001.
- [5]. А.И. Громов, А.А. Акунец, Н.Г. Борисенко. "Метод получения малоплотных нанометаллических покрытий для лазерных мишеней" Сборник аннотаций докладов Международной научной премии Металловед года. Издание 2(2021), с.15.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ГАЗА НА СТРУКТУРУ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА.

¹Харрасов А.М., ¹Крауз В.И., ²Ламзин С.А., ²Додин А.В., ¹Мялтон В.В.,
¹Ильичев И.В., ³Медведев М.А.

¹НИЦ «Курчатовский институт, г. Москва, Россия, kharrasov_am@nrcki.ru

²ГАИШ МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, lamzin@sai.msu.ru

³ФИАН им. Лебедева, Москва, Россия, medvedevma@lebedev.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.103

В работе представлены результаты лабораторного моделирования джетов молодых звезд на установке плазменный фокус ПФ-3 в НИЦ «Курчатовский институт». Изучался вопрос о причинах, приводящих к различию в пространственной структуре плазменных выбросов при разряде в газах разного химического состава – неон, гелий и гелий с примесью неона.

Исследования проведены на уровне 35 см от плоскости анода, места пинчевания разряда и предположительной генерации плазменного потока. В качестве диагностических средств использовались: двойные световые коллиматоры для определения средней и мгновенной скорости плазменного выброса, а также синхронизации других диагностик с процессами в камере; кадровый ЭОП-регистратор для изучения структуры плазменного потока; щелевая камера К-008, позволявшая получать временные развёртки на трёх уровнях ($z=30.5$ см, 35.0 см и 39.5 см относительно анода); лазерное зондирование с получением теневых и шпирен фотографий.

Было найдено, что наиболее структурированным является поток в случае чистого неона: передняя кромка выброса состоит из многочисленных уплотнений, что по внешнему виду делает его весьма похожим на уплотнения в джетах молодых звезд – т. н. объектах Хербига-Аро. Наименее структурированным выглядит выброс в случае чистого гелия. Проведённые исследования по влиянию неона на структуру выброса показали, что добавка к гелию всего 1 % неона практически не влияет на скорость потока, но существенно меняется форма головной части выброса, в нем становится заметной мелкомасштабная структура. Несколько потоков, наблюдаемые в ряде экспериментов, могут быть связаны с множественной генерацией на стадии пинчевания плазмы. С помощью лазерной шпирен диагностики была определена структура фронта ударной волны. В случае рабочего газа неона форма передней части струи представляет собой конус с округлой вершиной с радиусом около ~ 5 мм. На боковой поверхности конуса имеется множество мелкомасштабных неоднородностей ($\sim 1-5$ мм), на которых дифрагирует лазерный пучок, проходящий сквозь плазменную струю. В случае рабочего газа гелия фронт ударной волны гладкий, без мелкомасштабных неоднородностей. За фронтом ударной волны в гелии регистрируется повышенная плотность вещества.

Оценки показывают, что наблюдаемые явления могут быть связаны с различием эффективности охлаждения исследуемых газов, как в самом плазменном выбросе, так и в ударной волне, возникающей при его движении через фоновый газ. Возможно, что основной причиной появления неоднородностей в плазменном сгустке, как и в случае объектов Хербига-Аро, являются различного рода неустойчивости, которые развиваются при наличии эффективного радиационного охлаждения. В случаях с несколькими потоками в составе одного выброса столкновение ударных волн, порождаемых каждым из сгустков, приводит к возникновению уплотнений, что также способствует формированию кружевной структуры плазменного выброса.

Работа выполнена в рамках Программы 10 Экспериментальная Лабораторная Астрофизика и Геофизика НЦФМ.

РАСЧЁТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОХОЖДЕНИЯ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СЛОИСТУЮ МИШЕНЬ

¹Бутусов Е.В., ²Гуськов С.Ю., ^{2,3}Кучугов П.А.

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

³Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.104

Представлены результаты расчётно-теоретических исследований эффекта увеличения давления при распространении ударной волны через систему плоских слоёв вещества в контексте практического применения к задачам инерциального термоядерного синтеза и уравнения состояния вещества. Основное внимание уделяется генерации мощной ударной волны вследствие воздействия на многослойную мишень мощного лазерного импульса с интенсивностью порядка 10^{14} Вт/см² в условиях экспериментов [1]. Развита аналитическая модель расчёта термодинамических параметров вещества за фронтом ударной волны, проходящей через контактный разрыв двух сред и распространяющейся из вещества с меньшей плотностью в вещество с большей плотностью [2]. Исследовано влияние вакуумного промежутка, разделяющего слой малоплотного вещества и слой плотного вещества, на термодинамические параметры ударной волны в плотном веществе. Анализ результатов численных расчётов показал, что в случае, когда падающая волна является стационарной, наличие зазора оказывает негативное влияние - наблюдается уменьшение степени увеличения давления в прошедшей волне по сравнению со случаем отсутствия зазора. В том случае, когда падающая волна является лазерно-индуцированной, вакуумный зазор способен повысить степень увеличения давления в ударной волне, причём максимальный усилительный эффект зазор оказывает в случае, когда за время, равное длительности лазерного импульса, ударная волна успевает достигнуть поверхности плотной составляющей части мишени. Например, при передаче давления в алюминий такое увеличение может достигать 1.8 раз. Результаты исследований сопоставляются с экспериментальными данными [1]. Установленные зависимости степени увеличения давления прошедшей в слой плотного вещества ударной волны от ширины зазора и от длительности лазерного импульса могут быть использованы для выбора и оптимизации параметров экспериментов по генерации мощных ударных волн.

Работа выполнена в интересах научной программы по направлению «Физика высоких плотностей энергии».

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]. Batani D., Balducci A., Nazarov W. и др., Use of low-density foams as pressure amplifiers in equation-of-state experiments with laser-driven shock waves //Physical Review E. – 2001. – Т. 63. – №. 4. – С. 046410.

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ДИСПЕРГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ФОКУСИРУЮЩИХ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОМЕТРОВ

Баронова Е.О.

НИИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия, baronova04@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.105



Рентгеновская спектроскопия - эффективный инструмент для изучения параметров плотной высокотемпературной плазмы. Так, относительные интенсивности некоторых пар рентгеновских линий и их форма содержат информацию об электронной температуре и плотности плазмы, электромагнитных полях и т.д. Регистрация рентгеновских спектров с высоким разрешением обычно осуществляется с помощью фокусирующих спектрометров, например, типа Йоганна. Диспергирующий элемент такого спектрометра - брэгговский кристалл (кварц, германий, кремний, слюда), изогнутый по цилиндрической, сферической, тороидальной поверхностям. Наилучшее спектральное разрешение достигается при использовании кристаллов, соединенных с вогнутыми подложками посредством так называемого оптического контакта, при котором скрепляющими силами являются силы Ван-дер-Ваальса. Отсутствие слоя клея неопределенной толщины с вкрапленными в него частицами пыли, приводящими к искажению поверхности кристалла и возникновению дополнительного механического напряжения, позволяет обеспечить наиболее высокое качество отражающей поверхности диспергирующего элемента. Спектральное разрешение прибора определяется оптическими и дисперсионными качествами изогнутого кристалла. Оптимальное спектральное разрешение прибора, обеспечиваемое его диспергирующим элементом, должно быть исследовано. Настоящая работа описывает результаты характеристики сферически изогнутого кристалла кварца на оптическом контакте, (срез 11-20), размерами 40X100 мм, с радиусом изгиба $R = 3930$ мм. Целью характеристики является оценка $\Delta\theta$ - углового разрешения кристалла, где $\Delta\theta = \Delta\lambda/\lambda/\cos\theta$, θ - угол Брэгга. Оптическое качество кристалла изучено экспериментально и оценено численно, получено $\Delta\theta_{\text{opt}} = 2.5 \cdot 10^{-4}$ rad. Дифракционное качество исследовано с помощью двухкристального дифрактометра: кривая отражения измерена шаг за шагом вдоль поверхности кристалла, а также вдоль всей его поверхности. Кроме этого, создан численный код для расчета кривой отражения изогнутых кристаллов, основанный на теории Такаги-Топэна. Как эксперимент, так и численные оценки подтвердили, что ширина кривой отражения изогнутого кристалла $\Delta\theta_{\text{dif}} = 7 \cdot 10^{-5}$ rad превышает ширину кривой отражения плоского образца. Окончательное разрешение, обеспечиваемое данным элементом, оценено $\Delta\theta = 3.2 \cdot 10^{-4}$ rad. Для достижения такого разрешения кристалл и детектор должны быть в их точных позициях на круге Роуланда. Обычно предполагается, что радиус атомных плоскостей кристалла равен радиусу подложки, используемой для его изгиба. В данной работе предложена простая схема для измерения радиуса атомных плоскостей кристалла. Было показано, что радиус подложки ($R=3930$ мм) отличается от радиуса изгиба атомных плоскостей (3827 мм). Обсуждаются возможные причины этого эффекта.

О НАГРЕВЕ ИОНОВ В Z-ПИНЧАХ

¹Вихрев В.В., ¹Баронова Е.О., ²Фролов А.Ю.

¹НИЦ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия, e-mail: vikhrev@mail.ru

²МГТУ имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, e-mail: frolov@bmstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.106

В работе проведен обзор и дан теоретический анализ методов нагрева плазмы до термоядерных значений в Z-пинчах. К этим методам относятся 1) нагрев за счет джоулевого тепловыделения в электронной компоненте и передачи этой тепловой энергии ионам, 2) нагрев ионов из-за их ускорения их в омическом поле разряда пинча, и 3) нагрев ионов, вызванный ростом величины магнитного поля в плазме пинча [1-4].

Показано, что для Z-пинчей ускорение ионов в результате сжатия плазмы магнитным полем происходит до более значительных энергий по сравнению с энергией, получаемой ионами от электронов или из-за ускорения их в омических полях. Электрическое поле, возникающее из-за увеличения напряженности магнитного поля в плазме пинча, ускоряет ионы в направлении вдоль их движения по ларморовской окружности [4]. В результате роста величины магнитного поля в плазме пинча происходит увеличение энергии ионов пропорционально уже имеющейся у них энергии. Это приводит к генерации ионов с энергетическим распределением, близким к тепловому. На заключительной стадии ускорения ионов этим механизмом появляются частицы, вылетающие из пинча, энергия которых превышает как тепловую энергию, так и энергию частиц, приобретающих энергию при полном прохождении напряжения, используемого для генерации тока в Z-пинчевых разрядах.

Показано преимущество нагрева ионов плазмы в результате сжатия плазмы разрядным током по сравнению с методами, используемыми другими термоядерными устройствами. К таким способам нагрева относится метод нагрева ионным пучком в системах с магнитным удержанием или нагрев плазмы излучением в системах с инерционным удержанием.

Литература

- [1]. Будкер Г.И. Физика плазмы и проблема УТР, т.1, с.122 (1958).
- [2]. Шлютер А. Сб. Управляемые термоядерные реакции. Вып. 26, Атомиздат, 1960, с.142
- [3]. Schluter A., Zeitschrift fur Naturforschung, 1957, 12a, 822.
- [4]. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.В., Москва Атомиздат 1977, с. 248.

МЯГКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ МИШЕНЕЙ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

¹Кологривов А.А., ¹Рупасов А.А., ¹Болховитинов Е.А., ²Стучебрюхов И.А.,
²Абросимов С.А., ¹Шелковенко Т.А.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.107

Исследования спектров мягкого рентгеновского излучения лазерной плазмы в широком спектральном диапазоне (5–100 Å) проводились совместно ФИАН и ИОФ РАН на лазерной установке «Камертон-Т» [1]. Излучение на длине волны второй гармоники Nd-лазера (0,53 мкм) при длительности импульса ~ 70 пс с энергией ~ 1–5 Дж, фокусировалось на плоские мишени из различных материалов - Al, Si, Ti, Cu, Ta и W. При этом плотность потока мощности составляла $7 \times 10^{14} - 3.5 \times 10^{15}$ Вт/см². Использовался спектрограф с пропускающей дифракционной решеткой, имеющей отношение элементарного зазора к периоду структуры 0.41. Детектирование спектров лазерной плазмы осуществлялось на флуоресцентную запоминающую пластину Fuji TR. Расчетным путём определены ионизационные состояния плазмы, соответствующие различным электронным температурам, что позволило при сравнении с полученными экспериментальными спектрами сделать оценку реальной электронной температуры, которая в зависимости от плотности потока мощности и материала мишеней изменялась в пределах 100–450 эВ. Для проверки правильности оценки температуры, полученной при таком сравнении, был проведен детальный расчет излучения плазмы по компьютерной программе PrismSPECT [2], который показал хорошее соответствие полученных оценок с результатами расчетов по этой программе. Анализ полученных в экспериментах спектров показал, что для использования лазерной плазмы в качестве источника излучения в спектральной области «водяного окна» (23–44 Å) для применений в области биологии и медицины из перечисленных мишеней лучше всего подходят мишени из вольфрама, тантала или титана.

Литература

- [1]. Kologrivov A.A., Rupasov A.A., Bolkhovitinov E.A., Stuchebryukhov I.A., Abrosimov S.A., Shelkovenko T.A., Spectral studies of soft x-ray radiation of laser-produced plasma of various target materials in a wide spectral range. Phys. Rev. E, 2022, v. 106 B, 045205. DOI: 10.1103/PhysRevE.106.045205
- [2]. MacFarlane J.J., Golovkin I.E., Wang P., Woodruff P.R., Pereyra N.A., SPECT3D - A multi-dimensional collisional-radiative code for generating diagnostic signatures based on hydrodynamics and PIC simulation output, High Energy Density Phys. 2007, v.3, p.181.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В МЯГКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ С ПОМОЩЬЮ КОДИРУЮЩЕЙ АПЕРТУРЫ

¹Кологривов А.А., ¹Рупасов А.А., ¹Болховитинов Е.А., ³Иванов О.П., ³Потапов В.Н.,
²Стучебрюхов И.А., ²Абросимов С.А.

¹Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва, Россия

²Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, г. Москва, Россия

³НИИ "Курчатовский институт", г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.108

Важную информацию о процессах, происходящих в высокотемпературной плазме (например, лазерной плазме, плазме высоковольтного вакуумного разряда, взрывающихся проволочек и т.п.) даёт исследование рентгеновского излучения с пространственным разрешением. Для этой цели в экспериментальной практике широко применяется камера-обскура, представляющая собой отверстие малого диаметра в непрозрачном для рентгеновского излучения экране. Важнейшим преимуществом камеры-обскуры является простота изготовления и применения. Однако из-за низкой светосилы камеры-обскуры энергии излучения, попавшего на детектор, часто оказывается недостаточно для получения качественного изображения. Это заставляет искать другие средства для получения изображения исследуемого плазменного объекта. Одним из таких средств является кодирующая апертура (КА), которая представляет собой структуру пересекающихся взаимно-перпендикулярных прозрачных и непрозрачных полос. Такая КА (рис.1а) была применена в совместных экспериментах ФИАН и ИОФ РАН по исследованию изображений лазерной плазмы в рентгеновском диапазоне на установке «Камертон-Т». Использовалась КА размером 1х1 мм, которая по структуре и корреляционным свойствам близка к КА типа PnP [1]. Регистрация кодированного изображения осуществлялась на флуоресцентную запоминающую пластину Fuji TR без защитного покрытия.

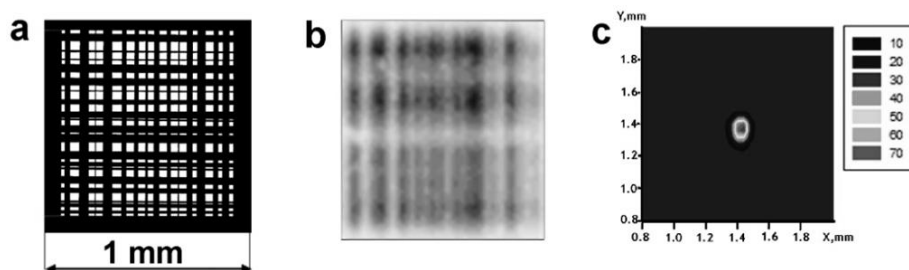


Рис.1. а) – внешний вид кодирующей апертуры; б) – кодированное изображение, формирующееся на детекторе; в) – математическая реконструкция плазменного источника, восстановленная из этого кодированного изображения.

Излучение, прошедшее сквозь КА, дает сложную картину кодированного изображения (рис.1б), поэтому требуется использование математической процедуры восстановления истинного изображения плазмы. Такая процедура была разработана в Курчатовском институте и представляет собой итерационный метод решения некорректно поставленной задачи – интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Результат такой процедуры представлен на рис. 1с. Было показано, что использование кодирующей апертуры не только многократно увеличивает светосилу системы регистрации, но и позволяет получить пространственное разрешение не хуже, чем в случае камеры-обскуры. Для лазерной плазмы применение КА в качестве элемента построения изображения было осуществлено впервые.

Литература

- [1]. Gottesman S.R., Schneid E.J. PnP - A New Class of Coded Aperture Arrays, IEEE Transactions on Nuclear Science, 1986, Vol. 33, No. 1, p. 745.

ИСТОЧНИК ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ 10 ПВт УЛЬТРАКОРОТКОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА, ОБЛУЧАЮЩЕГО МИКРО-КЛАСТЕРНУЮ СРЕДУ

^{1,3}Гожев Д.А., ^{1,2,3}Бочкарев С.Г., ^{1,2,3}Брантов А.В., ^{1,2,3}Быченков В.Ю., ^{1,2,3}Лобок М.Г.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева, РАН, г. Москва, Россия,
bochkarevsg@lebedev.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова,
Москва, Россия

³Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, г.
Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.109

Лазеры фемтосекундной длительности с рекордными характеристиками, в то числе мульти-ПВт-ного уровня мощности [1,2], благодаря своей высокой энергетике, способны обеспечить эффективный нагрев большого объема облучаемой среды. Такая среда служит источником лазерно-ускоренных заряженных частиц, нейтронов, вторичного электромагнитного и радиоактивного излучения. В настоящее время активно проводятся исследования, нацеленные на поиск схем, пригодных для эффективного ускорения заряженных частиц с применением различного рода мишеней, способных обеспечить практически полное поглощение мощного лазерного излучения, включая различные микроструктурированные, а также кластерные и микрокапельные мишени.

Целью данной работы является расчетная оптимизация для достижения максимального числа лазерно-нагретых заряженных частиц (дейтронов) умеренных энергий и термоядерных нейтронов в большом объеме кластерной среды. В качестве такой среды, как пример, рассматривается среда из капель тяжелой воды, содержащий дейтерий. Предполагается, что высокоэнергетичный 10 ПВт лазерный импульс, например, лазерной системы XCELS (Exawatt Center for Extreme Light Studies), при умеренно релятивистской интенсивности $\sim 10^{18}$ Вт/см² фокусируется в достаточно большой объем микрокластерной среды (диаметр пятна составляет примерно 500 мкм). Из-за указанной особенности задачи промоделировать взаимодействие лазерного излучения во всей протяженной микро-структурированной среде вряд ли возможно. В работе предложена новая схема разделения области взаимодействия на различные зоны в зависимости от величины истощения лазерного импульса. Проведенная с помощью моделирования методом «частица-в-ячейке» оптимизация кластерной мишени для фс лазерного импульса с энергией ~ 300 Дж предсказывает выход термоядерных нейтронов на уровне $\sim 10^9$ нейтр./ср. Ожидаемая яркость вспышки нейтронов достигает значения свыше 10^{18} нейтр./(см²·с). В случае, если удастся синхронизовать лазерные пучки XCELS (12 пучков по 12 ПВт) с наносекундной задержкой, то при многостороннем нагреве ожидаемый выход нейтронов можно поднять на порядок, при этом выход нейтронов будет достигать 10^{10} нейтр./ср.

Работа выполнена при поддержке ФНТП 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]. Danson C. N., Haefner C., Bromage J., et al., High Power Laser Science and Engineering 2019, 7, e54.
- [2]. Коржиманов А. В., Гносков А. А., Хазанов Е. А., Сергеев А. М. УФН 2011, **181**, № 1. 9.
- [3]. <https://ipfran.ru/scientific-activity/xcel-s-project>

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА БЫСТРЫХ ИОНОВ Z-ПИНЧА ПРИ ИСЧЕЗАЮЩЕМ ЭФФЕКТЕ СТОЛКНОВЕНИЙ

Чирков А.Ю., Морхова Е.А., Фролов А.Ю.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, chirkov@bmstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.110

При сжатии Z-пинча образуется перетяжка, в которой происходит ускорение ионов до энергий уровня нескольких сотен кэВ (иногда свыше 1 МэВ). Два возможных механизма, «тепловой» и «ускорительный», как правило, рассматриваются отдельно. Но попытки искусственного разделения ионов на «тепловые» и «быстрые» («ускоренные») сталкиваются с трудностями обоснования. Видимо, указанные механизмы генерации высокоэнергетичных ионов дополняют друг друга, в результате формируя наблюдаемый энергетический спектр ионов, покидающих перетяжку. Объединить моделирование ионов всех энергий можно на основе кинетического уравнения Фоккера–Планка с учетом ускорения ионов за счет сжимающего магнитного поля [1, 2]. Его численное решение может удовлетворительно объяснить наблюдаемый спектр ионов и выход нейтронов [3]. Однако существует проблема устойчивости численной схемы, возникающая на самой конечной стадии, соответствующей сильному сжатию. Физически это связано с тем, что механизм ускорения приводит к темпу ускорения на конечной стадии сжатия, значительно превышающему кулоновское торможение. Иными словами, наступает момент, начиная с которого влияние столкновений на кинетику частиц определенных энергий становится исчезающе малым. Причем для ионов различных энергий это происходит в различные моменты времени. Такие особенности кинетики требуют единого подхода к описанию ионов всех энергий, но с учетом особенностей, присущим разным энергетическим диапазонам.

В настоящей работе распределение ионов по энергиям в перетяжке и спектр ионов на выходе моделируются в многогрупповом приближении, согласно которому весь энергетический диапазон подразделяется на своего рода пучки в фазовом пространстве скоростей. Далее рассматривается динамика каждого пучка с учетом потерь частиц, их ускорения нестационарным сжимающим магнитным полем и торможения. Потери частиц, в конечном итоге, складываются в спектр выходящих ионов.

Анализ показал, что корректное объяснение спектра ускоренных ионов требует совместного использования кинетического описания, макроскопической динамики плазмы и электромагнитных полей, но даже в этом случае ряд параметров модели требует уточнения, информация для которого быть получена на основе моделирования траекторий отдельных частиц в нестационарном электромагнитном поле Z-пинча.

Литература

- [1]. Чирков А.Ю., Морхова Е.А., Фролов А.Ю. Моделирование кинетики быстрых ионов в сжимающемся Z-пинче на основе уравнения Фоккера–Планка с учетом электромагнитного ускорения // Физика плазмы. 2022. Т. 48, № 10. С. 962–966.
- [2]. Фролов А.Ю., Дружинина О.В., Чирков А.Ю. Моделирование изменения энергетического распределения частиц при адиабатическом сжатии плазмы // Электромагнитные волны и электронные системы. 2021. Т. 26, № 5. С. 5–14.
- [3]. Vikhrev V.V., Frolov A.Yu., Chirkov A.Yu. Neutron yield from Z-pinches at generation of the power-degree spectrum of fast deuterons // J. Phys.: Conf. Series. 2019. V. 1370. 012026.

ОСОБЕННОСТИ КОНЕЧНОЙ СТАДИИ СЖАТИЯ Z-ПИНЧА

¹Фролов А.Ю., ¹Чирков А.Ю., ²Вихрев В.В.

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, e-mail: alexeyfrolov92@yandex.ru

²НИЦ «Курчатовский Институт», г. Москва, Россия, e-mail: vikhrev@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.111

Как известно, Z-пинчи характеризуются ярко выраженной неустойчивостью, которая приводит к резкому росту плотности плазмы и энергии частиц [1]. Плазма вытекает через торцы Z-пинча, а действие магнитного поля в конечном итоге не уравнивается никакими другими силами. Уменьшение радиуса плазменного столба сопровождается увеличением давления магнитного поля на его боковую поверхность и одновременно увеличением скорости истечения плазмы через торцы.

Экспериментально наблюдаемые свойства Z-пинчей не могут быть исчерпывающе описаны в рамках одной подхода. Если динамика плазмы уже давно и успешно моделируется магнитной гидродинамикой [2], то, например, генерация высокоэнергетических ионов традиционно рассматривается через взаимодействие отдельно взятого иона с плазмой и электромагнитным полем Z-пинча [3]. Применение различных подходов к моделированию или анализу физических особенностей Z-пинчей должно сопровождаться четким выделением границ применяемых приближений. Иначе неизбежны трудности при попытках получить корректное описание процессов в Z-пинче в условиях развития сильной неустойчивости.

Данная работа посвящена моделированию газового цилиндрического Z-пинча. Рассматривалось несколько подходов к описанию Z-пинча с целью выяснения границ их применимости. Моделирование начальной стадии динамика плазмы основано на рамках газодинамического подхода. Определены границы применимости модели на основе расчета характерного времени релаксации ионного компонента. Показано, что газодинамическая модель может быть неприменима на стадии сильного сжатия перетяжки Z-пинча. Далее рассмотрена кинетическая модель, позволяющая учитывать энергетическое распределение ионов. Показано, что при сжатии распределение ионов формирует на выходе из пинча энергетический спектр, отличающийся от спектра, соответствующего максвелловскому распределению, особенно в области высоких энергий. Использование подхода на основе кинетического уравнения ограничено численными эффектами. Ввиду того, что нерелаксирующие высокоэнергетические ионы взаимодействуют с магнитным полем с увеличивающейся со временем частотой, численное моделирование кинетики плазмы на конечной стадии сжатия ограничено временным шагом интегрирования. Также в рамках кинетического подхода возникает трудность объяснения анизотропии нейтронного излучения. Анизотропия движения ионов рассматривается на основе динамики отдельных высокоэнергетических частиц.

Полученные результаты указывают на важность понимания ограничений физических подходов для описания неустойчивой системы. Интерес к Z-пинчам связан с тем, что в них реализуется механизм прямой передачи энергии от электромагнитного поля к ионам при развитии неустойчивости, который требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

Литература

- [1]. Вихрев В.В., Королёв В.Д. // Физика Плазмы. 2007. Т. 33, №5. С. 397-423.
- [2]. Гаранин С.Ф., Мамышев В.И. // Физика Плазмы. 2007. Т. 34, №8. С. 695-706.
- [3]. Свирский Э.Б. // ЖТФ. 2018. Т. 88, вып. 1. С. 15-21.

СПЕКТРАЛЬНАЯ ПРОЗРАЧНОСТЬ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ГАДОЛИНИЯ, СОЗДАННОЙ ОБЛУЧЕНИЕМ Z-ПИНЧА НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1

¹Грицук А.Н., ¹Александров В.В., ¹Браницкий А.В., ¹Грабовский Е.В.,
¹Митрофанов К.Н., ¹Олейник Г.М., ¹Фролов И.Н., ²Баско М.М., ³Родионов Н.Б.,
³Родионова В.П.

¹ГНЦ РФ «ТРИНИТИ», Москва, Россия

²ИПМ имени М. В.Келдыша, Москва, Россия

³ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.112

Эксперименты по созданию высокотемпературной плазмы гадолиния и исследованию её спектральных свойств были проведены на установке Ангара-5-1 с разрядным током до 4 МА. При имплозии вольфрамовых многопроволочных сборок образуется Z-пинч, который является источником импульса мягкого рентгеновского излучения (МРИ) мощностью до 10 ТВт с длительностью ~ 8 нс. Это обеспечивает плотность мощности до 1 ТВт/см^2 и плотность энергии до 10 кДж/см^2 на поверхности мишени [1], которая состояла из майларовой пленки толщиной 0.6 мкм с напыленным слоем гадолиния толщиной от 40 до 80 нм. Толщина слоя Gd контролировалась методами атомно-силовой микроскопии. Схема измерений позволяла определять спектральную зависимость коэффициента пропускания плазмы мишени с временным разрешением [2]. Численное моделирование облучения Z-пинчем мишеней проводилось при помощи двумерного радиационного газодинамического кода RALEF-2D [3]. Этот код реализует уравнения гидродинамики с учетом теплопроводности и спектрального переноса теплового излучения. Перенос излучения рассматривается в каждый момент времени в рамках стационарного уравнения переноса с рассчитанными заранее параметрами по коду THERMOS [4]. Для описания уравнений состояния в коде RALEF2D используется модель FEOS [5]. Свойства майлара описывались следующим образом. Пробеги фотонов соответствовали смеси C_5O_2 . Уравнение состояния бралось как для чистого углерода с модификацией параметров при низких температурах так, что плотность при нормальных условиях была равна 1.39 г/см^3 , а критическая температура 640 К. Греющее излучение в расчетах аппроксимировалось суммой трех компонент с разными спектрами и временными профилями, с учетом относительно слабого, но длительного предимпульса [2], чтобы быть максимально близким к экспериментальному импульсу МРИ. Расчеты показывают, что на фронтальной стороне мишени в момент максимума МРИ температура плазмы Gd $\sim 40\text{-}45 \text{ эВ}$, плотность $\sim 0.5\text{-}1 \text{ мг/см}^3$. Как и в случае других материалов, исследованных ранее [2], в эксперименте было получено, что коэффициент пропускания плазмы мишени Gd+майлар вблизи максимума импульса облучения многократно увеличивается по сравнению с коэффициентом пропускания «холодного» материала мишени в диапазоне длин волн $\sim 50\text{-}200 \text{ \AA}$. Также в высокотемпературной плазме мишени наблюдается узкая полоса поглощения в области $\sim 65\text{-}70 \text{ \AA}$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №20-21-00082).

Литература

- [1]. В.В. Александров и др., Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 7. С. 613–650.
- [2]. В.В. Александров и др., Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 9. С. 847–870.
- [3]. M.M. Basko, J. Maruhn, and A. Tauschwitz, J. Comput. Phys. 2009 **228**, 2175.
- [4]. A.F. Nikiforov et al., Quantum-Statistical Models of Hot Dense Matter. Methods for Computation Opacity and Equation of State (Birkhauser, Basel, Switzerland 2005).
- [5]. S. Faik, M.M. Basko et al., High Energy Density Physics 2012 **8**, 349.

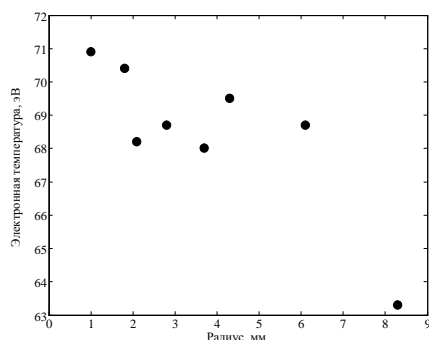
ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧА С ПОМОЩЬЮ КВАЗИПЛОСКОПОЛЬНОГО СПЕКТРОГРАФА

Грицук А.Н., Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В.,
Олейник Г.М., Старцев Г.А.

АО ГНЦ РФ “ТРИНИТИ”, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.113

Одной из главных задач при работе на установках сверхвысокой электрической мощности является увеличение мощности импульса мягкого рентгеновского излучения (МРИ), получаемого при токовой имплозии многопроволочныхборок [1]. На финальной стадии сжатия такихборок развиваются различные неустойчивости. Одним из основных их типов является магнитная Релей-Тейлоровская (МРТ) неустойчивость внешней границы плазмы. В экспериментах регистрируется опережающее сжатие некоторой части массы проволочной бороки и образование отставшей плазмы, которая в момент пика импульса находится между осью нагрузки и начальным положением проволок и шунтирует ток, протекающий через пинч, что негативно влияет на параметры импульса МРИ - его длительность и амплитуду [2]. Для исследования параметров отставшей плазмы в работе используется квазиплоскопальный спектрограф скользящего падения [3] с радиальным пространственным и временным разрешением. Отличительной особенностью рассматриваемой схемы спектрографа является смещенное положение входной щели относительно круга Роуланда, что позволяет, при размещении регистратора близко к касательной к поверхности фокусировки в точке её минимального удаления от центра решетки, повысить спектральное разрешение вследствие значительного уменьшения дефокусировки из-за внефокусного размещения регистратора спектра. В работе [4] был предложен метод измерения электронных температур $T_e < 100$ эВ по отношению интенсивностей близко расположенных линий [Н]-подобного (переход 1-2) и [Не]-подобного (переход 1-3) ионов углерода. Условие применимости этого метода соответствует параметрам отставшей плазмы [5]. В экспериментах с вложенными волоконно-проволочными (полипропилен-вольфрамовыми) бороками и волоконными (полипропилен или капрон) бороками с напыленным слоем металла были получены спектры излучения Z-пинча с радиальным и временным разрешением.



На рисунке представлено радиальное распределение электронной температуры в отставшей плазме в эксперименте с капроновой борокой, на которую был нанесен слой In, которое было определено методом, предложенным в [4]. Была исследована зависимость диаметра излучающей области от параметров внешнего каскада вложенных волоконно-проволочныхборок в момент максимума МРИ и показано, что для оптимальных по выходной мощности нагрузок размеры отставшей массы наименьшие, что свидетельствует об

уменьшении влияния отставшей плазмы на эффективность транспортировки разрядного тока в приосевую область вложенныхборок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №20-21-00082).

Литература

- [1]. D.B. Sinars, M.A. Sweeney et al., Phys. Plasmas 2020 **27**, 070501.
- [2]. K.N. Mitrofanov et al., Plasma Phys. Control. Fusion 2022 **64** 045007.
- [3]. P.S. Antsiferov, L.A. Dorokhin et al., Rev. Sci. Instrum. 2016 **87** 053106.
- [4]. Ю.Э. Бороздин и др., Письма в ЖЭТФ, 2008 т. 81, №1, с. 33.
- [5]. C.A. Jennings et. al., Phys. Plasmas, 2010 **17**, 092703.

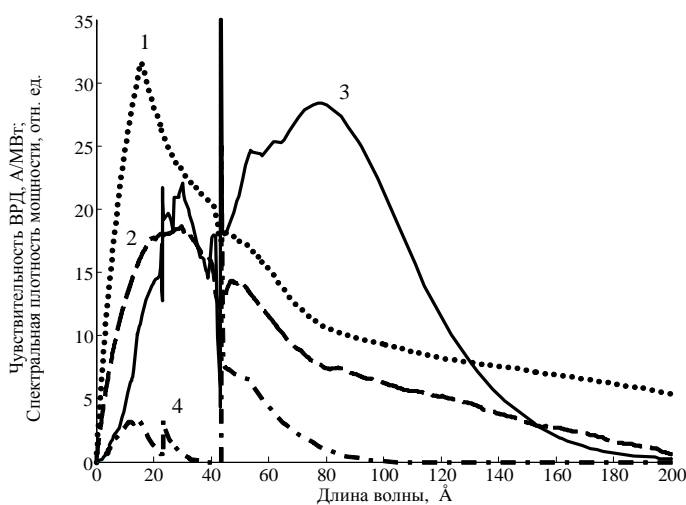
ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ Z-ПИНЧА ВОЛОКОННО-ВОЛЬФРАМОВЫХ СБОРОК НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1

Грицук А.Н., Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В.,
Олейник Г.М., Ахмеров Е.П.

ГНЦ РФ «ТРИНИТИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.114

В экспериментах на установке Ангара-5-1 по токовому сжатию вложенных волоконно-вольфрамовыхборок была показана возможность существенного повышения пиковой мощности импульса мягкого рентгеновского излучения (МРИ) (в диапазоне >100 эВ) по сравнению с одиночной вольфрамовой (W) сборкой той же массы при одном и том же уровне разрядного тока [1]. При этом было обнаружено, что происходит существенное увеличение спектральной плотности мощности излучения Z-пинча в диапазоне $\sim 20-40$ Å вблизи максимума МРИ. На рисунке спектр излучения пинча вложенной сборки показан кривой 1, спектр излучения пинча одиночной – кривой 2. Временной профиль импульса МРИ регистрируется набором вакуумных рентгеновских диодов (ВРД) [2] чувствительность которых в этом диапазоне невелика. Чтобы определить повышение пиковой мощности во всем диапазоне излучения Z-пинча, с учетом диапазона $\sim 20-40$ Å в наборе ВРД в одном из четырех датчиков был заменен лавсановый фильтр толщиной 2.3 мкм на такой же, но толщиной 0.6 мкм.



Как видно из рисунка, спектральная чувствительность ВРД с таким фильтром (кривая 3) в указанном диапазоне многократно превышает чувствительность ВРД с фильтром 2.3 мкм (кривая 4). Это приведет к соответствующему росту амплитуды сигнала ВРД за тонким фильтром. Чтобы этот датчик работал в линейном режиме, поток излучения пинча был ослаблен «серым» фильтром, коэффициент пропускания которого не зависит от длины волны в этом диапазоне [3]. Был рассчитана и изготовлена мелкоячеистая металлическая сетка с

пропусканием 0.1. Измерение временного профиля импульса МРИ при имплозии вложенных волоконно-вольфрамовыхборок ВРД детектором с фильтром 0.6 мкм показало трехкратное увеличение по сравнению с одиночной сборкой, что существенно больше увеличения сигнала ВРД с фильтром 2.3 мкм [1] и отражает существенный вклад в импульс МРИ пинча волоконно-вольфрамовыхборок излучения из интервала $\sim 20-40$ Å.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №20-21-00082).

Литература

- [1]. K.N. Mitrofanov, V.V. Aleksandrov et al., Plasma Phys. Control. Fusion 2022. V. 64 P. 045007.
- [2]. A.N. Gritsuk et al., IEEE Transactions on Plasma Science. 2013. T. 41. № 11. P. 3184-3189.
- [3]. Е.В. Грабовский, Г.М. Олейник, И.Ю. Порофеев, ПТЭ, 2006 №2 с. 116-120.

ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИМПЛОЗИИ 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., Бездетный К.С.

ГНЦ РФ “ТРИНИТИ”, г. Москва, округ Троицк, Россия, mitrofan@triniti.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.115

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-сборками с теми же параметрами, что и у W-сборки во внутреннем каскаде [1, 2]. Путем оптимизации линейной массы внешнего каскада и отношения радиусов каскадов получены мощные импульсы МРИ с высокой амплитудой вплоть до 18 ТВт, энергией ~ 140 кДж и короткой длительностью ~ 5 нс (см. табл. 1).

Табл. 1. Оптимальные параметры импульса МРИ.

Отношение радиусов каскадов r_{in}/r_{out}	Линейная масса внешнего каскада m_{out} , мкг/см	Количество проволок N_{out} внутреннего каскада и их линейная масса m_{in} , мкг/см	Параметры импульса МРИ		
			P_{SXR}^{max} , ТВт	E_{SXR} , кДж	$FWHM$, нс
0.8	23-50	40W, 220	14-16	~ 140	~ 7.5
0.65	5-10	40W, 220	~ 17	~ 140	~ 6.0
	10-17	60W, 330	17.5-18.3	~ 140	~ 5.3
0.5	~ 10	40W, 220	~ 15	~ 120	~ 5.0
	~ 10	60W, 330	~ 18	~ 140	~ 6.0

Примечание: серым цветом выделены ячейки с оптимальными параметрами. Радиус внешнего каскада во всех выстрелах был $r_{out}=1.0$ см.

При этом в оптимальных по выходной мощности МРИ выстрелах зарегистрировано увеличение доли энергии рентгеновского излучения в спектральном диапазоне $\lambda \in (30, 40)$ Å, что на 30-100% выше по сравнению с одиночными W-сборками со схожими параметрами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 20-02-00007, 20-21-00082).

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.

МАЛОГАБАРИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ТОКА ДЛЯ Х-ПИНЧЕЙ

Пикуз С.А., Шелковенко Т.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, pikuz@mail.ru

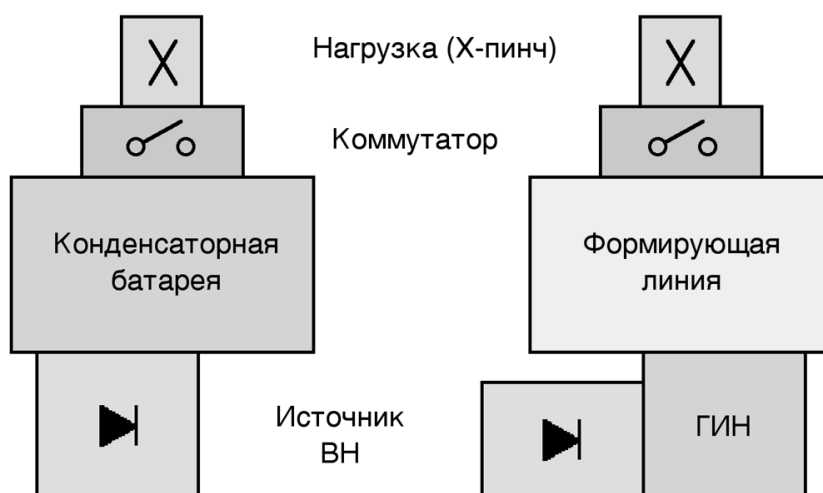
DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.116

Для успешной работы X-пинча как сверхяркого источника мягкого рентгеновского излучения (МРИ, диапазон 0.5 – 10 кэВ) необходимо выполнение условия Шелковенко для скорости нарастания тока в нагрузке

$$dI/dt > 1 \text{ кА/нс} \quad (1)$$

Минимальное значение амплитуды тока, когда наблюдалось образование горячей точки с экстремальными плазменными параметрами составляло примерно 50 кА. Как показали последние исследования, для генерации более жесткого излучения (ЖРИ, $E > 10$ кэВ) может быть достаточна и меньшая скорость нарастания тока. Однако, при этом механизм генерации является другим, связанным с обрывом токовой проводимости перетяжки недогруженного X-пинча и качество излучения не столь высоко как качество мягкого излучения горячей точки.

Существует две концепции обеспечения выполнения условия (1): а) – использование высоковольтных конденсаторных батарей с экстремально низкой собственной индуктивностью и специальными коммутаторами и б) – использование накопителей с распределенными параметрами (формирующих линий) – см. Рисунок.



Примером генератора с конденсаторной батареей является работающая в ФИАНе установка КИНГ, разработанная и изготовленная в ИСЭ СОАН. Эксперименты показали, что X-пинч на генераторах этого типа, при надлежащем подборе нагрузки, является достаточно эффективным источником МРИ. Однако, критерий (1) выполняется при этом на пределе технических возможностей и подбор нагрузок оказывается весьма ограниченным. Увеличение скорости нарастания тока в конденсаторных системах возможно при повышении рабочего напряжения, что связано с большими техническими трудностями. Увеличение рабочего напряжения легко достигается в схемах с водяными коаксиальными формирующими линиями. Несмотря на то, что энергозапас формирующей линии при равном размере меньше, чем конденсаторной батареи, выполнение критерия (1) легко обеспечивается. Современные системы водоподготовки позволяют получить деионизованную воду с удельным сопротивлением до 10 МОм.см. При этом отпадает необходимость использовать для зарядки формирующей линии промежуточный накопитель и создавать малогабаритные установки.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-79-30086.

УПРАВЛЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТЯМИ, ОБРАЗУЮЩИМИСЯ ПРИ ВЗРЫВЕ ПЛОСКИХ ФОЛЬГ

Шелковенко Т.А., Тиликин И.Н., Огинов А.В., Мингалеев А.Р.,
Романова В.М., Пикуз С.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, tchel55@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.117

Представлены результаты исследования электрического взрыва алюминиевых фольг толщиной 16 мкм с искусственным периодическим рельефом, созданным методом лазерного гравирования. Эксперименты проводились на импульсных сильноточных генераторах БИН (270 кА, 300 кВ, 100 нс) и КИНГ (200 кА, 40 кВ, 200 нс). Рентгенограммы взорванных фольг, помещаемых в цепь обратного тока (амплитуда тока 80 кА), получены методом проекционной рентгенографии в излучении гибридного X-пинча, основной нагрузки генератора. Исследовалось влияние искусственного рельефа на результирующую картину взрыва у фольг, обладающих выраженной собственной структурой. Метод точечной проекционной рентгенографии показал наличие собственных начальных структур в фольгах, периодических в одном или двух направлениях [1].

Эксперименты также показали, что вложенная в фольгу энергия зависит от взаимной ориентации фольг и протекающего через фольгу тока, что, конечно, сказывается на структуре взорванных фольг [1, 2]. Выбор вариантов собственных структур достаточно небольшой. Его можно расширить с помощью дополнительного нанесения на поверхность фольги искусственной периодической структуры произвольного направления и шага. Изучив, как подобные структуры влияют на режим взрыва, можно подобрать оптимальный вариант фольговой нагрузки для той или иной прикладной задачи.

Эксперименты показали, что предварительная лазерная гравировка поверхности фольги в виде канавок (ширина 50 мкм и шаг 50 и 100 мкм) в направлении, параллельном току и перпендикулярном ее собственной структуре, приводит к заметному сглаживанию неоднородностей, что является важным фактором в достижении высоких параметров сжатия, например, для использования в УТС. Показано, что внешняя периодическая точечная гравировка с диаметром точек 50 мкм и шагом 50 и 100 мкм вызывает формирование периодических неустойчивостей с более выраженной амплитудой, чем в фольге без внешнего воздействия. В то же время масштаб неустойчивостей, образующихся при взрыве фольги, близок к масштабу нанесенных точек.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-79-30086

Литература

- [1]. T.A. Shelkovenko, I.N. Tilikin, A.R. Mingaleev and S.A. Pikuz, Features of explosion of thin aluminum foils on an 8 kA, 350 ns pulse generator, *Phys. Plasmas*, 2020, 27, 043508.
- [2]. T.A. Shelkovenko, I.N. Tilikin, A.V. Oginov, K.S. Pervakov, A.R. Mingaleev, V.M. Romanova and S.A. Pikuz, Investigation of the Nanosecond Explosion of Thin Foils, with Artificially Applied Surface Structure, *Plasma Phys. Rep.*, 2022, 48, 1226.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОННОГО СГУСТКА ПРИ ЕГО КИЛЬВАТЕРНОМ УСКОРЕНИИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА САМОВОЗДЕЙСТВИЯ

^{1,2}Умаров И.Р., ^{1,2}Андреев Н.Е.

¹Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия,
email: umarov.ir@phystech.edu, andreev@ras.ru;

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.118

Разработка эффективного метода ускорения заряженных частиц является одной из приоритетных задач современной физики. Лазерно-плазменные ускорители входят в список наиболее перспективных кандидатов для решения этой проблемы эффективного ускорения, так как они позволяют генерировать ускоряющие поля с амплитудой на несколько порядков выше, чем это возможно в традиционных ускорителях. Однако в ускорителях данного типа при значениях заряда ускоряемых сгустков, требуемого для многих практических приложений, начинает играть значительную роль влияние на процесс ускорения собственный заряд этого сгустка (эффект самовоздействия) [1, 2]. Чтобы учесть этот эффект, была проведена модификация квазистатического кода WAKE [3]. Основываясь на линейной теории, а также на самосогласованном нелинейном моделировании, выполненном с использованием этого кода, исследовано влияние эффекта самовоздействия на процесс ускорения этого сгустка. Было проанализировано, как различные параметры сгустка, такие как его размеры и величина заряда, влияют на ускоряющее поле за счет данного эффекта. Предложен метод оптимизации начальных параметров сгустка ускоряемых электронов для эффективного, с точки зрения конечного разброса по энергии, лазерно-плазменного ускорения с учетом эффекта самовоздействия, основанный на выглаживании ускоряющего поля на длине ускоряемого сгустка.

Литература

- [1]. T.C. Katsouleas, J.J. Su, S.C. Wilks et al., Particle Accelerators, 1987, 22, 81–99.
- [2]. C. Rechatin, X. Davoine, A.F. Lifschitz et al., Physical Review Letters, 2009, 103 (19), 194804.
- [3]. P. Mora, Jr. T.M. Antonsen, Physics of Plasmas, 1997, 4, 217–229.

УДАРНАЯ ПЕРЕДАЧА ДАВЛЕНИЯ ТВЁРДОМУ ВЕЩЕСТВУ В МИШЕНИ С ПОРИСТЫМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

¹Белов И.А., ¹Бельков С.А., ¹Бондаренко С.В., ²Вергунова Г.А., ¹Воронин А.Ю.,
¹Гаранин С.Г., ¹Головкин С.Ю., ²Гуськов С.Ю., ²Демченко Н.Н., ¹Деркач В.Н.,
²Дмитриев Е.О., ³Змитренко Н.В., ¹Илюшечкина А.В., ¹Кравченко А.Г.,
¹Кузьмин И.В., ^{2,3}Кучугов П.А., ¹Мюсова А.Е., ¹Рогачев В.Г., ¹Рукавишников А.Н.,
¹Соломатина Е.Ю., ¹Стародубцев К.В., ¹Стародубцев П.В., ¹Чугров И.А.,
¹Шаров О.О., ²Яхин Р.А.

¹Институт лазерно-физических исследований РФЯЦ ВНИИЭФ, г. Саров,
Нижегородской обл., Россия,

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,

³Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.119

Представлены результаты экспериментов на лазерной установке ЛУЧ (РФЯЦ-ВНИИЭФ) [1] по увеличению давления лазерно-индуцированной ударной волны при её переходе из менее плотного в более плотное вещество через вакуумный зазор.

При воздействии наносекундного лазерного импульса тераваттной мощности на плоские мишени в виде слоя малоплотного поглотителя лазерного излучения из пористого вещества с плотностью 0.01-0.025 г/см³ и слоя алюминия, разделённых вакуумным промежутком, зарегистрированы скорости ударной волны в алюминии 25-29 км/с. Скачок давления на границе алюминиевого слоя в 1.2-1.5 раза превысил имеющиеся результаты экспериментов по кумуляционному переходу лазерно-индуцированной ударной волны в твёрдое вещество. Экспериментальные данные сопоставляются с результатами численных расчётов по гидродинамическим программам, в которых генерация и распространение ударной волны моделировались с учётом взаимодействия лазерного импульса с частично гомогенизированной плазмой пористого вещества.

На основании результатов экспериментов и расчётно-теоретического анализа обсуждается эффективность использования малоплотных пористых сред в мишенях, предназначенных для исследований уравнения состояния вещества и зажигания термоядерной реакции при инерциальном удержании.

Литература

- [1]. Гаранин С.Г., Зарецкий А.И., Илькаев Р.И. и др., Квантовая Электроника, 35, 4, 299, 2005.

РОЛЬ И ВЛИЯНИЕ ДВУМЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ В ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНО-УСКОРЕННОГО УДАРНИКА НА ПЛОСКУЮ МИШЕНЬ

¹Змитренко Н.В., ²Эркинбеков Ш.К.

¹ФИЦ Институт прикладной математики РАН, г. Москва, Россия,
zmitrenko@imamod.ru

²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Москва, Россия,
shapkil@phystech.edu

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.120

В настоящее время экспериментально и теоретически активно исследуются проблемы взаимодействия лазерно-ускоренных пластин с твердотельными мишенями. В таких экспериментах, в соответствующих им численных расчётах появляется возможность опытным путём определить теплофизические характеристики исследуемых веществ. Лазерное воздействие, при правильно устроенном поглотителе (в частности, зачастую используют малоплотный, пористый поглотитель с целью наилучшим образом осуществить преобразование энергии лазерного импульса в создаваемое абляционное давление [1]) обеспечивает ускорение ударника до скоростей в десятки км/с и получаемых давлений в несколько мегабар. Таких условий вполне достаточно для изучения физики так называемой «dense warm matter». Этому направлению посвящено немалое количество работ. Одними из последних, содержащих большое количество информации, можно считать публикации [1-3]. Вместе с тем, численные исследования последних лет основывались, как правило, на 1D, плоских расчётах. Этот подход, тем не менее, давал вполне определённые характеристики получаемых в эксперименте плотностей, давлений, скоростей движения веществ за ударной волной и т.п. Однако, в последнее время, принципиальным становится вопрос о многомерном характере взаимодействия ударника с мишенью. Полученные в одномерных (плоских) расчётах величины давления, плотности веществ, другие их характеристики, - не изменятся ли они с учётом неоднородности воздействия. Здесь присутствует и влияние распределения интенсивности лазерного излучения в поперечной плоскости, и влияние разлёта нагретого вещества по сторонам плоской мишени. В предлагаемой работе мы попытались смоделировать эффекты разлёта вещества в стороны в условиях плоского столкновения пластин (ударник-мишень). Моделирование проводилось на основе численного кода NUT [4] в цилиндрической версии. Влияние поперечного разлёта было оценено, и, как оказалось, оно не является заметно существенным.

Литература

- [1]. Белов И.А., Бельков С.А., Бондаренко С.В. и др. «Ударная передача давления твёрдому веществу в мишени с пористом поглотителем излучения мощного лазерного импульса» // ЖЭТФ, 2022, т.161, вып.3, стр. 403-413.
- [2]. Левашов П.Р. «Квантово-статистический расчёт теплофизических свойств веществ для интерпретации ударно-волновых экспериментов и численного моделирования воздействия лазерных импульсов на вещество» // Диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук, Москва, 2022, 271 стр.
- [3]. Белов И.А., Бельков С.А., Бондаренко С.В. и др. «Генерация плоской, стационарной ударной волны при предельно высокой передаче давления твёрдому веществу от малоплотного поглотителя излучения тераваттного лазерного импульса» // Направлено в Письма в ЖЭТФ, 2023.
- [4]. Тишкин В.Ф., Никишин В.В., Попов И.В., Фаворский А.П. «Разностные схемы трёхмерной газовой динамики для задачи о развитии неустойчивости Рихтмайера-Мешкова» // Математическое моделирование, 1995, т.7, №5, с. 15-25.

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ»**

**SECTION
«PHYSICAL PROCESSES
IN LOW-TEMPERATURE PLASMAS»**

ЛИНИЯ ЕДИНИЧНОГО ФАКТОРА СЖИМАЕМОСТИ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ.

Апфельбаум Е.М.

ОИВТ РАН, Москва, Россия, apfel_e@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.121

Законы подобия уже более века являются одними из методов исследования фазовой диаграммы газов и жидкостей [1]. К ним относятся, например, принцип соответственных состояний или закон прямолинейного диаметра бинодали [1,2], хорошо известные с 19 века, но обладающие ограниченной областью применимости. Большой областью применимости обладают соотношения подобия, связанные с линией единичного фактора сжимаемости [3]. Последняя представляет собой контур на фазовой плоскости вдоль которого давление изучаемой системы совпадает с давлением идеального газа, т. е. вдоль этого контура для любой однокомпонентной системы фактор сжимаемости равен $Z=1$ (как обычно $Z=P/(nT)$, где P - давление, n - концентрация частиц, E - температура в единицах энергии). Такой контур может быть рассмотрен в различных координатах - n - P , n - T , T - P - но, именно в координатах n - T линия $Z=1$ оказывается прямой при всех значениях плотности от нуля до линии плавления. Изначально такая универсальная форма была получена для уравнения Ван дер Ваальса. Но позже оказалось, что она сохраняется и для веществ, которые описываются совсем иными уравнениями состояния (УРС). Так в базе данных NIST [4] сейчас собраны данные и построены УРС для ~ 150 веществ. И лишь у десятка из них она непрямоугольная [3]. Такая универсальность позволила найти новые соотношения подобия для целого ряда газов и жидкостей, а также металлов в жидкой фазе [5].

Всё выше сказанное относилось к системам, не содержащим заряженных компонент, при сравнительно низких температурах. Поэтому представляет интерес посмотреть на поведение контура $Z=1$ для низкотемпературной плазмы металлов. Для последних ранее как нами, так и другими авторами был разработан ряд химических моделей, надёжно описывающих их термодинамику в диапазоне 10-100 кК и плотностей ниже критической (см. [6,7] и ссылки там). В настоящем исследовании мы применили разработанные ранее химические модели для построения контура $Z=1$ в указанной области для ряда металлов. Было обнаружено, что здесь форма контура теряет свою универсальность, но есть некоторые общие закономерности, следующие из разложений для кулоновской компоненты по параметру неидеальности [8].

Литература

- [1]. Балеску Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. М.:Мир, 1978.
- [2]. Смирнов Б.М., УФН 2001. Т. 171, С. 1291.
- [3]. Apfelbaum E.M., Vorob'ev V.S., Int J Thermophys 2020, V.41:8.
- [4]. Lemmon E.W., Bell I.H., Huber M.L., McLinden M.O. NIST standard reference database 23: Reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, Version 10.0 National Institute of Standards and Technology, 2018.
- [5]. Apfelbaum E.M., J. Phys Chem B, 2022, V. 126, P. 2912.
- [6]. Apfelbaum E.M., Phys. Plasmas, 2020, V. 27, 042706.
- [7]. Apfelbaum E.M., Физика Плазмы, 2022, Т. 48, С. 937.
- [8]. Веденов А.А., Ларкин А.И. ЖЭТФ, 1959, Т. 36, С. 1133.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ ИОНИЗАЦИИ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ОТ ЧИСЛА ЭЛЕКТРОНОВ N И АТОМНОГО НОМЕРА ЭЛЕМЕНТОВ Z

Шпатаковская Г.В.

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва, Россия, e-mail: shragalya@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.122

Проведен анализ экспериментальных и расчетных потенциалов ионизации $I_N^{(Z)}$ (эВ) в основном состоянии многозарядных ионов средних и тяжелых элементов от аргона ($Z = 18$) до америция ($Z = 95$), представленных в таблицах NIST [1]. Эти данные, рассмотренные в специальных координатах, указывают на закономерности в зависимости от атомного номера элемента Z и числа электронов в ионе N . Обнаруженные закономерности позволяют аппроксимировать большое количество табличных значений простыми полиномами вида:

$$I_N^{(Z)} = Z^{4/3} 10^{\lg e_N(\sigma)} E_H, \quad \lg e_N(\sigma) = \sum_{i=0}^{i_{max}} \sum_{k=0}^{k_{max}} b_{ik} N^k \sigma^i, \quad \sigma = \pi Z^{-1/3}, \quad E_H = 27.211 \text{ eV}.$$

При этом оптимальным оказывается разбиение на группу средних элементов, от аргона до ксенона ($18 \leq Z \leq 54$) с числом электронов в диапазоне $N \leq Z - 5$ [2], и группу тяжелых, от цезия до америция ($55 \leq Z \leq 95$) с числом электронов $1 \leq N \leq 46$ [3]. В этом случае степень аппроксимирующих полиномов не превышает трех, и небольшие таблицы полиномиальных коэффициентов b_{ik} позволяют с точностью порядка 1 процента и выше оценивать потенциалы ионизации в общей сложности около трех тысяч ионов из рассмотренных областей. На рисунках представлены характерные зависимости потенциалов ионизации группы средних элементов из K и L оболочек (рис.1) и тяжелых элементов из M оболочки (рис.2).

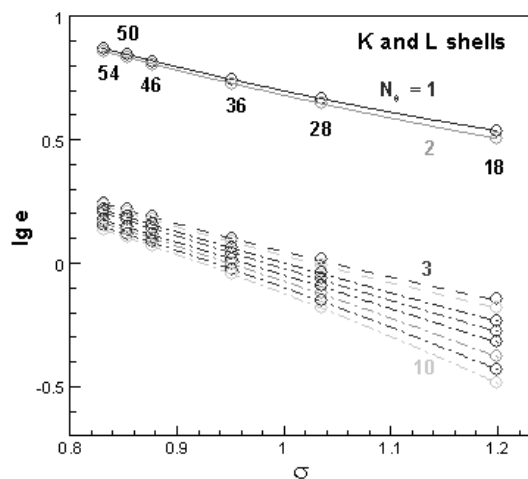


Рис.1

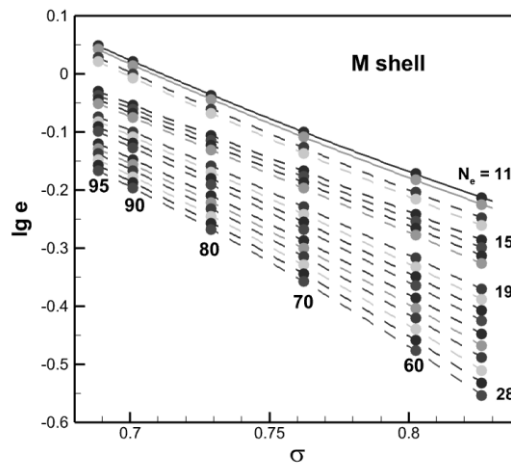


Рис.2

Литература

- [1]. 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> [2022, November 2]
- [2]. Шпатаковская Г.В. ЖЭТФ, 2022, **162**, 205-214
- [3]. Шпатаковская Г.В. Письма в ЖЭТФ, 2021, **114**, 798-801

СОЗДАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ДИФFUЗНЫХ СТРУЙ ПРИ ДАВЛЕНИИ ВОЗДУХА 0.01-3 ТОРР, ЯВЛЯЮЩИХСЯ АНАЛОГАМИ КРАСНЫХ СПРАЙТОВ

Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Панарин В.А., Сорокин Д.А.

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия, VFT@loi.hcei.tsc.ru

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.123

Плазма импульсных диффузных разрядов постоянно привлекает внимание исследователей и широко используется в различных областях. Начиная с конца прошлого столетия большое внимание стало уделяться изучению плазмы атмосферных разрядов на высотах 20–100 км от уровня моря [1–5]. Эти разряды были названы транзиентными световыми явлениями (ТСЯ). К ТСЯ относят красные спрайты, голубые струи, эльфы, гало и другие. В формировании части из них основную роль играет стримерный механизм пробоя, см., например, [1].

Цель настоящей работы – исследовать в лабораторных условиях стримеры (волны ионизации), имеющие форму, цвет и скорость распространения фронта свечения, аналогичные наблюдаемым в «столбчатых» спрайтах, а также увеличить длину плазменной диффузной струи (ПДС).

Проведённые исследования показали, что при низких давлениях воздуха и азота (0.01–3 Торр), создавая плазму импульсно-периодического барьерного разряда с различными конструкциями электродов, можно формировать плазменные диффузные струи – цилиндрические стримеры, с формой близкой к форме спрайтов «столбчатого» типа. При этом, в широком диапазоне давлений и напряжений цилиндрические стримеры имеют красный цвет, который обусловлен излучением $1+$ системы азота. Установлено, что длина стримеров при напряжении генератора 7 кВ и давлении воздуха 0.4 Торр и менее, может превышать 1 метр. Показано, что на цвет стримеров влияет величина приведённой напряженности электрического поля E/p . При высоких значениях E/p цвет разряда изменяется и становится голубым вблизи внешних электродов, а также в конце ПДС. Голубой цвет определяется излучением $1-$ и $2+$ систем молекулярного иона и молекулы азота, соответственно. При малых давлениях 0.04 Торр и ниже ПДС в воздухе имеют белый цвет. Цвет стримеров становится белым при низких давлениях воздуха за счёт увеличения E/p и диссоциации частиц воздуха, в том числе примеси паров воды. За счёт молекулярных и атомарных переходов новых нейтральных частиц и ионов появляется широкополосное излучение в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Предварительные результаты проведённых исследований, полученные в 2022 году, опубликованы в работах [6–8].

Литература

- [1]. Pasko V.P., Inan U.S., Bell T.F., Taranenko Y.N. *Journal Geophys. Res.*, 1997, **102**, 4529–4561.
- [2]. Rodger C.J. *Reviews of Geophysics*, 1999, **37**(3), 317–336.
- [3]. Jehl A., Farges T., Blanc E. *Journal of Geophys. Res.: Space Physics*, 2013, **118**(1), 454–461.
- [4]. Chanrion O., Neubert T., Mogensen A., Yair Y., Stendel M., Singh R., Singh D. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, **44**, 496–503.
- [5]. Neubert T., Chanrion O., Heumesser M., Dimitriadou K., Husbjerg L., Rasmussen I.L., Østgaard N., Reglero V. *Nature*, 2021, **589**(7842), 371–375.
- [6]. Tarasenko V., Vinogradov N., Baksht E., Sorokin D. *Journal of Atmospheric Science Research*, 2022, **5**(4), 26–36.
- [7]. Бакшт Е.Х., Виноградов Н.П., Тарасенко В.Ф. *Оптика атмосферы и океана*, 2022, **35**(9), 777–781.
- [8]. Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Виноградов Н.П. *Прикладная физика*, 2022, (4), 11–17.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ИОННОГО ПУЧКА НА УСТАНОВКЕ GISMO

Выбин С.С., Изотов И.В., Скалыга В.А., Киселёва Е.М., Поляков А.В., Боханов А.Ф.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.124

Задача формирования интенсивных пучков легких ионов высокого качества является актуальной на данный момент. В основном такие пучки применяются для инъекции в ускорители. Рассмотрим некоторые примеры актуальных достижений в разработке ионных инжекторов. Источник для проекта FRANZ [1] формирует протонный пучок с током 100 мА, энергией 95 кэВ и нормализованным среднеквадратичным эмиттансом 0.25 п мм мрад. Также для установки IFMIF [2] был получен пучок ионов дейтерия с током 140 мА, энергией 100 кэВ и нормализованным среднеквадратичным эмиттансом 0.2 п мм мрад. При этом средняя плотность потока плазмы в области экстракции не превышала 200 мА/см². В качестве источника плазмы в этих случаях выступает ЭЦР разряд с нагревом на частоте 2.45 ГГц при вкладываемой мощности в несколько кВт. Источники данного типа зарекомендовали себя как надежные установки, отличающиеся стабильной и долгосрочной работой. Основное ограничение данных ионных инжекторов — умеренная плотность потока плазмы, что приводит к использованию плазменных электродов с большой апертурой (около 1 см в диаметре) для получения пучка с высоким током. Улучшение характеристик ионных инжекторов возможно за счет повышения плотности потока плазмы. При этом предпочтение отдается сохранению частоты греющего излучения на прежнем уровне. Соответственно проводятся исследования нагрева плазмы в режимах, когда концентрация превышает критическое значение для греющей частоты [3].

Другим методом повышения концентрации является использование для нагрева плазмы излучения с большей частотой и мощностью. В этой парадигме был разработан газодинамический ионный источник GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation). Для нагрева плазмы в нем используется излучение гиротрона [4] с частотой 28 ГГц и мощностью до 10 кВт. Относительно небольшой объем плазмы обеспечивает высокий удельный энерговыход (на уровне 250 Вт/см³). Это позволяет извлекать ионные пучки с начальной плотностью тока более 1 А/см² [5].

Данная работа посвящена разработке систем, способных извлекать пучки с плотностью тока порядка 1 А/см², а также исследованию режимов их работы при различных внешних условиях (давление напускаемого газа, мощность СВЧ излучения, геометрия экстрактора). Ионный пучок извлекался из плазмы с использованием двухэлектродной системы экстракции, а его ток измерялся с помощью цилиндра Фарадея.

Литература

- [1]. Akagi T., Bellan L., Bolzon B. et al., Rev. Sci. Instrum. 2020, **91**, 023321. DOI: 10.1063/1.5129598
- [2]. Berezov R., Delferriere O., Fils J. et al., Rev. Sci. Instrum. 2019, **90**, 123309. DOI: 10.1063/1.5127820
- [3]. Castro G., Mascali D., Gammino S. et al., Plasma Sources Sci. Technol. 2017, **26**, 055019. DOI: 10.1088/1361-6595/aa61c4
- [4]. Bykov Yu., Denisov G., Ereemeev A. et al., Rev. Sci. Instrum. 2004, **75**, 1437. DOI: 10.1063/1.1690480
- [5]. Skalyga V.A., Izotov I.V., Vybin S.S. et al., J. Phys.: Conf. Ser. 2022, **2244**, 012092. DOI: 10.1088/1742-6596/2244/1/012092

ОБРАЗОВАНИЕ ТОКОВОЙ ОБОЛОЧКИ И ЕЕ КОНФИГУРАЦИЯ ПРИ РАБОТЕ ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА НА ДЕЙТЕРИИ И С ЗАМЕЩАЮЩИМИ ДОБАВКАМИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ.

¹Лотоцкий А.П., ¹Грабовский Е.В., ¹Ефремов Н.И., ¹Крылов М.К., ¹Панфилов Д.Г.,
¹Серяков А.Г., ¹Николашин А.А., ¹Лаухин Я.Н., ²Лукин В.В.

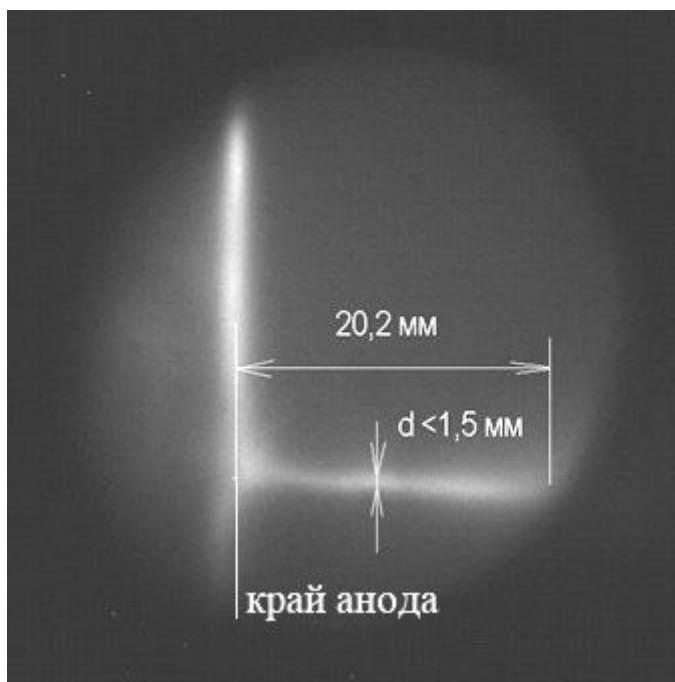
¹АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, lototsky@triniti.ru,

²ИПМ им. М.В. Келдыша,

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.125

Для решения основной поставленной задачи - разработке ПФ-установки с разрядными токами более 2-3 МА - ранее рассмотрена схема с тяжелой токовой плазменной оболочкой (ТПО), обжимающей инжектируемую дейтериевую струю. Её принципиальная работоспособность показана в работах [1, 2] на макете (600 кА) с начальной гелиевой ТПО. В этих экспериментах проявились особенности образования ТПО, некоторые из которых, как например повышение однородности аксиального распределения тока, известны [3], а с другими (задержка развития разряда) пришлось бороться различными способами. Проведенная обработка магнитозондовых измерений показывает существенное изменение формы ТПО в процессе ее ускорения в межэлектродном зазоре [1]. Изменение конфигурации может в значительной степени сказываться на динамике финального процесса кумуляции, размерах пинчевого образования и эффективности обжатия дейтериевой струи. Проведены эксперименты при работе ПФ с изменением величины массовой добавки к дейтерию инертных газов аргона и ксенона с регистрацией нейтронного выхода.

По движению вторичной токовой оболочки, образующейся при пробое по изолятору в момент особенности тока, оценивается плотность остаточного газа за фронтом ТПО и прозрачность собственно ТПО, что важно для эффективного сжатия дейтерия. Проведен ряд съёмок (см. рисунок) пинчевого разряда с помощью быстродействующего ЭОПа (50 нс) и получены спектрограммы, показывающие поглощение континуума пинчевой плазмы в спектральных линиях газа ТПО обжимающей оболочки. Разрабатывается подход к численному моделированию задачи прохождения токового фронта через границу раздела двух газов на этапе кумуляции пинча.



Литература

- [1]. Грабовский Е.В. и др. ВАНТ, 2022, том 45, с. 119-134.
- [2]. Галанин М.П. и др. Физика плазмы, 2022, том 48, №11, с.1046-1050.
- [3]. Вихрев В.В., Брагинский С.И. Вопросы теории плазмы. М., Атомиздат, 1980, том 10 с. 243-312.

ИЗМЕРЕНИЕ ТЯГИ МОЩНЫХ ЭРД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО ДАТЧИКА

Брагин Е.Ю., Веселовзоров А.Н., Казеев М.Н., Козлов В.Ф.

НИИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия,
e-mail: Bragin_EY@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.126

Как известно, лабораторные модели стационарных и квазистационарных безэлектродных плазменных ракетных двигателей (БПРД) обладают большой массой и связаны с внешней конструкцией, поэтому широко известные тягомеры, используемые для определения тяги ЭРД, на основе крутильных весов и обратного маятника не представляются реализуемыми. В этом случае можно использовать тензометрические преобразователи силы давления плазмы на мишень [1]. Таким методом можно измерять силы давления, производимого потоком плазмы в диапазоне от 10^{-3} Н до нескольких Ньютонов, пока имеет место линейность тензодатчика. Целью данной работы является определение возможностей измерения тяговых характеристик БПРД в диапазоне 0.01 – 1 Н с использованием тензометрической балки.

Схема устройства показана на рисунке 1. Мишень, перпендикулярная скорости потока плазмы, закреплена на конце стержня из оксида алюминия, в то время как противоположный конец стержня соединен с тензометрической балкой, на которой установлены четыре тензодатчика. Усилие, обусловленное набегающим на мишень потоком плазмы, создает крутящий момент, вызывающий деформацию балки. Полученные в результате измерения данные связаны с силой, действующей на мишень. Размер мишени и ее положение в потоке могут варьироваться, в результате позволяя определить радиальный профиль плотности тяги. При определенных предположениях полученные данные могут быть использованы для вычисления интегральной тяги ЭРД.

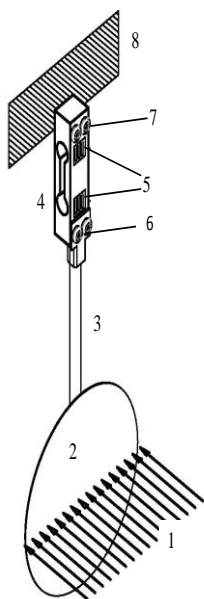


Рисунок 1. Тягомер на основе тензометрической балки. 1- поток плазмы, 2 – мишень, 3 – алундовый стержень, 4 – тензобалка, 5 – тензодатчики, 6, 7 – зажимы, 8 - консоль.

Испытания измерителя тяги на основе тензометрического сенсора были выполнены на стенде Е-1 с использованием стационарного плазменного двигателя СПД-100 мощностью разряда до 2.5 кВт. Проведено сравнение результатов, полученных с использованием тензометрических преобразователей силы, с традиционно используемым тягомером на основе крутильных весов с электромагнитной компенсацией. Использовался режим СПД-100 с тягой около 100 мН. Сравнение измерений, проведенное двумя рассматриваемыми методами, показало, что отличие результатов измерений составляет около 15%. Известно, что измерители тяги на основе крутильных весов имеют ошибку измерений тяги около 2%. Анализ показал, что неточности в измерении тяги тензометрическим тягомером связаны с проблемами интегрирования плотности тяги, определением направления вектора тяги и ионным распылением материала мишени. Приведены оценки влияния каждого из перечисленных эффектов на точность измерения тяги тензометрическим методом.

Литература

- [1]. West M.D., Charles C. and Boswell R.W., “A high sensitivity momentum flux measuring instrument for plasma thruster exhausts and diffusive plasmas,” Rev. Sci. Instrum. Vol.80, No. 5, 2009. doi: 10.1063/1.3142477

ДВОЙНЫЕ ПЫЛЕВЫЕ СТРУКТУРЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Павлов С.И., Дзलिएва Е.С., Голубев М.С., Новиков Л.А., Карасев В.Ю.

*Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
s.i.pavlov@spbu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.127

Пылевая плазма, созданная в условиях тлеющего разряда, представляет собой объемное образование в отличие от большинства исследований в ВЧ разряде, например, связанных с воздействием магнитного поля [1-5]. Как правило, в тлеющем разряде пылевые структуры изучаются в ловушке в стоячей страте, которая обладает существенной неоднородностью основных разрядных параметров: T_e , n_e , E_z [6-9]. Неоднородные условия в разряде создают богатый набор возможностей исследования пылевой плазмы. Прежде всего, в магнитном поле это приводит к суперпозиции нескольких механизмов вращения пылевой структуры.

В настоящей работе изучается возможность искусственного помещения пылевой плазмы в сильно отличающиеся условия в пылевой ловушке в страте в магнитном поле. Для этого разработана возможность создания нескольких пылевых структур одновременно: вдоль оси разряда – двух «каплевидных» пылевых формирований, вдоль радиальной координаты – кольцевой и дисковой структур.

Представляются первые результаты, полученные в умеренном магнитном поле, которые демонстрируют различную динамику поведения пылевых структур, как в продольном, так и в радиальном направлении.

Работа поддержана РНФ (проект № 22-72-10004).

Литература

- [1]. Sato N., Uchida G., Kaneko T., Shimizu S., Iizuka S., Physics of Plasmas, 2001, V. 8, P. 1786.
- [2]. Konopka U., Samsonov D., Ivlev A.V., Goree J., Steinberg V., Morfill G. E., Phys. Rev. E., 2000, 61, 1890.
- [3]. Thomas E.Jr, Lynch B., Konopka U., Merlino R.L., and Rosenberg M., Phys. Plasmas., 2015, 22, 030701.
- [4]. Schwabe M., Konopka U., Morfill G.E. et al., Phys. Rev. Lett., 2011, 106, 215004.
- [5]. Melzer A., Kruger H., Schutt S., and Mulsow M., Physics of Plasmas., 2019, 26, 093702.
- [6]. Golubovskii Yu.B. and Scoblo A.Y., Tech. Phys. Lett., 2007, 33, 711.
- [7]. Golubovskii Y., Karasev V. and Kartasheva A., Plasma Sources Sci. Technol., 2017, 26, 115003.
- [8]. Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I. and Karasev V. Yu., Plasma Sources Science and Technology. 2020. 29. 085020.
- [9]. Dzlieva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I. and Karasev V.Yu., EPL, 2018, 123, 15001.

ВРАЩЕНИЕ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ СТРУКТУР В МАГНИТНОМ ПОЛЕ В УЗКОМ КАНАЛЕ ТОКА

Карасев В.Ю., Дзлиева Е.С., Павлов С.И., Новиков Л.А.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: v.karasev@spbu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.128

Пылевая плазма [1], создаваемая в форме объемных структур в условиях тлеющего разряда в магнитном поле, показывает ряд эффектов. При исследовании пылевого формирования, образованного в области перетяжки канала тока в сильном магнитном поле с индукцией от 0.1 Тл, обнаружены два явления. Первое - увеличение скорости вращения пылевой структуры до очень больших значений, порядка 100 рад/с. Второе - изменение компактности и расположения частиц: уплотнение в перпендикулярном магнитному полю сечении и формирование круговых оболочек вокруг центра вращения. В данном сообщении представляются обнаруженные эффекты и обсуждаются условия их появления.

Пылевая плазма в данной ловушке формируется в магнитном поле от 0 до 150 Гс [2]. Первоначально ловушка вблизи изменения сечения тока связывалась с областью низковольтной дуги [3, 4]. По проведенным наблюдениям в неоне при 0.4 торр, в аргоне при 0.23 торр и гелии при 0.1 торр обнаружилась сильная зависимость скорости вращения от длины канала тока (длины диэлектрической вставки – сужающей разряд диафрагмы), при одинаковом размере перетяжки. Пока интерпретация появления вращения имеется для короткой до 1 см вставки в магнитном поле до 1 Тл [5].

Установлено, что в магнитном поле свыше 0.1 Тл в неоне (произведение холловских параметров $\omega_e \tau_e \omega_i \tau_i = 1$), структура перестраивает расположение частиц. Радиальное межчастичное расстояние сокращается до 0.1 мм (втрое), а при дальнейшем увеличении магнитного поля межчастичное расстояние не изменяется. Эти изменения коррелируют с измерением диаметра структуры в магнитном поле, наблюдается уменьшение расстояния и выход на постоянную величину. При этом в перпендикулярном магнитному полю сечении формируются круги вместо гексагонального расположения частиц. На их появление влияют два фактора: замагниченность ионов и большая (более 10 рад/с) скорость вращения. Перестроенная структура при вертикальном сканировании выглядит как система вложенных один в другой коаксиальных цилиндров.

Работа поддержана РФФИ, грант №22-12-00002.

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]. Dzljeva E.S., Karasev V. Yu., Pavlov S.I. 2016 Plasma Physics Reports **42** 147.
- [3]. Lipaev A.M. et al., JETP. 1997. **85**, 1110.
- [4]. Nedospasov A.V. Phys. Rev. E .2009. **79**. 036401.
- [5]. Dzljeva E.S., Dyachkov L.G., Novikov L.A., Pavlov S.I. and Karasev V. Yu., Plasma Sources Science and Technology, 2019, **28**, 085020.

ОСОБЕННОСТИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В СМЕСЯХ ГАЗОВ С НИЗКИМ И ВЫСОКИМ ПОТЕНЦИАЛАМИ ИОНИЗАЦИИ

¹Голубев М.С., ¹Дзлиева Е.С., ¹Карасев В.Ю., ¹Крылов И.Р., ^{2,3}Майоров С.А.,
¹Новиков Л.А., ¹Павлов С.И.

¹ Санкт-Петербургский Государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: maksider@ya.ru

² Институт общей физики РАН, г. Москва, Россия,

³ Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия, e-mail:
mayorov_sa@mail.ru.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.129

Исследование плазмы в смесях газов является необходимой, но сложной задачей, прежде всего в отношении методов диагностики [1,2,3]. В последнее время актуальность данной задачи связывается с технологическими процессами [4] и исследованиями пылевой плазмы в ловушке в сильно разнящихся по массе плазмоформирующих газах [5 – 7].

В настоящем сообщении представляется спектральный метод определения температуры электронов в смесях газов с сильно различающимися массами: неоне и криптона. Показано, что при добавке криптона в несколько единиц процентов можно определить относительное изменение энергии (температуры) электронов. Полученные спектроскопические данные сравниваются с имеющимися литературными, полученными методом зондов [8], а также с результатами численных расчетов характеристик ионов и электронов в газовых смесях [9, 10].

Показана применимость метода и его ограничения. Получена зависимость изменения (падения) температуры электронов при добавлении высокоионизируемой компоненты до 10%. Она сопоставлена с результатами экспериментов по изучению отбора пылевых частиц в ловушках в стратах в сходном наборе состава газа.

Работа поддержана Российским Научным Фондом, грант № 22-22-00154.

Литература

- [1]. Bochkova O.P. and Shreider E.Ya., Spectral Analysis of Gas Mixtures (Fizmatgiz, Moscow, 1963) [in Russian].
- [2]. Shibkova L.V. and Shibkov V.M., Discharges in Noble Gas Mixtures (Fizmatlit, Moscow, 2005) [in Russian].
- [3]. Spectroscopy of Breakdown Plasma, Ed. by Frish S.E. (Nauka, Leningrad, 1970).
- [4]. Dusty plasmas, Ed. by A. Boushoule. (Orlean, 1999), p 408.
- [5]. Maiorov S.A., Plasma Phys. Rep., 2009, 35, 802.
- [6]. Pavlov S.I., Dzlieva E.S., Karasev V.Yu., Ermolenko M.A., Novikov L.A., and Maiorov S.A., Contrib. Plasma Phys., 2016, 56, 3-4.
- [7]. Dzlieva E.S., Maiorov S.A., Novikov L.A., Pavlov S.I., Balabas M.V., Krylov I.R., Karasev V.Yu., Plasma Physics, 2022, 48, 10.
- [8]. Zaitsev A.A., JETP, 1938, 8, 569 [in Russian].
- [9]. Maiorov S.A., Kr. Soobshch. Fiz. FIAN, 2014, 40 (9), 3.
- [10]. Maiorov S.A., Kr. Soobshch. Fiz. FIAN, 2013, 39 (9), 22.

ОСОБЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОГО ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАРБИДА ВОЛЬФРАМА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПЛАЗМОТРОНА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

¹Дудник Ю.Д., ¹Кузнецов В.Е., ¹Сафронов А.А., ¹Ширяев В.Н., ¹Васильева О.Б.,
^{1,2}Гаврилова Д.А., ^{1,2}Гаврилова М.А.

¹ *Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: rc@iperas.nw.ru, julia_dudnik-s@mail.ru*

² *Санкт-Петербургский государственный технологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.130

Использование для синтеза карбидных дисперсных материалов плазмохимического метода [1, 2] обеспечивает высокую скорость образования синтезируемой фазы при малой скорости роста. Электродуговой плазмотрон переменного тока позволяет обеспечить непосредственный ввод энергии и, соответственно, высокую температуру в зоне реакции, что определяет быстрое протекание химических и фазовых превращений.

Одним из преимуществ плазменного процесса является высокая скорость нагрева плазмообразующего газа и обрабатываемого материала, а также возможность достижения высоких значений энтальпии дуговой плазмы. Фазовый состав и морфология синтезированного продукта зависит от электрических параметров дуги, вида и расхода плазмообразующего газа, материала электродов, геометрии реакционной камеры. Изменение этих параметров позволяет управлять процессом синтеза и влиять на размер частиц получаемого материала.

В работе рассматривается экспериментальная установка плазмохимического синтеза на базе плазмотрона переменного тока со сменными электродами (вольфрам, графит). Плазмообразующий газ состоял из смеси водорода и метана в соотношении ~ 1:1, в реакционный объем помещалась смесь оксида вольфрама VI (WO_3) в смеси с техническим углеродом. По опыту экспериментов [3], расход плазмообразующего газа варьировался до 0,5 г/с, мощность плазмотрона переменного тока составляла до 5 кВт при изменении среднемассовой температуры плазменной струи до 2500 К.

Полученный в результате проведения экспериментов материал исследовался с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 SBH, рентгенофазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре Rigaku SmartLab 3. Установлено, что в пробах содержится порошок карбида вольфрама (WC) и графит, причем количество образующегося материала находится в прямой зависимости от времени нахождения прекурсора в высокотемпературной зоне плазмохимического реактора.

Литература

- [1]. Dudnik Y.D., Safronov A.A., Kuznetsov V.E., Shiryaev V.N., Vasilieva O.B., Subbotin D.I., Popkov V.I., Plasma ways to obtain ultrafine oxides, J. Phys.: Conf. Ser. **1147**. 012127. (2019).
- [2]. Сафронов А.А., Кузнецов В.Е., Дудник Ю.Д., Ширяев В.Н., Васильева О.Б., Плазменное получение ультрадисперсных оксидов железа и алюминия, Прикладная физика. 2021. № 3. С. 66-71.
- [3]. Кузнецов В.Е., Дудник Ю.Д., Сафронов А.А., Ширяев В.Н., Васильева О.Б., Исследование плазмотрона переменного тока для получения высокодисперсных порошков тугоплавких металлов, Прикладная физика. 2022. № 2. С. 72-77.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО ПОДВОДНОГО РАЗРЯДА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Сироткин Н.А., Хлюстова А.В.

*Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, г. Иваново, Россия,
alexsad8@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.131

В соответствии с Дорожной картой развития работ по физике плазмы и её приложениям [1], исследование разрядов в жидкостях и в контакте с ними является одним из приоритетных направлений. Интерес к газовым разрядам, контактирующим с жидкостями, обусловлен, в первую очередь, возможностями практического применения таких разрядов, среди которых – модифицирование полимерных материалов [2] и возможность формирования микро- и наноструктур [3]. При использовании разрядов с двумя электродами, расположенными в жидкости образование плазмы возможно в парогазовых пузырьках, возникающих вследствие локального перегрева раствора вблизи электрода, или же возможно образование плазменных «стримеров». При этом происходит деструкция электродов и последующее диспергирование наночастиц в жидкости, сопровождающиеся их быстрой «закалкой». Также установлено, что плазма в контакте с жидкостями является эффективным методом модификации различных полимерных материалов. Такой вариант обработки является перспективным, поскольку исключает использование вакуумных установок и решается проблема совместимости нового процесса с традиционными жидкофазными технологиями. Кроме того, в плазменно-растворных системах генерация химически активных частиц происходит не только в зоне плазмы, но и непосредственно в растворе, что должно существенно увеличивать эффективность инициирования гомогенных и гетерогенных химических процессов. При плазмохимической обработке происходит формирование новых кислородсодержащих (C = O, C-OH) функциональных групп, происходят процессы сшивки и деструкции полимеров. Модифицированные в плазме полимеры могут быть использованы как матрицы для импрегнации наночастиц. Однако стоит отметить, практически полное отсутствие работ, где инициирование разряда и одновременное образование наночастиц происходило бы в растворе полимера или в водной дисперсии растворенного полимера. Между тем это позволило бы получать в одну стадию уникальные композитные полимерные материалы и совмещать процессы модифицирования полимеров с образованием наночастиц.

В настоящей работе представлены результаты использования плазмы подводного импульсного разряда для одностадийного создания композиционных полимерных материалов, содержащих наночастицы оксидов металлов, а также данные по использованию полученных композитов в фотовольтаике и для изготовления сенсibilизированных красителем солнечных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №21-73-00034).

Литература

- [1]. Adamovich I. et al. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2022. – Т. 55. – №. 37. – P. 373001.
- [2]. Titov V.A., Rybkin V.V., Shikova T.G., et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2005. – V. 199.– №.2. – P. 231
- [3]. Агафонов А.В. и др. // *Журнал неорганической химии*. – 2022. – Т. 67. – №. 3. – С. 271-280.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАЗМЫ В СТОЛБЕ СВЧ РАЗРЯДА, ПОДДЕРЖИВАЕМОГО СТОЯЧЕЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ

Жуков В.И., Карфидов Д.М.

*Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук,
zhukov.vsevolod@physics.msu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.132

Стоячая поверхностная электромагнитная волна (ПЭВ) $m = 0$ моды [1] возбуждается на плазменном столбе СВЧ разряда между двумя металлическими зеркалами. Отличительная особенность данного эксперимента заключается в самосогласованном режиме: возбуждается стоячая поверхностная волна, которая сама создает и поддерживает плазму. Разряд на поверхностной волне инициировался в длинной кварцевой трубке ($> 10\lambda_0$) волноводным аппликатором [2], мощностью 800 Вт, генерирующим одиночные прямоугольные импульсы длительностью до 50 мс на частоте 2.45 ГГц. Измерения проводились в аргоне в диапазоне давлений от 0.02 Торр до 7 Торр. В работе проведены измерения параметров разряда, таких как профиль плотности плазмы и характеристики электрического поля поверхностной волны для случая свободного разряда и для разряда между зеркалами, поддерживаемого стоячей волной.

Возбуждение стоячей волны на плазменном столбе приводит к формированию локальных минимумов и максимумов плотности плазмы, период которых равен половине длины поверхностной волны. Установлено, что время формирования модулированной структуры близко к характерному времени диффузии, а степень модуляции растет с ростом давления. Экспериментально продемонстрирована возможность создания плазменного столба с модуляцией плотности плазмы $n_{max}/n_{min} \approx 5$ и длиной около 10 длин волн.

Для исследования характеристик электромагнитного поля стоячей поверхностной волны в программе CST Microwave Studio была создана численная модель с заранее заданными значениями плотности плазмы n_e и частотами столкновения электронов с нейтральными атомами ν_n . Эксперимент и численное моделирование демонстрируют, что продольная E_z и радиальная E_r компоненты сдвинуты по фазе друг относительно друга на $\pi/2$. При этом основной вклад в поддержание плазмы вносится компонентой E_z , определяющей распределение плотности. Моделирование позволяет на основании измеренных концентраций электронов оценить соотношение между долями энергии поля ПЭВ в вакууме W_{vac} и внутри плазмы W_{pl} . Так, в хвостовой части разряда, где концентрация электронов стремится к $n_{min} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ (n_{min} – критическая концентрация для распространения ПЭВ [3]) отношение W_{pl}/W_{vac} стремится к единице. При максимально достигнутой в эксперименте плотности плазмы $n_e = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ отношение $W_{pl}/W_{vac} \approx 0.02$, т.е. подавляющая часть энергии поля ПЭВ не проникает в плазму. В таком случае радиальный профиль плотности плазменного столба сильно неоднороден с максимумом концентрации электронов вблизи стенки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-32-90162.

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, vol. 24, p. 1025.
- [3]. Zhukov V.I., Karfidov D.M., K.F. Sergeichev. // Plasma Physics Reports, 2020, vol. 46, No. 8, pp. 760-768.

ТЕРМОДИФфуЗИОННОЕ ОТНОШЕНИЕ В ТРИНАРНОЙ СМЕСИ С ИОНИЗАЦИЕЙ. ПЛАЗМА He.

¹Коршунов О.В., ^{1,2}Кавыршин Д.И., ^{1,2}Чиннов В.Ф.

¹ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, oleg15@inbox.ru,

²НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, dimakav@rambler.ru.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.133

Исследования дуговой плазмы He атмосферного давления в узком канале [1] привели к необходимости расчета потоков и коэффициентов диффузии с помощью газокинетической теории [2]. Одним из диффузионных процессов, происходящих в неізотропных средах с температурными градиентами, является термодиффузия. Ее свойства в ионизованном гелии исследованы в настоящей работе.

Термодиффузия относится к явлениям переноса второго порядка, но в первом приближении теории Чепмена-Энскога термодиффузионные отношения K_i могут быть найдены сравнительно просто. Они определяются линейными комбинациями интегральных скобок полиномов Сонина Λ_{ij}^{01} и Λ_{ij}^{11} [2]. Для их нахождения в тринарной смеси необходимо решить 3 системы линейных уравнений с 3 неизвестными в каждой. Задача предельно упрощается в ионизованном простом газе (индексы: 1 - электрон, 2 - ион, 3 - атом):

$$\frac{2}{5}K_1 = -x_1(\Lambda_{21}^{01} + \Lambda_{31}^{01})/\Lambda_{11}^{11}, \quad (1)$$

$$\frac{2}{5}K_2 = x_1 \frac{\Lambda_{21}^{01}}{\Lambda_{11}^{11}} + \Lambda_{23}^{01} \frac{x_2(\Lambda_{23}^{11} + \Lambda_{33}^{11}) - x_3(\Lambda_{23}^{11} + \Lambda_{22}^{11})}{(\Lambda_{23}^{11})^2 - \Lambda_{22}^{11}\Lambda_{33}^{11}}, \quad (2)$$

$$\frac{2}{5}K_3 = x_1 \frac{\Lambda_{31}^{01}}{\Lambda_{11}^{11}} - \Lambda_{23}^{01} \frac{x_2(\Lambda_{23}^{11} + \Lambda_{33}^{11}) - x_3(\Lambda_{23}^{11} + \Lambda_{22}^{11})}{(\Lambda_{23}^{11})^2 - \Lambda_{22}^{11}\Lambda_{33}^{11}}. \quad (3)$$

В отличие от бинарной смеси у ионов и атомов появляются электронные составляющие - это первые члены правых частей (2), (3). При сильной ионизации мала электронная составляющая атомов, а при слабой - ионов. Второй член правых частей (2), (3) неизменен при переходе к бинарным смесям. Это основная, назовем ее бинарная K_6 , составляющая K_2 и K_3 , которая и определяет диффузионные потоки, хотя по величине она сопоставима с электронной составляющей термодиффузии K_1 . Последняя ускоряет диффузию ионов и замедляет - электронов, но не важна для всего электрон-ионного газа, входящего в бинарную смесь с атомами, так что на диффузионные потоки ионов и атомов электронные составляющие не влияют. Для ионизованного He вторые члены правых частей (2), (3) дают [2]:

$$K_6 \approx -0.16(x_2 + 0.03x_3)/(x_2/x_3 + 0.013x_3/x_2 + 0.23). \quad (4)$$

Малые численные коэффициенты у атомных составляющих незначительны при сильной ионизации. Кулоновские сечения взаимно сокращаются, как и в (1). Остальные сечения слабо зависят от энергии. В слабоионизованной плазме кулоновскими столкновениями можно вообще пренебречь, так что модель твердых сфер применима практически всегда.

В He бинарная составляющая максимальна при $x_1 \approx 0.2$. С ростом x_1 термодиффузионные отношения упрощаются: $K_6 \approx -x_3/6.2 \rightarrow 0$, $K_1 \approx -x_1/6.5 \rightarrow -1/13$. При полной ионизации бинарная составляющая незначительна, а электронная максимальна.

В слабоионизованной плазме ($x_1 \ll 0.02$) все термодиффузионные отношения малы, $K_2 \approx K_6$, а в (4) преобладают слагаемые с малыми численными коэффициентами. В He электронная и бинарная составляющие почти одинаковы: $K_1 \approx K_6 \approx -x_1/2.6$, так что $K_3 = K_6 - K_1 \approx 0$ - термодиффузия атомов, как и в пределе сильной ионизации, прекращается.

Литература

- [1]. О.В. Коршунов, В.Ф. Чиннов, Д.И. Кавыршин Сильноионизованная дуговая плазма He. Неравновесность, неидеальность и кинетика // ТВТ. 2019. Т. 57. № 2. С. 164.
- [2]. Дж. Ферцигер, Г. Капер. Математическая теория процессов переноса в газах./ Пер. с англ. Под ред. Д.Н. Зубарева, М.: Мир, 1976. 554 с.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭТАНОЛА

¹Лебедев Ю.А., ^{1,2}Крашевская Г.В., ¹Батукаев Т.С., ¹Билера И.В.

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.2023.50.2023.1.1.134

В последнее время интенсивно изучаются различные типы разрядов в жидкостях и в частности микроволновые разряды. Микроволновые разряды существуют в газовом пузыре в жидкостях и являются наименее изученным типом разрядов. Эти разряды обладают свойствами, которые отличают их от широко используемых разрядов постоянного, высокочастотного и высокого напряжения. Микроволновая плазма в жидкостях представляет собой чрезвычайно интересный объект для исследования, поскольку часто бывает неравновесной, неоднородной, с большими пространственными градиентами параметров. Плазма, как правило, нестационарная и существует в условиях постоянного обмена энергией и частицами с окружающей жидкой средой.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования микроволновых разрядов в растворах этилового спирта при атмосферном давлении над поверхностью жидкости. Измерения проводились с использованием водного раствора этанола в качестве жидкой среды. В условиях эксперимента изменялась падающая мощность (в диапазоне 500-650 Вт) и объемная концентрация спирта в растворе (в диапазоне 48-96%). Разряд инициировался на конце центрального проводника коаксиальной линии (диаметром 3 мм), сделанного из вольфрама, легированного лантаном. Зажигание разряда регистрировалось с помощью девятикадровой электронно-оптической камеры K011, спектрометра Avaspec-2048x14-USB2 и фотодиода, сигнал с которого выводился на осциллограф АКПП-4126/3А-Х. Для отделения продуктов плазмохимических реакций от паров раствора этанола использовался водяной охладитель. На выходе из реактора определяли скорость образования продуктов с помощью расходомера и состав основных газовых продуктов хроматографическим анализом.

Фотографии момента зажигания разряда и осциллограммы сигнала с фотодиода подтвердили результаты предыдущего исследования [1], описывающего динамику развития микроволнового разряда в жидкости. На разрешенных во времени спектрах имеются характерные для разряда в углеводородах полосы Свана. Кроме того, наблюдаются интенсивные полосы LaO. С использованием программы Speair 3.0 определили вращательные и колебательные температуры частиц, они лежат в диапазоне 3000-4500К. Хроматографический анализ продуктов на выходе из реактора показал, что основными продуктами газовой фазы являются H₂, CO, C₂H₂, C₂H₄, CH₄. В условиях эксперимента состав газовой фазы существенно не менялся. Результаты исследования находятся в согласии с результатами исследования микроволнового разряда в растворах этанола при пониженном давлении над поверхностью жидкости [2].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХХС РАН.

Литература

- [1]. Lebedev Y.A. et al. Light emission from microwave discharges in liquid hydrocarbons at the initial stages of their development //Plasma Processes and Polymers. – 2021. – Т. 18. – №. 10. – С. 2100051.
- [2]. Sun B. et al. Large capacity hydrogen production by microwave discharge plasma in liquid fuels ethanol // international journal of hydrogen energy. – 2017. – Т. 42 – №38. – С. 24047-24054.

НЕОЖИДАННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАЖИГАНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ И МАГНИТНОМ ПОЛЯХ

Строкин Н.А., Ригин А.В.

Иркутский национальный исследовательский технический университет
e-mail: strokin85@inbox.ru, arseniy.rigin@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.135

Понимание того, что поток ионов, покидающих зону самостоятельного разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях ($E \times B$ разряда), может быть индикатором процесса поджига – появления электронов и плазмы в промежутке анод-катод ускорителя с анодным слоем (УАС), привело к проведению эксперимента по измерению величин напряжения зажигания U_{ig} (анод-катод УАС) и радиальной компоненты индукции магнитного поля на катоде УАС B_{rKig} в момент появления сигнала на коллекторе ионов. Дополнительным преимуществом «ионного отслеживания» стала возможность в явном виде показать, что самостоятельный $E \times B$ разряд действительно распространяется на весь промежуток анод-катод, так как на коллектор ионов, который являлся элементом энергоанализатора с задерживающим потенциалом (RFA), в момент зажигания приходят ионы с энергиями $50 \text{ эВ} \leq W_i \leq eU_A$ (U_A – потенциал анода). В результате обнаружены 2 стационарных режима $E \times B$ разряда, причем каждый из них стартует с моментов поджига – резкого роста разрядного тока от 0 (нейтральный газ) до I_1 (точка B на рис. 1а) и с I_1 (стационарный режим аномального тлеющего $E \times B$ разряда) до I_2 (точка D на рис. 1а). Два скачка тока «в режим тлеющего разряда» и в режиме тлеющего разряда – это принципиальное отличие $E \times B$ разряда от разряда без магнитного поля. Можно выстроить следующую линейку генерации $E \times B$ разряда: режим I аномального тлеющего разряда – режим II аномального тлеющего разряда – дуговой разряд.

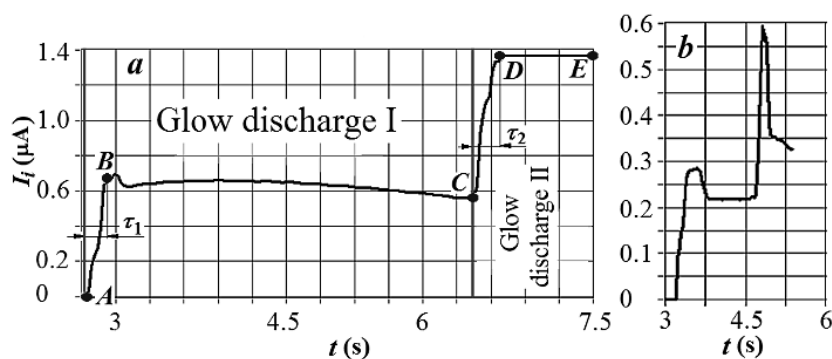


Рис. 1. Кривая зажигания $E \times B$ разряда: $dU_{RFA}/dt = (2 \text{ В})/(30 \text{ мс})$; а) неон, скорость напуска $q_{Ne} = 80 \text{ см}^3/\text{мин}$, $U_{ig} = 1150 \text{ В}$, $B_{rKig.I} = 1477 \text{ Гс}$, $B_{rKig.II} = 2145 \text{ Гс}$; б) аргон, $5 \text{ см}^3/\text{мин}$, $U_{ig} = 1044 \text{ В}$, $B_{rKig.I} = 1427 \text{ Гс}$, $B_{rKig.II} = 1625 \text{ Гс}$.

Работая на смесях инертных газов, нельзя было обойти вниманием эксперименты с «пеннинговскими парами» – в нашем случае смеси неона с аргоном или криптоном, в которых потенциал возбуждения неона в метастабильное состояние около 16.7 эВ, что превышает потенциалы ионизации аргона (15.7 эВ) и криптона (14 эВ). Естественное, «по Пеннингу», поведение кривой зажигания $B_{ig(rK)} = f(q)$ – уменьшение необходимого для зажигания разряда энерговклада со стороны электромагнитного поля – наблюдалось при добавке к неону аргона или криптона как примеси. Однако, если неон был добавкой к аргону или криптону, индукция зажигания возрастала до $q_{Ne} \approx 30 \text{ см}^3/\text{мин}$ и далее монотонно спадала, не достигая при $q_{Ne} \leq 90 \text{ см}^3/\text{мин}$ стартового значения; эффект Пеннинга (в явном виде) здесь не работал. Различие в поведении пеннинговских пар при изменении их роли в паре – основной газ или примесь – объясняется нами различной степенью влияния разряда на распределение потенциала в прикатодной области.

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТНОМ СОПЛЕ МАКЕТА БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Казеев М.Н., Камин Д.В., Козлов В.Ф.,
Кутузов Д.С., Спицын А.В., Сухов А.Е., Шуровский Д.О.,
Янченков С.В., Жильцов В.А.

*НИИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва, Россия,
e-mail: Bragin_EY@nrcki.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.173

На стенде ПН-3 проводятся исследования в поддержку создания отечественного безэлектродного плазменного ракетного двигателя (БПРД). Одна из решаемых задач заключается в исследовании физических процессов, протекающих в магнитном сопле БПРД, в частности, ускорения и срыва истекающего плазменного потока с силовых линий неоднородного магнитного поля.

Магнитное сопло можно разделить на три области. Первая область находится в горловине магнитного сопла, и здесь необходимо определять, в какую компоненту плазмы вкладывается ВЧ энергия, а также радиальные распределения параметров плазменного потока на входе в магнитное сопло. Вторая область представляет собой всю оставшуюся часть магнитного сопла. В этой области требуется построить двухмерные карты всех параметров плазменного потока, прослеживая эволюцию этих параметров по мере расширения плазменного потока в магнитном сопле. Третья область находится на расстоянии от горловины сопла, гарантирующем срыв плазменного потока с силовых линий магнитного поля. Здесь измеряется итоговая функция распределения ионов по энергиям, создаваемая двигателем, тяга и угол срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля.

Разработан диагностический комплекс для исследования плазменных процессов в магнитном сопле. В его состав входят: диамагнитная катушка (изменение энергосодержания плазменного потока), подвижные зонды (двухмерные карты параметров плазмы – электронной температуры и плотности, плазменного потока) и специальные (функция распределения ионов по вращательной энергии) зонды, оптическая эмиссионная спектроскопия (радиальные распределения электронной температуры, плотности и состава плазмы, степени ее ионизации), лазерно-индуцированная флюоресценция (радиальное распределение плотности плазмы), СВЧ интерферометр (эволюция во времени линейной плотности плазмы), сеточный и электростатический анализаторы (локальная функция распределения ионов по энергиям), тензометрический тягомер (локальная плотность тяги, создаваемая двигателем тяга), угломер (локальный угол движения ионов плазменного потока, угол срыва плазменного потока с силовых линий магнитного поля), а также обсуждается возможность использования других диагностик.

Данный диагностический комплекс позволяет проводить необходимые исследования во всех трех областях магнитного сопла и может быть рассмотрен в качестве типового комплекса для исследования физических процессов в магнитном сопле БПРД.

МЕТОДЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ФАЗЫ ИЗ СИГНАЛОВ ГЕТЕРОДИННОГО СВЧ-ИНТЕРФЕРОМЕТРА 95 ГГц ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ В РАЗРЯДАХ НА СТЕНДЕ ПН-3

Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Дрозд А.С., Сергеев Д.С., Сухов А.Е.,
Диас Михайлова Д.Е., Жильцов В.А., Хайрутдинов Э.Н.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, 970107@bk.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.137

В НИЦ «Курчатовский институт» проводятся плазменные эксперименты на макете геликонного двигателя [1], которым является стенд ПН-3 [2, 3]. Измерения плотности плазмы осуществляются гетеродинным СВЧ-интерферометром [4], зондирование плазмы осуществляется обыкновенными волнами в вертикальном направлении в области диагностического объема. Частота зондирующего излучения составляет 95 ГГц, измерения проводятся на промежуточной частоте в 78 МГц с последующим понижением до 200 кГц, также выводится сигнал с задающего кварцевого осциллятора частотой в 10 МГц.

Величина фазового сдвига при зондировании плазмы обыкновенными электромагнитными волнами пропорциональна плотности прозондированной плазмы [5]. Целью работы является сравнение различных методов извлечения фазы из сигналов СВЧ-интерферометра стенда ПН-3: постобработка оцифрованных сигналов с применением преобразования Гильберта и по пересечению нуля, получение данных с фазового детектора AD8302, постобработка сигналов с квадратурного детектора.

Сигнал с задающего кварца (10 МГц) делился по частоте в 50 раз (референсный 200 кГц) и использовался в качестве опорного. Для уменьшения паразитного взаимного влияния при разветвлении сигналов использовались повторители напряжения на операционных усилителях. Для наладки оборудования и определения точности измерения каждой из методик подавались сигналы от генератора сигналов специальной формы АКПП-3409/3, которые имитировали сигналы гетеродинного СВЧ-интерферометра.

В работе приводятся характерные величины фазовой ошибки при использовании каждого метода без дополнительной фильтрации и после применения фильтра по частотам. Представлены результаты обработки экспериментальных данных линейной плотности плазмы, измеренные с помощью СВЧ-интерферометра на стенде ПН-3. Одновременно велся сбор данных с фазового и квадратурного детекторов, а также сигналы ПЧ2 (200 кГц) и референсный (200 кГц), после чего полученные данные обрабатывались и анализировались. В результате анализа указывается на преимущества и недостатки каждого из используемых методов, а также пути их совершенствования.

Литература

- [1]. Takahashi K. Helicon-type radiofrequency plasma thrusters and magnetic plasma nozzles //Reviews of Modern Plasma Physics. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 1-61.
- [2]. Zhil'tsov V.A., Kulygin V.M. Fusion and Space //Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – Т. 82. – №. 7. – С. 963-976.
- [3]. Kutuzov D. S. PN-3 helicon plasma device as a testing facility for plasma propulsion study //Space Propulsion Conference. – 2021. – SPC2020_0301
- [4]. Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Дрозд А.С., Сергеев Д.С., Сухов А.Е. Первые результаты измерений плотности плазмы гетеродинным СВЧ-интерферометром 95 ГГц на стенде ПН-3 Сборник трудов VIII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022»: Москва, НИЯУ «МИФИ», 22-25 марта 2022 г., с. 134.
- [5]. Veron D. Submillimeter interferometry of high-density plasmas. NY: Academic Press, 1979.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА СТЕНДЕ ПН-3

Брагин Е.Ю., Бунин Е.А., Камин Д.В., Сухов А.Е., Стрижаков М.Г.

НИИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, Sukhov_AE@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.138

Стенд ПН-3 предназначен для исследований процессов в безэлектродном плазменном ракетном двигателе (БПРД). Рабочий газ (водород, аргон, неон и др.) подается в трубу из кварцевого стекла, где ионизируется с помощью геликонного плазменного источника. Для изучения срыва плазменного потока с силовых линий в магнитном сопле требуется полученную в источнике плазму дополнительно ускорить. С этой целью предлагается вкладывать энергию в поперечное движение ионов методом ионно-циклотронного резонансного нагрева (ИЦРН). Поперечная составляющая кинетической энергии ионов в дальнейшем преобразуется в продольную в объеме магнитного сопла. Таким образом, система ИЦРН позволит интенсифицировать срыв плазмы в исследуемой области.

В экспериментах в качестве рабочего газа выступает водород, что определяется магнитной конфигурацией установки и частотой высокочастотного (ВЧ) генератора.

Следует отметить, что ИЦРН происходит при выполнении известного соотношения [1]. Это условие формирует набор технических требований, необходимых для реализации данного метода нагрева.

В работе демонстрируются результаты проектирования и модернизации стенда ПН-3 для создания условий ИЦРН нагрева водородной плазмы. В частности, модификация вакуумной системы стенда для откачки водорода и реализация системы ВЧ источника на частоте 1,7 МГц мощностью до 10 кВт.

Также в докладе представлены первые результаты экспериментов, в которых были измерены энергетические спектры ионов сеточным анализатором, электронная концентрация гетеродинным СВЧ интерферометром, а также измерения тягомером.

Литература

- [1]. Тимофеев А.В. О ВЧ-нагреве неоднородной столкновительной плазмы в условиях ИЦР // Физика плазмы. – 2015. – Т. 41. – №. 11. – С. 946-954.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ АНТЕННО-ПЛАЗМЕННОЙ СВЯЗИ

Бунин Е.А., Камин Д.В., Сухов А.Е., Стрижаков М.Г.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, Sukhov_AE@nrcki.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.139

Геликонный плазменный разряд является перспективным источником низкотемпературной плазмы, обладающей высокой степенью ионизации и высокой плотностью. Такие источники плазмы нашли применение во многих областях, и в частности в качестве источников плазмы для ракетных двигателей.

Эффективность вкладывания мощности в плазму является одним из ключевых вопросов при работе геликонного источника плазмы (ГИП) при мощностях, превышающих десятки киловатт. Антенно-плазменная связь при геликонном разряде зависит от таких параметров, как конфигурация внешнего магнитного поля, расход и давление рабочего тела в разрядной камере. Данным зависимостям посвящен ряд теоретических работ [1,2], включающих в себя аналитические и численные расчёты. Так или иначе, данные работы основаны на идеализации некоторых параметров. Таким образом, в приложении мощных плазменных источников требуется проведение экспериментальных исследований для получения эмпирических зависимостей.

Технически эффективность антенно-плазменной связи определяет сопротивление, вносимое плазмой в контур антенно-фидерного устройства ГИП. Как следствие, от перечисленных параметров зависят вкладываемая мощность в плазму, а также КПД разряда.

Серия экспериментов, результаты которых представлены в данной работе, была проведена на стенде ПН-3. Данный стенд является макетом безэлектродного плазменного ракетного двигателя, в котором источником первичной низкотемпературной плазмы является ГИП.

В работе представлены результаты параметрических измерений импеданса антенно-плазменной нагрузки, высокочастотных параметров разряда, плазменные параметры.

Исходя из полученных эмпирических зависимостей, сформулированы общие рекомендации по проектированию высокочастотных систем ГИП с целью оптимизации вклада мощности в плазму.

Литература

- [1]. Господчиков Е.Д., Тимофеев А.В. О возбуждении геликонов токовыми антеннами // Физика плазмы. – 2017. – Т. 43. – №. 6. – С. 538-547.
- [2]. Tian B., Merino M., Ahedo E. Two-dimensional plasma-wave interaction in an helicon plasma thruster with magnetic nozzle // Plasma Sources Science and Technology. – 2018. – Т. 27. – №. 11. – С. 114003.

ИЗУЧЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ СГУСТКОВ, СОЗДАВАЕМЫХ ПРИ АВТОРЕЗОНАНСНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ, МЕТОДАМИ РЕНТГЕНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И РЕНТГЕНОГРАФИИ

Андреев В.В., Новицкий А.А.

Российский университет дружбы народов, Москва, РФ, temple18@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.140

Исследования процессов ускорения заряженных частиц остаются одним из важнейших направлений изучения лабораторной, космической и астрофизической плазме. Одним из возможных типов взаимодействия является циклотронный авторезонанс [1]. Характер ускорения частиц существенно зависит от типа взаимодействия: в бегущей волне или в стоячей волне. В схеме микроволнового ускорителя на бегущей волне режим поддерживается с помощью профилирования ведущего магнитного поля, и большая часть энергии пучка запасается в аксиальной компоненте скорости [2]. Механизм циклотронного авторезонанса в поле стоячей волны поддерживается с помощью варьирования внешнего магнитного поля со временем или в пространстве [3, 4]. Ранее [5] было показано, что авторезонансное взаимодействие в длинном пробкотроне приводит к генерации устойчивых плазменных сгустков с энергичной электронной компонентой масштаба сотен кэВ.

Текущие исследования проводились при следующих параметрах: давление плазмообразующего газа (Ar) - $1 \cdot 10^{-5}$ Торр, СВЧ мощность - $P_{\text{УHF}} = 2,5$ кВт, $t_{\text{imp}} = 1,1$ мс, длительность импульсного магнитного поля - $t_{\text{imp}} = 900$ мкс, $V_{\text{pulse}} = 350 \div 500$ Гс, период повторения рабочих циклов $T = 35$ мс. Исследования были ориентированы на выяснение возможной степени влияния параметров взаимодействия и экспериментальной установки на эффективность захвата электронов в режим ускорения, которое оценивалось по основным параметрам регистрируемых спектров тормозного (ТИ) и характеристического рентгеновского излучения (ХРИ), излучаемого при взаимодействии плазменного сгустка с газовой и твердотельной мишенями. Положительными сторонами применяемой диагностики (ХРИ) являются монохроматичность и изотропность излучения, что обеспечивает необходимую точность и не накладывает жесткие требования на пространственное размещение детектора спектрометра. Совместный анализ сигналов диагностических систем, регистрируемых спектров, рентгенограмм позволил выявить тенденции в поведении спектральных и интегральных характеристик регистрируемых излучений при изменении параметров импульсных полей, обеспечивающих рабочий режим. Наблюдаемая корреляция диаграмм направленности, параметров спектров (ТИ и ХРИ), а также временных характеристик сигналов ФЭУ и рентгенограмм позволили установить общие закономерности в динамике плазменных сгустков в пределах пробкотрона. Анализ восстановленных спектров ТИ и ХРИ в абсолютных единицах, полученных с учетом поглощения в окнах регистрации и пространственно-угловых характеристик коллимационных систем регистрации, позволил определить зависимость числа захваченных частиц при изменении параметров авторезонансного взаимодействия и начальных условий заполнения ловушки первичной плазмой.

Литература

- [1]. В.П. Милантьев Успехи физических наук, т. 183, 8, 875. (2013)
- [2]. R. Shpitalnik et al. J. Appl. Phys. **70** (3) 1101 (1991)
- [3]. V.V. Andreev, K.S. Golovanivsky, *Physics Letters* 100A, (1984)
- [4]. V.V. Andreev, D.V. Chuprov, V.I. Ilgisonis, A.A. Novitsky and A.M. Umnov, *Physics of Plasmas* 24 093518 (2017)
- [5]. V.V. Andreev, A.A. Novitsky and A.M. Umnov *Phys. Plasmas* 28, 092507 (2021)

ЭНЕРГИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В АСИММЕТРИЧНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ В ПРИБЛИЖЕНИИ ПУАССОНА-БОЛЬЦМАНА В СРЕДНЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ ВИГНЕРА-ЗЕЙТЦА И В КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ПОЛОСТИ

^{1,2}Мартынова И.А., ^{1,2}Иосилевский И.Л.

¹*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия, martina1204@yandex.ru*

²*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.141

Авторы рассматривают двухкомпонентную равновесную электронейтральную систему классических макроионов конечных размеров с зарядом $Z \gg 1$ и точечных противоположно заряженных микроионов с единичным зарядом в приближении Пуассона–Больцмана в средней сферически-симметричной ячейке Вигнера–Зейтца [1] и в корреляционной полости [2,3]. Указанное приближение Пуассона–Больцмана в корреляционной полости является модификацией приближения Дебая–Хюккеля в корреляционной полости для двухкомпонентной системы [4]. Вследствие учета эффекта нелинейного экранирования предложен способ приближенного деления всех микроионов системы на два сорта (свободных и связанных) и отмечено значительное уменьшение эффективного заряда Z^* по сравнению с исходной величиной заряда макроиона Z за счет экранирования плотной сферой связанных микроионов. В работе рассчитана полная энергия взаимодействия всех частиц в системе [3] и продемонстрировано отличие от более ранних работ [4, 5]. Результаты использованы авторами для расчета свободной энергии и давления в средней сферически-симметричной ячейке Вигнера–Зейтца.

Литература

- [1]. Martynova I., Iosilevskiy I. J. Phys.: Conf. Ser., 2018, Vol. 946, P. 012147.
- [2]. Martynova I.A., Iosilevskiy I.L. Contrib. Plasma Phys., 2019, V. 59(4-5), P. e201800154.
- [3]. Martynova I.A., Iosilevskiy I.L. Contrib. Plasma Phys., 2022, V. 62(9), P. e202200110.
- [4]. Khrapak S.A., Khrapak A.G., Ivlev A.V. and Morfill G.E. Phys. Rev. E, 2014, V. 89, P. 023102.
- [5]. Farouki R.T., Hamaguchi S. J. Chem. Phys., 1994, V. 101, P. 9885-9883.

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР РАЗРЯДА С ВЫСОКИМ УДЕЛЬНЫМ ЭНЕРГОВКЛАДОМ

^{1,2}Поляков А.В., ^{1,2}Изотов И.В., ^{1,2}Скалыга В.А., ^{1,2}Выбин С.С., ^{1,2}Киселёва Е.М.,
¹Боханов А.Ф.

¹Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Россия

²Национальный исследовательский университет им. Н.И. Лобачевского», г. Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.142

На сегодняшний день плазменные источники одно- и многозарядных ионов (МЗИ) на основе разряда, поддерживаемого в магнитных ловушках мощным электромагнитным излучением в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), являются одними из наиболее перспективных типов ионных источников, широко применяемых как в прикладных, так и в фундаментальных задачах.

Существует два основных типа ЭЦР ионных источников: классический и газодинамический. В классических системах плазма удерживается в так называемом бесстолкновительном режиме, характеризующимся низкой плотностью плазмы, высокой средней энергией электронов и долгим временем их жизни в ловушке. В газодинамических — высокая плотность плазмы, высокая частота столкновений и короткое время жизни в ловушке. Это ведет к высокому среднему заряду ионов в пучке и сравнительно небольшому току (около 1 мА) у первого типа источников и высокому току (около 100 мА) и низкому среднему заряду ионов у второго типа соответственно.

В Институте прикладной физики РАН был разработан интенсивный ЭЦР ионный источник с газодинамическим типом удержания GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation) работающий в непрерывном режиме. Плазма создается СВЧ излучением гиротрона на частоте 28 ГГц с мощностью до 10 кВт и удерживается в магнитном поле, создаваемым постоянными магнитами. Благодаря уникальной комбинации параметров энерговыдел может достигать 200 Вт/см³.

Газодинамические источники могут использоваться в различных областях и применяться как: источник многозарядных ионов, инжектор пучков легких ионов высокой интенсивности, компактный нейтронный генератор для борнейтронозахватной терапии (БНЗТ), точечный источник нейтронов для нейтронной томографии и т.д.

В данной работе проведено исследование зависимости параметров плазмы в ЭЦР-разряде с мощным нагревом плазмы от давления нейтрального газа (водород и гелий) и мощности СВЧ-излучения в широком диапазоне их значений. Знание этих зависимостей полезно для настройки источника ЭЦР на желаемый режим работы.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА ГЕЛИКОННОГО ТИПА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Степанов Н.О., Черкез Д.И., Ананьев С.С., Спицын А.В.

НИИ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, 6121591@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.145

Одной из приоритетных задач при проектировании термоядерных реакторов (ТЯР) следующих поколений является изучение взаимодействия плазмы с материалами первой стенки. Необходимость проведения исследований в этом направлении обусловлена условиями эксплуатации обращенных к плазме материалов (ОПМ). Во время работы ТЯР первая стенка будет подвергаться воздействию больших плазменных и нейтронных потоков. При этом одним из компонентов топливной смеси является тритий, радиоактивный изотоп водорода, который может проникать в ОПМ и затем диффундировать через конструкционные материалы реактора в теплоноситель, что в свою очередь накладывает серьезные ограничения с точки зрения радиационной безопасности. Для проведения прикладных исследований по взаимодействию водородной плазмы с поверхностью наиболее интересны высокопоточные плазменные генераторы, имитирующие плазменные потоки существующих и строящихся термоядерных реакторов, которые соответствуют следующим требованиям: высокая плотность и однородность плазмы, отсутствие примесей и возможность работы в стационарном режиме. Источники плазмы на основе безэлектродных ВЧ-генераторов, в частности с индукционным разрядом геликонного типа, отвечают необходимым требованиям и имеют ряд преимуществ: возможность варьирования плотности и потока плазмы в широком диапазоне, отсутствие эродирующих в ходе горения разряда электродов, компактность и возможность получения плотности плазмы $\sim 10^{17} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В то же время, установки такого типа чувствительны к внешним параметрам: давлению газа и величине магнитного поля [1].

В работе представлены результаты экспериментальных серий по определению параметров разряда экспериментального источника геликонной плазмы ГПИ-2 на основе ВЧ-генератора, работающего на частоте 13,56 МГц, и максимальной выходной мощностью 2 кВт [2]. Установка предназначена для изучения взаимодействия водородной плазмы с перспективными материалами ТЯР. В качестве рабочего газа используется тяжелый изотоп водорода, дейтерий, а также возможно добавление примесей – гелия или аргона. Для экспериментального стенда спроектирована и изготовлена зондовая диагностика плазмы, представленная одиночным и двойным зондом Ленгмюра, с помощью которой определены температура (меняется в диапазоне от 3,9 до 5,9 эВ, при варьировании вводимой мощности от 300 до 2000 Вт) и концентрация (меняется в диапазоне от $7 \cdot 10^{15}$ до $1 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$, при варьировании вводимой мощности от 300 до 2000 Вт) электронов при различных режимах работы, а также величина ионного тока в месте установки экспериментальных образцов, рассмотрена модернизация, с добавлением возможности линейного перемещения. Полученные результаты подтверждают возможность работы источника плазмы в ожидаемом диапазоне плотностей ионов $10^{20} - 10^{22} \text{ ионов}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.

Работа была частично поддержана Российским научным фондом (№ 18-72-10162).

Литература

- [1]. Е.И. Кузьмин, И.В. Шиховцев. Геликонный источник плотной плазмы для линейных плазменных установок // Физика плазмы. –2021. –№6. –С. 507 – 517.
- [2]. Д.И. Черкез, Н.П. Бобырь, А.В. Спицын, С.С. Ананьев. Проект установки для изучения взаимодействия плазмы с материалами на основе ВЧ-источника геликонного типа // Вопросы атомной науки и техники. –2020. –№3.–С. 101 – 110.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИЛОЖЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОГО ЭЛЕКТРОДА И ВЫХОД ПРОДУКТОВ В ГАЗОВУЮ ФАЗУ

^{1,2} Кашапов Л.Н., ^{1,2}Кашапов Р.Н., ^{1,2} Кашапов Н.Ф., ¹Чебакова В.Ю.

¹ Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия, vchebakova@mail.ru

² Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия, kashlenar@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.146

В настоящее время во всем мире происходит поиск технологий, позволяющих использовать возобновляемые источники энергии, что связано как с ухудшением экологической обстановки, так и с возрастающими потребностями в электроэнергии. Одним из направлений альтернативной энергетики является водородная энергетика. Одним из способов получения водорода является плазменный электролиз. Важным фактором, влияющим на характеристики разряда, является выход в зону разряда радикалов водорода, кислорода и гидроксидов под действием ионной бомбардировки и электролиза [1]. Так в работе [2] проведено численное моделирование кинетических химических реакций перехода радикалов воды из жидкой в газовую фазу под действием закона Генри, было отмечено увеличение пероксида водорода в растворе с увеличением тока разряда.

Данная работа является продолжением [3] и в ней представлено численное исследование пространственной математической модели процессов электролиза гидроксида натрия между инертным и воздушным электродами. При построении данной модели учитывалось, что на разделе сред жидкость-газ концентрация гидроксильной группы убывает как за счет реакции выделения кислорода, так и за счет диффузии через поверхность, в первом приближении массообмен гидроксильной группы описан законом Генри. Константы переноса для закона Генри взяты из [4]. При постановке граничных условий считалось, что на отрицательном инертном металлическом электроде происходит реакция диссоциации воды, константы данного гетерогенного процесса рассчитываются через напряжение на электроде, концентрация ионов натрия принимается за «нулевою».

Математическая модель включает в себя: уравнения Нернста-Планка для заряженных частиц, уравнение для потенциала электрического поля. Напряжение на металлическом электроде представлено через потенциал разложения воды и перенапряжения.

Численные исследования проведены как при постоянном токе, так и при импульсном режиме.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-79-30062)."

Литература

- [1]. Bruggeman, P.J. et al. Plasma-liquid interactions: a review and roadmap / P.J. Bruggeman et al. // Plasma Sources Science and Technology. – 2016. – V. 25, art.053002
- [2]. Takeuchi N., Ishii Y. and Yasuoka K., Modelling chemical reactions in dc plasma inside oxygen bubbles in water Plasma Sources Sci. Technol. 21 (2012) 015006
- [3]. Асхатов Р.М, Кашапов Р.Н., Кашапов Н.Ф., Чебакова В.Ю. Численное моделирование пространственных распределений водородного показателя и электрического поля в жидком электроде // XLVII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. М.: ЗАО НТИЦ ПЛАЗМАИОФАН, 2020 - 181с.
- [4]. Spyros N. Pandis and John H. Seinfeld, Sensitivity Analysis of a Chemical Mechanism for Aqueous-Phase Atmospheric Chemistry// Journal of geophysical research, L. 94, №. D1, pp. 1105-1126

ОТРАЖЕНИЕ ПЛАЗМЕННОЙ ВОЛНЫ ОТ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО БАРЬЕРА, СОИЗМЕРИМОГО С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ

Матвеев А.И.

*Южный федеральный университет, г. Ростов на Дону, Россия,
ya.matveev.alexandr@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.147

С развитием исследований по удержанию плазмы в магнитных ловушках открытого типа (пробкотронах) [1, 2] при изучении колебаний в плазменных волноводах становится актуальной задача отражения плазменных колебаний от границы плазмы, ширина которой соизмерима с длиной волны. Отражение плазменных колебаний от плоской границы полупространства, занятого плазмой, в линейном приближении рассматривалось в [3, 4]. В [5] показано, что задача отражения плазменных колебаний от потенциального барьера, ширина которого соизмерима с длиной волны, является существенно нелинейной. Главной особенностью отражения плазменной волны от потенциального барьера, высота которого значительно больше потенциала волны, является то, что плазменные колебания внутри барьера разрушаются. Однако, благодаря инерции, в каждом пучке электронов с одинаковой энергией модуляция по плотности в области барьера в течение времени, меньшего времени релаксации, сохраняется. Это накладывает ограничение на ширину барьера: она не должна превышать полудлины волны. В области барьера такого рода конвективные или сносные колебания в пучках с разной энергией движутся с разными скоростями и проходят неодинаковые по величине пути. Причем пучки электронов с большей энергией в области потенциального барьера проходят больший путь, чем пучки с меньшей энергией. Поэтому фаза конвективных колебаний в пучке с большей энергией отстает от фазы конвективных колебаний в пучке с меньшей энергией. После отражения от потенциального барьера и возвращения пучков к основанию барьера конвективные колебания в пучках разной энергии собираются вместе, происходит их интерференция. Таким образом формируется отраженная волна. На основе закона сохранения импульса и энергии показано, что в процессе отражения потери энергии плазменных колебаний не происходит. Так как у конвективных колебаний в пучках с разными скоростями в области барьера появляется отставание по фазе, то после их интерференции у отраженной волны появляется запаздывание фазы относительно фазы падающей волны. В случае параболического барьера это запаздывание вычислено точно, оно не зависит от температуры. Запаздывание фазы отраженной волны относительно фазы падающей волны после отражения от параболического барьера растет с увеличением ширины барьера и величины фазовой скорости волны и уменьшается с увеличением высоты барьера. В случае линейного роста потенциала барьера запаздывание фазы падающей волны зависит от температуры плазмы. Если плазма низкотемпературная, то отставание фазы отраженной волны от фазы падающей волны мало. С ростом температуры плазмы запаздывание по фазе отраженной волны растет линейно, пока тепловая энергия электронов меньше половины максимальной потенциальной энергии барьера. Затем рост запаздывания по фазе отраженной волны прекращается, и оно стремится к значению $\pi/2$. С увеличением ширины барьера это запаздывание также сначала растет линейно, затем рост прекращается, и запаздывание по фазе не превышает значения $\pi/2$.

Литература

- [1]. Рютов Д.Д. // УФН. –1988. – Т. 154. Вып. 4. – С. 565-614
- [2]. Судников А.В., Беклемишев А.Д., Иванов И.А. XLVIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 15-19 марта 2021 г.
- [3]. Латышев А. В., Юшканов А. А. // ТМФ. – 2007. – Т. 150, № 3. – С. 498–510.
- [4]. Renato A. G. // Phys. Plasmas – 2020. – V2. – P. 112105.
- [5]. Матвеев А.И. // Известия вузов. Физика. – 2022. – Т. 65, № 9. – С.131–140.

КИНЕТИКА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ В ТЛЕЮЩЕМ РАЗРЯДЕ В ГЕЛИИ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ И ПОВЫШЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В АНАЛИТИКЕ

Сайфутдинов А.И.

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им.А.Н.Туполева - КАИ, г. Казань, Россия, as.uav@bk.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.148

Актуальной проблемой современной физики газоразрядной плазмы как с фундаментальной точки зрения, так и с точки зрения прикладных возможностей является исследование прикатодной плазмы тлеющего разряда (ТР) в широком диапазоне давлений. Как известно, в ТР генерируется две отличающиеся по своим свойствам плазмы: прикатодная плазма, включающая в себя плазму отрицательного свечения (ОС) и Фарадеева темного пространства (ФТП) и плазма положительного столба (ПС) [1,2]. По сравнению с ПС плазме ОС и ФТП продолжительное время не уделялось должного внимания [1,2]. Несмотря на это, для разрядов при низких давлениях было установлено, что плазма в ОС формируется пучком быстрых электронов, набравшим свою энергию в катодном слое и, тем самым, источник ионизации является нелокальным [1,2]. При этом температура основной группы электронов в отличие от плазмы ПС является низкой и составляет десятые доли от 1 эВ. Кроме того, функция распределения электронов (ФРЭ) в плазме ОС и ФТП является нелокальной. Эти особенности открыли возможность идентификации примесей в буферном гелии в плазме ОС короткого ТР по регистрации спектров быстрых электронов, появившихся в реакциях пеннинговской ионизации (ПИ).

Целью представленной работы было проведение численных и экспериментальных исследований плазмы ОС короткого ТР при низких и высоких давлениях. Для этого была сформулирована самосогласованная гибридная модель короткого ТР в гелии. Она основана на кинетическом уравнении Больцмана, записанном двухчленном Лоренцовском приближении, гидродинамическом описании тяжелой компоненты плазмы, уравнении Пуассона и уравнении теплопроводности. Элементарные процессы учитывали образование синглетного и триплетного состояний атома гелия, метастабильный уровень молекулярного гелия, а также атомарный и молекулярный ионы гелия. Набор плазмохимических реакций был скомпилирован из работ [3,4]. На основе сформулированной модели были проведены численные расчеты при давлениях от 300 Па до 60 кПа. Результаты продемонстрировали экспериментально наблюдаемую картину в распределении параметров плазмы ОС. На изотропной и анизотропной частях ФРЭ было показано формирование узких пиков от характеристических электронов, рожденных в результате ПИ примесей атомарных и молекулярных газов (Ar , N_2 , O_2 , и CO_2), углеводородов (CH_4 и $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), их производных и метастабильных атомов гелия. Численный анализ позволил определить чувствительность метода регистрации примесей в плазме ОС. Она составила одну сто тысячную долю, что соответствует современным масс-спектрометрическим методам. Верификация результатов моделирования с результатами расчетов по PIC/MCC модели [3] и валидация модели с собственными зондовыми исследованиями показали хорошее количественное согласие.

Литература

- [1]. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда - Долгопрудный: Интеллект, 2009. — 736 с.
- [2]. Кудрявцев А.А. и др. Физика тлеющего разряда: учебное пособие / Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д.- СПб. Лань, 2010.-512 с.
- [3]. Kutasi K. et al // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. 13, S1-S8.
- [4]. Deloche R. et al // Physical Rev. A. 1976. 13. 3. P 1140-1176

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСПАРЕНИЯ МАТЕРИАЛА ТУГОПЛАВКИХ И НЕТУГОПЛАВКИХ ЭЛЕКТРОДОВ НА ПАРАМЕТРЫ СЛАБОТОЧНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА

Сайфутдинов А.И., Сорокина А.Р., Сайфутдинова А.А.

*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева - КАИ, as.uav@bk.ru, adelia-k@yandex.ru, aliya_2007@list.ru*

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.149

В работе получили развитие самосогласованные модели газовых разрядов постоянного тока, описывающие процессы, протекающие в газоразрядном промежутке и в электродах [1–4]. В представленной работе произведен учет влияния испарения материала электродов на распределения основных параметров плазмы в дуговых разрядах атмосферного давления в аргоне с графитовыми (тугоплавкими) электродами и медными (нетугоплавкими) электродами, поддержание тока в которых обеспечивается термоэлектронной эмиссией и термоавтоэлектронной эмиссией, соответственно.

Помимо плазмохимических процессов в аргоне [1] для разряда с графитовыми электродами был составлен достаточно подробный набор плазмохимических реакций, учитывающий формирование нейтральных частиц углерода C , C_2 , C_3 , их ионов C^+ , C_2^+ , C_3^+ и возбужденных состояний C^* , C_2^* , C_3^* . Для разряда с медными электродами учитывался набор элементарных процессов с участием атомов меди, взятый из работ [3], в которых учитывались процессы с образованием атомарных ионов меди.

В результате численных экспериментов в широком диапазоне вкладываемой мощности в рамках одномерной геометрии было исследовано влияние испарения материала электродов на характеристики дугового разряда. Показано, что при достижении критического значения плотности тока наблюдается скачкообразное изменение параметров плазмы: на вольт-амперной характеристики разряда и на усредненных по газоразрядному промежутку значениях концентраций заряженных частиц. Наблюдается переход от дугового разряда в атмосфере аргона к дуге в парах углерода или в парах меди.

Литература

- [1]. Saifutdinov A.I. et al. // JETP Lett. 2016. 104, P.180–185.
- [2]. Saifutdinov A.I. // J. Appl. Phys. 2021. 129, 093302.
- [3]. Baeva M. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2021. 54 025203.
- [4]. Saifutdinov A.I. // Plasma Sources Sci. Technol. 2022. 31 094008

МЕХАНИЗМЫ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОРОГ ВОЗБУЖДЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ-ЦИКЛОТРОННЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ПРЯМОЙ МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

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

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия, egos@ipfran.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.150

Развитие кинетических электронных циклотронных (ЭЦ) неустойчивостей в плазме, удерживаемой в прямой магнитной ловушке, ответственно за широкий диапазон явлений как в астрофизической, так и в лабораторной плазме [1]. В частности, было показано, что такие неустойчивости существенно ограничивают предельные параметры работы ЭЦР источников многозарядных ионов [2].

Подробные экспериментальные исследования ЭЦ неустойчивостей в лабораторных прямых магнитных ловушках позволили не только продемонстрировать управляемый переход между предсказанными теоретически режимами генерации микроволнового излучения в нелинейной стадии развития этих неустойчивостей, что важно с точки зрения оптимизации работы ЭЦР ионных источников [3], но и позволяют глубже исследовать механизмы потерь энергичных электронов.

В настоящей работе в рамках концепции циклотронного мазера был исследован порог развития ЭЦ неустойчивостей; показано, что он существенно определяется соотношением между интенсивностями «диффузионного» и «тормозного» механизмов потерь энергичных электронов. Продемонстрировано, что теория воспроизводит основные особенности экспериментальных зависимостей порога возбуждения неустойчивости от величины магнитного поля в ловушке. Путем сравнения с экспериментальными данными найдено отношение между характерными временами питч-угловой диффузии и торможения энергичных электронов в лабораторной ловушке JYFL.

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

Литература

- [1]. Shalashov A.G., Gospodchikov E.D., Izotov I.V. Plasma Phys. Control. Fusion 2020, 62 065005
- [2]. Tarvainen O. et al., Review of Scientific Instruments 2015, 86, 023301
- [3]. Skalyga V.A. et al, J. Phys. D: Appl. Phys. 2021, 54, 385201

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ ПРИ ИНЖЕКЦИИ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

^{1,2}Лосева Т.В., ^{1,2}Урвачев Е.М., ¹Зецер Ю.И., ^{1,2}Ляхов А.Н., ¹Косарев И.Б.,
¹Поклад Ю.В.

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.2023.50.2023.1.1.151

Изучение процессов образования и слияния плазменных струй является важной частью исследований в астрофизике [1], фундаментальной физике высоких энергий и физике УТС [2]. Разработанная нами методика инжекции высокоскоростных плазменных струй в ионосферу Земли позволяет максимально приблизить условия проведения эксперимента к астрофизическим и исключить влияние отражения излучения и раннего замыкания индуцированных токов на стенках камеры. К настоящему времени успешно проведены инжекции одиночных струй в опытах «Флакрус» (на высоте 140 км) и «Северная звезда» (350 и 270 км). Алюминиевая плазма создавалась взрывным генератором ВГПС, имела энергию 3–6 МДж, массу 40 г и обладала начальной скоростью 40 км/сек.

Переход к множественной инжекции позволит повысить эффективность преобразования энергии плазмы в оптическое излучение с регулированием спектральных характеристик сменой рабочего материала, до свинца включительно. На начальной стадии множественной инжекции излучение отдельных струй меняет ионизационное состояние среды на пути других струй. Поэтому в целях планирования следующего эксперимента была поставлена задача исследовать влияние геометрии множественной инжекции в трех следующих сценариях: встречная инжекция, последовательная инжекция и классическое слияние плазменных струй при заданном угле схождения. Для каждого генератора использовалась зависимость от времени газодинамических параметров плазмы при ее инжекции из сопла генератора (сценарий инжекции), определенная в [3], которая показала хорошее согласие данных расчетов со всеми имеющимися данными измерений как в лабораторных, так и в ионосферных экспериментах.

Динамика взаимодействия двух и более алюминиевых плазменных струй, инжестируемых с помощью взрывных генераторов ВГПС, исследовалась с помощью численного 3D моделирования. Использовался многомерный радиационно-газодинамический код FRONT, основанный на явной схеме годуновского типа на фиксированной эйлеровой сетке (XYZ геометрия).

Получено, что взаимодействие струй приводит к существенному увеличению температуры результирующей струи и смещению спектра излучения плазмы струи в более коротковолновую часть спектра, включая вакуумный ультрафиолет.

Литература

- [1]. Underwood T.C., Loebner K.T.K., Miller V.A. et al. Dynamic formation of stable current-driven plasma jets. *Sci Rep* 9, 2588 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39827-6>
- [2]. Wen H., Ren C., Hansen E. C., Michta D., Zhang Y., Langendorf S. and Tzeferacos P. Particle-in-cell modeling of plasma jet merging in the large-Hall-parameter regime. *Physics of Plasmas* 29, 062706 (2022) <https://doi.org/10.1063/5.0087035>
- [3]. 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

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЦР РАЗРЯДА

^{1,2}Киселёва Е.М., ^{1,2}Изотов И.В., ^{1,2}Викторов М.Е., ^{1,2}Скалыга В.А., ^{1,2}Поляков А.В.

¹Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.152

Кинетические неустойчивости свистовых волн, возникающие в плазме, часто встречаются в космосе, однако также хорошо изучены и в лабораторном моделировании. В магнитосфере Земли такие волны возникают за счёт энергичных резонансных частиц, распространяющихся под малым углом к магнитному полю, удерживающему их. Процессы, происходящие в космосе, хорошо поддаются изучению в лабораторных условиях. Например, свистовые волны зачастую возникают в плазме разряда, поддерживаемого в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Это происходит из-за наличия неустойчивой и анизотропной функции распределения энергичных электронов.

Одно из важных направлений исследований в области ЭЦР ионных источников — повышение их эффективности. Оно осуществляется, в первую очередь, за счёт усовершенствования систем магнитного удержания и параметров греющего излучения, поддерживающего разряд. Однако, как было показано ранее (например, [1]), на параметры извлекаемых пучков ионов существенно влияют кинетические процессы, происходящие в плазме. Соответственно, для дальнейших улучшений производительности и получения ионов более высоких зарядов необходимо знать и учитывать энергетическое распределение электронов в плазме.

До настоящего времени форма функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) для плазмы ЭЦР разряда неизвестна, однако в 2012 году в ИПФ РАН был представлен способ измерения энергетического распределения электронов, покинувших плазму [2]. Он позволяет оценить горячую (от единиц кэВ до единиц МэВ) электронную компоненту.

В настоящей работе исследованы кинетические неустойчивости, возникающие в гелиевой плазме ЭЦР ионного источника с высоким удельным энергокладом. Эксперименты проводились в газодинамическом (столкновительном) режиме удержания в широком диапазоне значимых параметров мощности греющего излучения гиротрона и давления нейтрального газа. Была произведена диагностика излучения в СВЧ диапазоне, по возникновению которого оценивалось развитие кинетических неустойчивостей. Также были измерены энергетические распределения горячих электронов, покинувших плазму. По результатам исследований были найдены оптимальные режимы развития кинетических неустойчивостей в гелиевой плазме ЭЦР разряда. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-12-00262.

Литература

- [1]. I. Izotov, D. Mansfeld et al. Beam current oscillations driven by cyclotron instabilities in a minimum- B electron cyclotron resonance ion source plasma. *Physics of Plasmas* 19, 122501, 2012.
- [2]. S.V. Golubev et al. Experimental electron energy distribution function investigation at initial stage of electron cyclotron resonance discharge. *Review of Scientific Instruments*. — 2012. — Vol. 83, no. 2. — P. 02B504.

СТАЦИОНАРНЫЙ ПОТОК ПЛОТНОЙ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ИОНАМИ КАК ИСТОЧНИК ЭУФ ИЗЛУЧЕНИЯ

Абрамов И.С., Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия, abramov@ipfran.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.153

Литография в экстремальном ультрафиолете (ЭУФ) является передовой технологией производства интегральных схем, обеспечивающей возможность перехода к схемам с проектными нормами менее 7 нм [1]. При экспонировании в данной технологии применяется ЭУФ излучение в узких спектральных диапазонах (13,5 нм $\pm 1\%$, 11,2 нм $\pm 1\%$ и пр.), соответствующих пикам коэффициентов отражения многослойных зеркал. Для его генерации используется линейчатое излучение ионов высокой кратности.

В действующих ЭУФ-литографах необходимое излучение генерируется плазмой многозарядных ионов, создаваемой при испарении капли олова импульсным лазерным излучением [2]. Такие источники генерируют ЭУФ излучение мощностью 250 Вт в полосе 13,5 нм $\pm 1\%$, чего, в целом, достаточно для промышленного производства интегральных схем [3]. Тем не менее, чтобы производительность ЭУФ-литографии не уступала литографам предыдущего поколения, требуется разработка более мощных источников [1, 2]. Также, как показывают исследования в области химии фоторезиста, при экспонировании излучением большей мощности возможно существенное уменьшение шероховатости края экспонируемых линий, что важно для движения к меньшим проектным нормам [4].

В качестве источника мощного ЭУФ излучения в ИПФ РАН было предложено использовать поток замагниченной плазмы электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) разряда, поддерживаемого излучением гиротрона, ведутся соответствующие экспериментальные и теоретические исследования [5–8]. В ЭЦР разряде за счет эффективного энерговклада в электронную компоненту создаются благоприятные условия для генерации многозарядных ионов и возбуждения их линий электронным ударом. Гиротроны обладают большей средней мощностью, чем лазеры, используемые в существующих источниках ЭУФ излучения [9]. При этом излучение современных субтерагерцевых гиротронов способно проникать в довольно плотную плазму (до 10^{16} см⁻³), позволяя рассчитывать на генерацию мощного ЭУФ излучения компактным плазменным образованием (размеры порядка 1 мм), что выгодно с точки зрения фокусировки [3].

В настоящей работе представлена гидродинамическая модель стационарного течения плотной замагниченной плазмы многозарядных ионов с учетом последовательной ионизации электронным ударом, баланса импульса электронов и ионов, переноса тепла от локализованного источника (зоны ЭЦР) за счет нелинейной электронной теплопроводности, потерь энергии на ионизацию и линейчатое излучение ионов. Выполнено моделирование течений плазмы олова и ксенона. Произведен поиск режимов течения, оптимальных с точки зрения генерации целевого ЭУФ излучения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-22-00270).

Литература

- [1]. Fu Nan et al., J. Microelectron. Manuf., 2019, 2, 19020202.
- [2]. Mayer P. et al., Proc. of SPIE, 2021, 11609, 1160918.
- [3]. Bakshi V. (ed.), *EUV Sources for lithography*, Bellingham, WA: SPIE Press, 2006, 1057 p.
- [4]. Luo Yandong, Gupta P., Proc. SPIE, 2018, 10588, 1058800.
- [5]. Голубев С.В. и др., Письма в ЖТФ, 1994, 20, 7-11.
- [6]. Водопьянов А.В. и др., Письма в ЖЭТФ, 2008, 88, 103-106.
- [7]. Chkhalo N.I. et al., J. Micro/Nanolithogr. MEMS, and MOEMS, 2012, 11, 021123.
- [8]. Abramov I.S. et al., Phys. Plasmas, 2017, 24, 073511.
- [9]. Thumm. M., J. Infrared Millim. Terahertz Waves, 2020, 41, 1-140.

ДВУМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СВЧ РАЗРЯДЕ В ЖИДКИХ ТЯЖЕЛЫХ УГЛЕВОДОРОДАХ

Лебедев Ю.А., Татаринов А.В., Эпштейн И.Л., Титов А.Ю.

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН г. Москва, Россия,
e-mail: lebedev@ips.ac.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.154

Неравновесные разряды в различных жидкостях являются объектом интенсивного исследования в последние десятилетия [1,2]. СВЧ разряд является эффективным средством проведения плазмохимических реакций в жидких тяжелых углеводородах, модельным углеводородом для них может служить *n*-гептан (это основной компонент различных топлив). Настоящая работа опирается на результаты экспериментов в СВЧ-разряде в жидком *n*-гептане [3,4] и на данные, полученные при численном нульмерном, одномерном и двумерном моделировании [5-7]. Для твердых частиц использовалась разработанная нами модель, где поверхностный рост твердых частиц осуществлялся в реакциях присоединения ацетилена к активным центрам на твердой поверхности. Получена функция распределения сажевых частиц по размерам [6]. Учет заряжения тяжелых частиц приводит к изменению их функции распределения по размерам. Максимум функции распределения сдвигается из области легких частиц в область частиц среднего размера [7]. Двумерные расчеты [5] позволили определить детали формирования и отрыва плазменного пузыря от поверхности электрода, характерный размер пузыря и скорость его всплывания. В данной работе представлены результаты двумерного моделирования, включающего основные кинетические процессы пиролиза *n*-гептана в плазменном пузыре.

Двумерная модель включала уравнения гидродинамики несжимаемой жидкости и сжимаемого газа, уравнение теплопроводности, уравнение Максвелла для СВЧ поля и уравнения баланса для концентрации электронов и основных компонент разложения *n*-гептана. При моделировании учитывалась диффузия газовых частиц к границам разрядной камеры и приток *n*-гептана в плазменный пузырь за счет испарения.

Расчеты позволили проследить эволюцию газообразных продуктов реакций пиролиза *n*-гептана до 0.1 секунды для двух значений подведенной к разряду мощности. Показано, что с увеличением подводимой мощности растет количество образующегося водорода. Проведен качественный анализ эволюции образования основных компонент газового разряда. Проведено сравнение результатов расчета и эксперимента.

Работа выполнена в рамках государственной программы ИНХС РАН при частичной поддержке гранта РФФИ № 21-52-53012.

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
- [3]. Averin K.A., Lebedev Yu.A., Shchegolikhin A.N., and Yablokov, M.Yu. Plasma Processes and Polymers 2017, 14, Issue 9, DOI 10.1002/ppap.20160022
- [4]. Lebedev Yu.A., Averin K.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L., EPJ Web of Conferences, 2017, V. 149, 02002
- [5]. Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L., Averin K.A. Plasma Chem. Plasma Process. 2016, V. 36, P. 535-552
- [6]. Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L., Plasma Chem. and Plasma Process., 2019, V. 39, P. 787–808
- [7]. Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L., Plasma Sources Sci. Technol. V. **29**, 2020, 065013

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА МЕТОДАМИ ЗОНДА ЛЕНГМЮРА И ОПТИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

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

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

³Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.155

Высокочастотный разряд геликонного типа широко применяется для разработки космического плазменного двигателя, испытания материалов термоядерных установок, в машиностроении, медицине в связи с его большей эффективностью. Отметим техническую простоту данных источников плазмы, для их работы используются ВЧ-генераторы на промышленной частоте (13,56 МГц и 27,12 МГц), работающие на простых антеннах в присутствии слабого магнитного поля (от 0,01 до 0,2 Тл), низкое рабочее давление 0,1 до 50 Па, получаемая плазма имеет электронную температуру порядка 10 эВ и плотность до 10^{20} м^{-3} .

В данной работе с помощью ВЧ-компенсированного зонда Ленгмюра построена функция распределения электронов по энергии (ФРЭЭ), определены плотность электронов, температура электронов в зависимости от давлений [1]. Измерения проводились в диапазоне давлений 10–500 мТорр. На рис. 1 изображена принципиальная схема экспериментального стенда. Энергия мощностью 2 кВт от ВЧ-генератора передается к антенне через систему согласования. Магнитное поле имеет значения от 1 мТл до 72 мТл, которые удовлетворяют условию возбуждения электромагнитных геликонных волн при частоте 27,12 МГц. Рабочий газ: аргон и гелий. Разработана охлаждаемая антенна, которая позволит работать в непрерывном режиме.

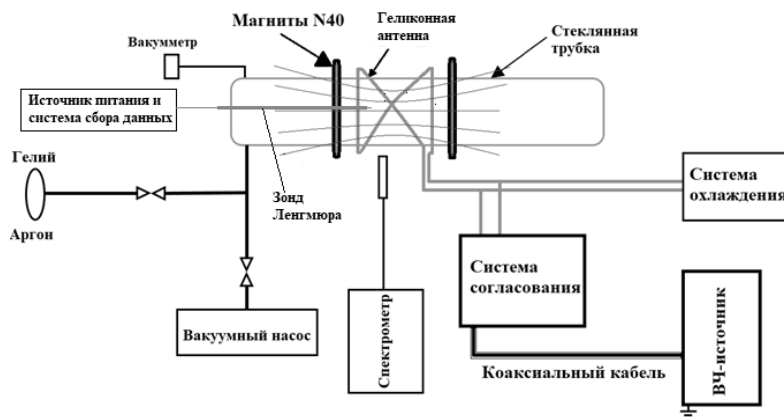


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

Проведены оптические спектроскопические измерения интенсивности спектральных линий атомарного и иона плазмообразующего газа. Оценены плотность и температура электронов с помощью столкновительно-излучательной модели описания состояния плазмы [2].

Спектроскопическое исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ 21-79-10281.

Литература

- [1]. M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing (John Wiley & Sons, New York, 1994).
- [2]. F.F. Chen, "Electric probes," in Plasma Diagnostic Techniques, edited by R. H. Huddlestone and S. L. Leonard (Academic Press, New York, 1965).

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ МОДИФИЦИРОВАНИЕ ХИТОЗАНА И ОЦЕНКА ЕГО ФИТОСТИМУЛИРУЮЩИХ И АНТИМИКРОБНЫХ СВОЙСТВ

¹Титов В.А., ²Наумова И.К., ¹Сироткин Н.А., ¹Хлюстова А.В.

¹Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, г. Иваново, Россия, e-mail: titov25@gmail.com

²Ивановский государственный университет, г. Иваново, Россия, e-mail: irinauma@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.156

Хитозан находит применение при производстве продуктов питания и косметики, а также в биомедицине и в сельском хозяйстве. В ряде случаев его применение сдерживается плохой растворимостью в воде. Повысить растворимость можно плазмохимической обработкой хитозана, которая приводит к укорочению макромолекул и к модификации их структуры. Для этих целей используется как плазма пониженного давления, например, электронно-пучковая, так и плазма атмосферного давления, контактирующая с жидкостью (с обрабатываемым раствором или водной дисперсией хитозана) [1-3].

В докладе рассмотрены результаты обработки уксуснокислых растворов хитозана и его водных дисперсий при трех способах возбуждения разряда. Это разряд постоянного тока в воздухе между металлическим анодом и обрабатываемым раствором (жидким катодом), разряд в парогазовых пузырьках у поверхности погруженного в раствор графитового электрода и импульсный разряд между двумя металлическими электродами, погруженными в жидкость. Схемы установок описаны в [2, 3]. Во всех случаях значительно уменьшается средняя молекулярная масса хитозана: по данным гель-проникающей хроматографии основная фракция имеет молекулярную массу ~1000 Да. Выход водорастворимых продуктов увеличивается со временем обработки и зависит от концентрации растворов: максимальный выход (24,4 мас. %) получен при использовании разряда постоянного тока с раствором-катодом (1%-ным раствором хитозана в 2%-ной уксусной кислоте), меньший выход (<1 мас.%) - при обработке водных дисперсий. Результаты ИК-спектроскопии и ¹H ЯМР спектроскопии показали изменение степени деацетилирования хитозана. После обработки раствора хитозана разрядом между погруженными в него электродами из серебра, меди и цинка получены композиционные пленки с включением наночастиц (Ag, Cu₂O, ZnO), которые подавляют размножение бактерий.

Использование водорастворимого хитозана статистически значимо увеличило лабораторную и грунтовую всхожесть семян гороха, степень их набухания при замачивании, скорость развития корней и росточков при посеве в грунт. Найдено более высокое содержание хлорофилла в вытяжках, полученных из растений, что указывает на интенсификацию процессов фотосинтеза. Использование водных растворов низкомолекулярного хитозана при замачивании семян существенно замедляет развитие бактерий и грибков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-02-00501 А).

Литература

- [1]. Vasilieva T.M., Naumova I.K., Galkina O.V., Udoratina E.V., Kuvshinova L.A., Vasiliev M.N., Maung Htay Khin, Ko Ko Zaw Htet, IEEE Trans. Plasma Sci. **48**. 1035 (2020).
- [2]. Khlyustova A., Sirotkin N., Naumova I., Tarasov A., Titov V., Plasma Chem. Plasma Process. **42**. 587–603 (2022).
- [3]. Наумова И.К., Субботкина И.Н., Титов В.А., Хлюстова А.В., Сироткин Н.А. Прикладная физика. 2021. № 4. С. 40.

ФИТОСТИМУЛИРУЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ ПРОДУКТОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ И СУСПЕНЗИЙ ХИТОЗАНА

¹Наумова И.К., ²Титов В.А., ²Сироткин Н.А., ²Хлюстова А.В.

¹Ивановский государственный университет, г. Иваново, Россия,
e-mail: irinauma@mail.ru

²Институт химии растворов им. Г.А. Крестова Российской академии наук, г. Иваново, Россия, e-mail: titov25@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.157

Одно из актуальных направлений применения низкотемпературной плазмы связано с ее использованием в сельском хозяйстве и при производстве пищевых продуктов [1]. Обработка в плазме пониженного или атмосферного давления способствует более быстрому прорастанию семян, увеличению всхожести и ускоряет развитие растений. К подобным эффектам приводит и использование воды после газоразрядной обработки, что обусловлено накоплением соединений азота, выступающих в качестве удобрений (стимуляторов роста), а также пероксида водорода, который способствует подавлению патогенной микрофлоры [2]. Перспективно и применение плазмы для получения фитостимуляторов из природного сырья, например, хитозана.

В данной работе представлены результаты газоразрядной обработки водной дисперсии хитозана или его растворов в разбавленной уксусной кислоте с целью получения водорастворимых фракций. Использовали два типа разряда: (1) разряд постоянного тока в воздухе между металлическим анодом и жидким катодом - обрабатываемым раствором, (2) разряд в парогазовых пузырьках, образующихся при прохождении тока через ячейку у торца графитового электрода, погруженного в обрабатываемую жидкую среду. Схемы установок, параметры обработки и методики выделения водорастворимых фракций хитозана описаны в [3]. Продукты охарактеризованы методами ¹H ЯМР, ИК-спектроскопии, гель-проникающей хроматографии, рентгеновской дифракции.

Фитостимулирующее действие продуктов испытано на семенах льна, гороха и яровой пшеницы. Данные по всхожести семян, темпам развития проростков и корневой системы, полученные при использовании водорастворимых фракций хитозана и коммерческого фитостимулятора «Эпин-экстра», показали, что водорастворимые продукты обработки хитозана по стимулирующему действию не уступают коммерческому препарату (табл.).

Микробиологические тесты показали также, что применение водорастворимых продуктов деструкции хитозана препятствует развитию грибков и бактерий на поверхности семян.

Всхожесть семян (%) / длина проростков (см)

Фитостимулятор	Лен	Горох	Пшеница
Контроль (вода)	86 / 2	85 / 4	65 / 8
Эпин	90 / 3	87 / 11	91 / 11
0,2% раствор хитозана	93 / 4	88 / 10	89 / 12

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-02-00501 А).

Литература

- [1]. Adamovich I. et al, J. Phys. D: Appl. Phys. **55**. 373001 (2022).
- [2]. Ranieri P. et al, Plasma Process. Polym. **18**. e2000162 (2020).
- [3]. Khlyustova A., Sirotkin N., Naumova I., Tarasov A., Titov V., Plasma Chem. Plasma Process. **42**. 587–603. (2022).

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКЦИОННО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ ОТ СКОРОСТИ ПОТОКА ГАЗА

Желтухин В.С., Шемахин А.Ю., Терентьев Т.Н.

Казанский федеральный университет, Казань, Россия, e-mail: terentiev@yandex.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.158

Исследована зависимость концентрации электронов, ионов, а также электронной температуры и температуры газа в зависимости от скорости потока газа с помощью 2D осесимметричной математической модели высокочастотного индукционно-связанного разряда пониженного давления с продувом нейтрального газа аргона через трубку. Симуляция производилась в пакете Comsol multiphysics [1] с использованием модулей «Plasma», «Magnetic fields», «Laminar flow» и «Heat transfer». Моделирование производилось при давлениях $p=113-190$ Па, мощности $W=1300$ Вт, частотах тока $f=1.76, 13.56$ МГц и диапазоне расхода газа $G=0-9000$ см³/мин.

Сравнение существующей модели [2] с экспериментальным распределением концентрации электронов от расхода газа, полученным в работе Абдуллина и др. [3] показывает, что при больших расходах ($G>6000$ см³/мин) наблюдается расхождение модели с экспериментальными данными [2].

В данной работе предприняты попытки объяснить подобное расхождение, а также внести в модель изменения, позволяющие вести расчеты высокочастотной индукционно-связанной плазмы при больших расходах. Ожидается, что в результате данной работы будут получены распределения параметров разряда от расхода газа, благодаря которым можно будет установить расход газа, при котором достигаются максимальные значения концентрации электронов, ионов, а также электронной температуры и температуры газа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 19-71-10055).

Литература

- [1]. COMSOL AB, “Comsol multiphysics® license no 9602172.”, Stockholm, Sweden., www.comsol.com.
- [2]. Terentev T.N., Shemakhin A.Yu., Samsonova E.S., Zheltukhin V.S., Frequency dependencies of the characteristics of an inductively coupled radiofrequency discharge at reduced pressure, Plasma Sources Science and Technology, 2022, 31, 094005.
- [3]. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф., Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения, Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2000, с. 100.

ОСОБЕННОСТИ СТРУЙНОГО ВЧ-РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ВАКУУМА

Шемахин А.Ю.

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия,
shemakhin@gmail.com.*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.159

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 в динамическом вакууме 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 $10^{15}-10^{19}$ 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 H-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 H-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 ВЧ-разряда в динамическом вакууме 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 А/м².

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

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НА СИЛЬНОТОЧНОМ ЭЛЕКТРОННОМ УСКОРИТЕЛЕ КАЛЬМАР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПЛАЗМЫ В ВАКУУМНОМ ДИОДЕ

^{1,2,3}Казаков Е.Д., ¹Орлов М.Ю., ¹Стрижаков М.Г., ⁴Сунчугашев К.А., ²Воронин А.В.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, Kazakov_ED@nrcki.ru

²НИУ МЭИ, г. Москва, Россия, KazakovYD@mpei.ru

³МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия,

⁴Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия,

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.160

Несмотря на то, что исследование поведения плазмы в вакуумных диодах мощных сильноточных ускорителей ведётся достаточно давно, в последние годы был получен ряд новых результатов, демонстрирующих необходимость более подробного изучения данного вопроса [1]. В частности, на установке Кальмар в ряде режимов наблюдается распространение свечения от центра к периферии со скоростями порядка 100 км/с [2], что может свидетельствовать о развитии неустойчивостей либо возникновении вторичных пробоев, чего ранее не наблюдалось. На установках такого типа проводятся исследования прочностных свойств современных композитных материалов. Поведение плазмы в диодном зазоре может оказывать влияние не только на эрозию приповерхностных слоев, но и на формирование дополнительного давления, а, следовательно, возникновение дополнительной (кроме воздействия электронного пучка) ударноволновой нагрузки.

Для более детального, чем ранее [3] исследования данного процесса была предложена новая оптическая схема, позволяющая осуществлять хронографическую регистрацию разлёта анодной и катодной плазмы в двух направлениях – вдоль и поперёк оси вакуумного диода. Система регистрации, реализованная на основе двух электронно-оптических камер, работающих в хронографическом режиме, позволяет регистрировать собственное свечение плазмы, либо лазерное излучение, прошедшее через вакуумный диод. При использовании цветных фильтров возможно также комбинировать свечение плазмы с теньвым изображением. Данная схема позволяет реализовать и шпирен-метод. Для зондирования применяется импульсный лазер на ортоалюминате иттрия с неодимом ($\lambda_1=1079$ нм), изготовленный в НТЦ УП РАН. Лазер работал в режиме свободной генерации с внутривибраторным преобразованием излучения λ_1 во вторую гармонику ($\lambda_2=540$ нм). Лазер имеет регулируемую длительность импульса с возможностью обеспечить плато около 300 мкс при энергии 90 мДж. Это позволяло считать импульс квазинепрерывным, что значительно упрощало его синхронизацию с плазменными процессами и системой регистрации.

В работе представлены первые результаты применения данной оптической схемы на установке Кальмар. Динамика плазмы в лазерной тени регистрировалась за двумя типами фильтров – интерференционным фильтром на 540 нм и набором зелёных цветных фильтров. В первом случае мы наблюдаем исключительно движение границы плазмы с электронной плотностью порядка 10^{18} см⁻³, во втором наблюдаем также остаточное собственное свечение плазмы. Это позволяет разделить эффекты, связанные с движением плазменного факела с анода с процессом его торможения на остаточном газе.

Литература

- [1]. Ананьев С.С., Багдасаров Г.А., Гасилов В.А. и др. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 7. С. 608-615.
- [2]. Ananyev S.S., Dan'ko S.A., Kazakov E.D., Kalinin Y.G., Kurilo A.A., Strizhakov M.G. // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Т. 747. № 1. С. 012003.
- [3]. Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Крутиков Д.И. и др. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 8. С. 716-727.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАТОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ ФАКЕЛА В ДИОДНОМ ЗАЗОРЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ «КАЛЬМАР»

^{1,2}Смирнова А.Р., ³Бойков Д.С., ^{1,2}Казаков Е.Д., ³Ольховская О.Г., ^{1,2}Ткаченко С.И.

¹МФТИ (НИУ) г., Долгопрудный, Россия, *anya4113@gmail.com*

²НИЦ “Курчатовский институт”, Москва, Россия

³Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.161

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) проведены исследования особенностей распространения ударных волн в прозрачных полимерных материалах и их разрушения при мощном импульсном воздействии релятивистского электронного пучка (РЭП). В экспериментах с помощью ёмкостного делителя напряжения измерялось полное падение напряжения, включая его индуктивную составляющую. Расчёт тока пучка производился по измеренному падению напряжения на низкоиндуктивном шунте с известным сопротивлением. Проводилась регистрация теневых изображений диодного промежутка и мишени методом электронно-оптической хронографии. По полученным хронограммам была оценена скорость распространения катодной плазмы по направлению от катода к аноду, также были сделаны оценки плотности электронов в плазме, при которой интенсивность зондирующего лазерного излучения в плоскости его регистрации уменьшается настолько, чтобы можно было детектировать появление тени [1]. При обработке экспериментальных данных проводилась оценка унесённой массы материала с анода.

Исследовать пространственно-временное распределение параметров плазмы в диодном промежутке, которая формируется при взаимодействии двух потоков: разлетающейся с катода при взрывной эмиссии и с поверхности образца при воздействии на него сильноточного РЭП, в эксперименте затруднительно. Восполнить недостаток этих данных можно с помощью численного моделирования, в котором будут учтены данные конкретного эксперимента по мощности и длительности РЭП, по распределению энергии электронов в пучке, а также свойства исследуемых материалов.

Моделирование воздействия РЭП на исследуемый образец проводилось с помощью разработанного в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН кода MARPLE [2]. Вычисления производились в приближении однотемпературной 3-х мерной гидродинамической модели с учетом теплопроводности и объемных потерь энергии на тормозное излучение. Энерговклад электронного пучка учитывался в форме источника в уравнении баланса энергии. Расчеты выполнены с использованием широкодиапазонных уравнений состояния вещества. Результаты расчётов унесённой массы материала анода, сравнивались с результатами, полученными в экспериментах. Данная модель была дополнена моделированием потока катодной плазмы. При моделировании потока катодной плазмы использовались оценки плотности и скорости, полученные на основании экспериментальных данных.

В результате данной работы, используя экспериментальные данные, были произведены расчёты и проанализированы результаты моделирования по взаимодействию потоков плазмы с анода и катода в диодном промежутке генератора сильноточных пучков релятивистских электронов «Кальмар».

Литература

- [1]. Казаков Е.Д. и др. Методы лазерной теневой фотографии с электронно-оптической регистрацией в хронографическом режиме для исследования динамики плазмы в диоде генератора РЭП // Физика плазмы, 2021, том 47, № 8, с. 716–727.
- [2]. Гасилов В.А. и др. Пакет прикладных программ высокопроизводительных магнитоускоренной плазмы // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011 No 20 36 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА ПОГЛОЩЕНИЕ АЛЬФВЕНОВСКОЙ ВОЛНЫ ДИССИПАТИВНОЙ ПЛАЗМОЙ С УЧЁТОМ ТОРМОЗНОГО И ФОТОРЕКОМБИНАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ

Таюрский А.А.

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия, tayurskiy2001@mail.ru.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.162

В работе исследована математическая модель затухания альфвеновской волны в диссипативной плазме, обусловленная диссипативными эффектами (магнитной вязкостью, гидродинамическими вязкостями и теплопроводностями электронов и ионов, релаксацией температур электронов и ионов) и тормозным и фоторекомбинационным излучениями, на основе уравнений двухжидкостной электромагнитной гидродинамики с полным учётом инерции электронов.

Исследование направлено на изучение возможного механизма аномального нагрева солнечной короны альфвеновскими волнами, возникающими в фотосфере Солнца [1]. Ранее [2] при исследовании однородной плазмы было показано, что альфвеновская волна проникает в диссипативную плазму на конечную глубину, а её параметры с течением времени стабилизируются, выходя на квазистационарный режим.

В настоящей работе исследовано влияние на поглощение альфвеновской волны пространственной неоднородности по плотности. Предполагаем, что диссипативная плазма заполняет полупространство, на левую границу которого набегают альфвеновская волна. Дальнейшее распространение волны сопряжено с её затуханием, которое и является предметом изучения. Исследованы основные типы неоднородности: вершина и впадина. Чередую неоднородности типа вершины и впадины, можно получить любую пространственную неоднородность плазмы по плотности. Получены зависимости от величины вершины глубины проникания альфвеновской волны в неоднородную плазму и максимальных температур электронов и ионов. Исследование показало, что увеличение амплитуды падающей волны приводит к увеличению значений максимальных температур электронов и ионов, а также увеличению глубины проникания альфвеновской волны в неоднородную диссипативную плазму.

Литература

- [1]. Scott W. McIntosh, Bart Pe Pontien, Marts Carlsson, Viggo Hansteen, Paul Boerner & Marsel Goossens. Alfvenic waves with sufficient energy to power the quiet solar corona and fast solar wind // *Nature*, 2011, v.475, p.478-480.
- [2]. Gavrikov M.B., Taiurskii A.A. Nonlinear absorption of Alfvén waves: model taking into account photorecombination radiation // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, **1647**, 012013.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ УСКОРЕННЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ В ХВОСТОВОЙ ОБЛАСТИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И В ЛАБОРАТОРНЫХ ТОКОВЫХ СЛОЯХ

Франк А.Г.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия,
annfrank@fpl.gpi.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.163

Высокоскоростные потоки плазмы регулярно регистрируются и исследуются в магнитосфере Земли с помощью искусственных спутников. Наблюдения с помощью многоспутниковых миссий (Cluster, THEMIS, MMS) обеспечили значительный прогресс в этих исследованиях.

Потоки плазмы, которые распространяются из области магнитного пересоединения в хвосте магнитосферы по направлению к Земле, представляют собой отдельные сравнительно короткие струи (Bursty Bulk Flows – BBFs) длительностью, как правило, менее $10 \div 5$ сек [1,2]. Какие факторы могут определять столь краткое время существования BBFs? Эти вопросы обсуждаются в работах, анализирующих данные спутниковых наблюдений.

Эксперименты, которые проводятся в лабораторных условиях с помощью установки TC-3D (ИОФ РАН), также демонстрируют, что потоки плазмы, ускоренные в токовых слоях, ограничены как во времени, так и по длине. Эти потоки двигаются вдоль ширины токового слоя, из его центральной области слоя по направлению к обоим боковым краям. Следует отметить, что собственно процесс ускорения во времени не ограничен, однако в определённый момент происходит резкое уменьшение скорости плазменных потоков.

Сопоставление изменений структуры магнитных полей, токов и электродинамических сил в токовых слоях, с одной стороны, и динамики потоков плазмы, с другой стороны, позволило установить, что существенную роль в ограничении длительности потоков играет возбуждение токов обратного направления у боковых концов токового слоя. Токи обратного направления приводят к появлению дополнительных электродинамических сил, которые должны тормозить потоки плазмы, ранее ускоренные в пределах токового слоя [3-5].

В свою очередь, именно движение быстрых плазменных потоков в поперечном магнитном поле вызывает появление индукционных электрических полей и соответствующих токов, которые направлены в противоположную сторону по отношению к основному току в большей части слоя. Другими словами, токи обратного направления, возникающие в токовых слоях в результате движения ускоренных потоков плазмы, затем могут приводить к торможению, либо даже к прекращению движения этих же потоков.

В общем случае эффект торможения плазменных потоков, который обусловлен генерацией токов обратного направления, должен проявляться при внедрении быстрых потоков плазмы в области с сильным поперечным магнитным полем, в том числе в ситуациях, когда потоки плазмы, ускоренные в хвостовой области магнитосферы, устремляются по направлению к Земле.

Литература

- [1]. Baumjohann W., Paschmann G., Luehr H. // J. Geophys. Res. 1990. V. 95. P. 3801.
- [2]. Angelopoulos V. et. al. // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 4027.
- [3]. Франк А.Г., Сатунин С.Н. // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 112. С. 667.
- [4]. Frank A.; Kyrie N.; Satunin S.; Savinov S. // Universe 2021, V. 7, No 11, P. 400(1-13).
- [5]. Франк А.Г., Сатунин С.Н. // Физика плазмы 2022. Т. 48 (1). С. 12-17.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК ИТЕР ВОЛЬФРАМА ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ БЕТА

^{1,2}Попов В.А., ^{1,2}Касатов А.А.

¹ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²НГУ, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.164

На существующих установках невозможно воспроизведение всех факторов воздействия потоков плазмы, излучения и нейтронов. Импульсные тепловые нагрузки являются одним из главных разрушающих стенку факторов на будущих термоядерных реакторах согласно современным представлениям, поэтому в ИЯФ был разработан стенд ВЕТА для воспроизведения тепловых потоков на стенку. Имеется возможность импульсно нагревать образец с помощью электронного пучка и лазерного излучения, проводя in-situ диагностику разрушений образца. Было обнаружено, что при нагреве до высоких температур наблюдалось вращение расплава, которое не удавалось объяснить. В том числе ток пучка в ведущем магнитном поле создавал силу Лоренца, не способную разогнать расплав до наблюдаемых скоростей. Ранее [1] было показано, что на ВЕТА удаётся достигнуть режима охлаждения испарением, когда несмотря на продолжающийся нагрев температура поверхности больше не растёт, поскольку унос тепла с поверхности испаряющимися атомами становится соизмерим с поступающим потоком энергии. Было показано, что в этом режиме скорость испарения прекращает расти и это увеличивает время развития парового экранирования.

В представленной работе анализируется, что может происходить в модели режима охлаждения испарением с пристеночным испаряющимся газом. Показывается, что даже без учёта дополнительного нагрева и ионизации газа электронным пучком насыщенные пары являются плазмой. Показывается, что плазму в режиме охлаждения испарением на установке ВЕТА можно считать столкновительной, не замагниченной, не вырожденной, слабонеидеальной. Показывается, что создаются условия для формирования замкнутых токов, текущих вокруг неоднородности нагрева через пристеночную плазму и проводящий плотный вольфрам. Полный ток, получаемый интегрированием неоднородной плотности тока, в модели оказывается много больше тока пучка, которым создавалась неоднородность нагрева. Уточнение модели может привести к тому, что наблюдаемое вращение сможет быть объяснено замкнутым током на неоднородности нагрева до высоких температур, проникающим сквозь паровой слой потоком мощности.

Изучаемый эффект не предполагает особенностей нагрева именно электронным пучком и может быть воспроизведен лазерным излучением или потоком высокоэнергичных проникающих частиц. Для представленных результатов использовался расчёт с плотностью мощности нагрева 10 ГВт/м^2 , что соответствует нагрузке в неослабленных ЭЛМах, и для развития охлаждения испарением было необходимо испарить порядка 10 г/м^2 . Согласно современным представлениям [2] в режиме тушения плазмы на ИТЕР ожидаются потоки теплового излучения из плазмы на поверхность, достаточные для того, чтобы привести к оплавлению и нагреву до обсуждаемого режима.

Литература

- [1]. V.A. Popov et. al., AIP Conf. Proc. 1771, 060009 (2016), <https://doi.org/10.1063/1.4964217>.
- [2]. M. Moscheni et. al., Nucl. Mater. Energy 25, 100824 (2020), [doi:10.1016/j.nme.2020.100824](https://doi.org/10.1016/j.nme.2020.100824)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ВАКУУМА

Лазарев Е.Н., Желтухин В.С., Чебакова В.Ю.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, evgenln11401@gmail.com;
vzheltukhin@gmail.com, vchebakova@mail.ru.

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.165

ВЧЕ-разряд с продувом газа в диапазоне давлений 13.3-133 Па (динамический вакуум) эффективно используется для обработки различных материалов с целью повышения функциональных и эксплуатационных свойств изделий [1]. Для оптимизации режимов обработки необходимо понимание процессов, протекающих в разряде. С этой разработана математическая модель высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда. Модель разработана для следующих условий горения разряда: частота поля 13.56 МГц, мощность разряда от 0.5 до 5 кВт, расход газа до 0.2 г/с [1].

Модель представляет собой решение нелинейной системы уравнений, включающей начально-краевые задачи для уравнений баланса концентрации электронов, ионов, нейтральных и метастабильных атомов, сохранения энергии электронного газа, краевые задачи для уравнения сохранения энергии несущего газа и уравнения Пуассона для потенциала электрического поля.

Уравнения баланса электронного и ионного газов, метастабильных атомов и атомов в нейтральном состоянии учитывают процессы прямой ионизации, рекомбинации, ступенчатой и пеннинговой ионизации, процессы возбуждения и тушения метастабильных состояний. Граничные условия для уравнений баланса электронного и ионного газов, а также метастабильных атомов формулируются в общепринятом виде [2, 3]. Граничные условия для уравнения баланса нейтральных атомов формулируются, исходя из уравнения идеального газа. Граничные условия для потенциала учитывают синусоидальное изменение напряжения на нагруженном электроде.

Для численной реализации модели использовалась неявная конечно-разностная схема с равномерным разбиением сетки. Для вычисления диффузионно-дрейфового потока заряженных частиц использовался алгоритм Шарфеттера-Гуммеля [4, 5].

Результаты численного моделирования показали, что учет нагрева газа существенно влияет на распределение и долю заряженных и возбужденных частиц в разрядном промежутке.

Исследование выполнено при финансовой поддержке 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 ун-та, 2000.
- [2]. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. М.: Издательство МФТИ, 1995.
- [3]. Чебакова В.Ю. // Уч. записки Казан. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. 2015. Т. 157, кн. 2. С. 126–140.
- [4]. Scharfetter D.L., Gummel H.K. // IEEE Trans. Electron Devices, 1969, **16** (1) 64–77.
- [5]. Желтухин В.С., Фадеева М.С., Чебакова В.Ю. // Уч. записки Казан. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. 2017. Т. 59, кн. 4. С. 444–457.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ НА БАЛАНС ТЕМПЕРАТУРЫ ТЯЖЕЛЫХ ЧАСТИЦ В КАТОДНОЙ ОБЛАСТИ ПЛАЗМЕННОГО ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Горбунов Н.А.

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия, gorbunovna@gumrf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.166

В работе продолжена разработка модели прямого фотоэлектрического преобразования сфокусированного солнечного излучения в плазме [1]. Рассмотрен баланс температуры тяжелых частиц в плазме паров натрия в диапазоне давлений $10^4 - 10^5$ Па. Модель учитывает обмен энергии между тяжелой компонентой и электронами, немонотонную зависимость от температуры коэффициента теплопроводности паров натрия, обусловленную переносом энергии диссоциации молекул натрия, выделение энергии при плазмохимических реакциях с участием возбужденных атомов натрия и молекулярных ионов натрия.

В работе показано, что перенос излучения из центральных областей плазмы обеспечивает высокую относительную заселенность возбужденных атомов натрия в пристеночных областях. Основным механизмом образования заряженных частиц становится ассоциативная ионизация с участием возбужденных атомов натрия $\text{Na}(3P)$. В образующейся химически неравновесной плазме концентрации возбужденных атомов натрия $\text{Na}(3P)$ и электронов в слое существенно превосходят равновесные величины для заданного значения температуры электронов. В результате радиационный поток энергии эффективно преобразуется в энергию ионизации.

В работе показано, что ассоциативная ионизация, приводящая к образованию молекулярных ионов натрия на нижних колебательных уровнях, с их последующей диссоциацией за счет столкновений с нейтральными атомами натрия приводит к существенному охлаждению тяжелых частиц. Указанные плазмохимические реакции могут приводить к формированию внутреннего пограничного слоя. Ранее подобные решения анализировались применительно к системе диффузионных уравнений с учетом химических реакций [2]. Выявлена важная роль в формировании внутреннего слоя температуры стенки катода, которая не должна превосходить определенной критической величины. В этом случае градиент температуры тяжелых частиц у стенки мал и принимает свое максимальное значение на некотором расстоянии в глубине плазмы. Низкая газовая температура приводит к формированию оптически толстого слоя с относительно высоким содержанием молекул и молекулярных ионов натрия. Наличие молекулярной компоненты обеспечивает эффективное поглощение широкополосного излучения, поступающего из центральных областей плазмы. Образующийся слой играет роль теплоизолирующей оболочки, отделяя плазму с высокой температурой от холодной стенки катода. Это обеспечивает малую величину теплового потока, уносимого на стенку нейтральной компонентой, по сравнению с затратами на генерацию заряженных частиц в плазме. Формирующиеся в плазме условия благоприятны для эффективного прямого фотоэлектрического преобразования солнечного излучения.

Литература

- [1]. Gorbunov N.A., Flamant G. Plasma Chem. Plasma Process. 2015, V. 35, p. 799-817.
- [2]. Васильева А.Б., Бутузов В.Ф. Асимптотические методы в теории сингулярных возмущений, М.: Высшая школа, 1990, 209 с.

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ПУЧКОВО - ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА В УСТАНОВКЕ ГДЛ

^{1,2}Глинский В.В., ^{1,2}Тимофеев И.В., ^{1,2}Волчок Е.П., ^{1,2}Анненков В.В.

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

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.167

Необходимым этапом в любом эксперименте по нагреву и удержанию плазмы в открытых магнитных ловушках является создание начальной плазмы достаточного объема и плотности для эффективного захвата инжектируемых пучков нейтральных атомов. На наш взгляд, самым простым и дешёвым среди различных методов генерации плазмы является метод ионизации электронным пучком. Он, в отличие от метода плазменного разряда, в котором плазма инжектируется в установку из плазменной пушки, позволяет создавать плазму непосредственно в рабочем объеме, избегая ее отражения от входной пробки. Кроме того, в отличие от СВЧ разряда, ионизация электронным пучком не требует высокотехнологичных устройств, таких как гиротроны.

Возможность зажигания плазменного разряда электронным пучком в открытых ловушках известна уже более 60 лет, однако отличительной особенностью первых экспериментов были весьма компактные размеры установок, сопоставимые с длиной релаксации пучка. Чтобы понять, насколько эффективно данный метод создания плазмы может работать в современных термоядерных установках, таких как Газодинамическая ловушка (ГДЛ) или ГДМЛ 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). При этом как сами эксперименты, так и их численное моделирование методом частиц в ячейках давали указание на то, что область релаксации пучка сильно локализована во входной магнитной пробке [2]. В качестве возможного механизма ионизации плазмы в основном объёме ловушки в работе [2] обсуждалась ударная ионизация тепловыми электронами, которые получают достаточную энергию из относительно горячей области релаксации пучка за счёт продольной электронной теплопроводности.

В данной работе на основе численной модели, в которой рассчитывается распространение тепла за счёт классической электронной теплопроводности в неоднородном магнитном поле и наработка плазмы тепловыми электронами за счёт ударной ионизации, исследуется динамика зажигания разряда во всём объёме установки ГДЛ и проводится сравнение результатов моделирования с данными интерферометрических и зондовых измерений, полученных в упомянутых экспериментах [1].

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22 – 22 - 00514)

Литература

- [1]. Soldatkina E.I. et al. Electron beam-plasma discharge in GDT mirror trap: experiments on plasma start-up with electron gun //Nuclear Fusion. – 2022. – Т. 62. – №. 6. – С. 066034.
- [2]. Timofeev I.V. et al. Electron beam-plasma discharge in GDT mirror trap: particle-in-cell simulations //Nuclear Fusion. – 2022. – Т. 62. – №. 6. – С. 066033.

ОСОБЕННОСТИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР В ПОЛЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

¹Хирьянова А.И., ¹Паркевич Е.В., ^{1,2}Смазнова Х.Т., ^{1,2}Климович С.М.,
^{1,3}Толбухин Д.В.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
khirianova.alexandra@gmail.com,

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

³Псковский государственный университет, г. Псков, Россия.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.168

В работе подробно исследованы дифракционные эффекты, сопровождающие прохождение лазерного излучения через неоднородные плазменные микроstructures. Смоделированы дифракционные картины плазменных объектов в их выходной плоскости и в ближней волновой зоне. Данные получены путем решения скалярного волнового уравнения Гельмгольца в первом Рытовском приближении с учетом дифракционного расплывания дифрагированного лазерного пучка в свободном пространстве. Обнаружено, что даже в самых простых приближениях процесса взаимодействия лазерного излучения с плазмой прохождение лазерного пучка сквозь неоднородную плазму сопровождается сложными дифракционными эффектами. Данные эффекты усиливаются в ближней волновой зоне объекта и существенно искажают регистрируемые картины плазменных образований, в том числе способствуя визуализации различных оптических артефактов на изображениях. Путем численного моделирования удалось точнее охарактеризовать специфику визуализации реальных плазменных образований в поле когерентного лазерного пучка, регистрируемого оптической системой. Результаты работы могут найти широкое применение при обработке лазерных изображений микроstructures плазмы, зарегистрированных при наличии сильных дифракционных эффектов.

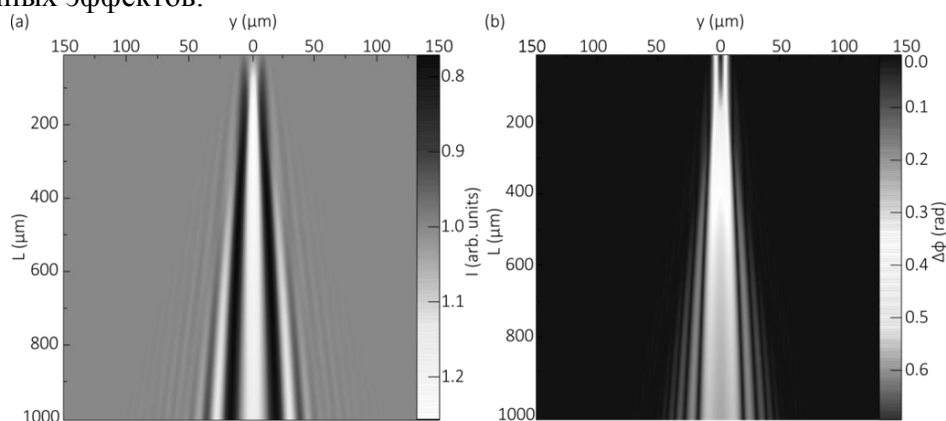


Рис. 1. Двумерные карты интенсивности (а) и сдвига фазы (б) дифрагированной волны позади 20 мкм плазменного филамента. Параметр L (мкм) соответствует расстоянию от выходной плоскости объекта ($x=D$).

Работа проведена при поддержке гранта Российского научного фонда №22-29-00799.

Литература

- [1]. Parkevich E.V., Khirianova A.I. Simulation of Laser Diffraction by Micron-Sized Plasma Filaments. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 49(10), 10-16 (2022), doi: 10.3103/S1068335622100025; <https://doi.org/10.3103/S1068335622100025>.

ПОРОГОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ГЕНЕРАЦИИ СИЛЬНОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНОГО НАНОСЕКУНДНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ

¹Паркевич Е.В., ¹Хирьянова А.И., ^{1,2}Смазнова Х.Т., ^{1,2}Климович С.М.,
^{1,3}Толбухин Д.В.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
parkevich@phystech.edu

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

³Псковский государственный университет, г. Псков, Россия.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.169

В работе изучено влияние предельного тока через разрядный промежуток на динамику формирования сильноионизованной приэлектродной плазмы во время развития импульсного наносекундного разряда в воздухе. Эксперименты проведены на высоковольтном стенде при варьировании тока через разрядный промежуток от нескольких десятков до нескольких сотен ампер. Динамика и параметры плазмы разряда исследовались с использованием техник лазерного зондирования. В результате было установлено, что ограничение тока через промежуток до нескольких десятков ампер приводит к резкому падению скорости развития плазмы с катода, а также к уменьшению величины её электронной плотности (Рис. 1). Ранняя стадия развития плазмы, связанная с формированием микронного катодного пятна, оказывается идентичной при токах амплитудой от ~ 10 до ~ 100 А. Обнаружено, что при токах в несколько десятков ампер не наблюдается развитие микроструктуры у искрового канала, растущего с катода.

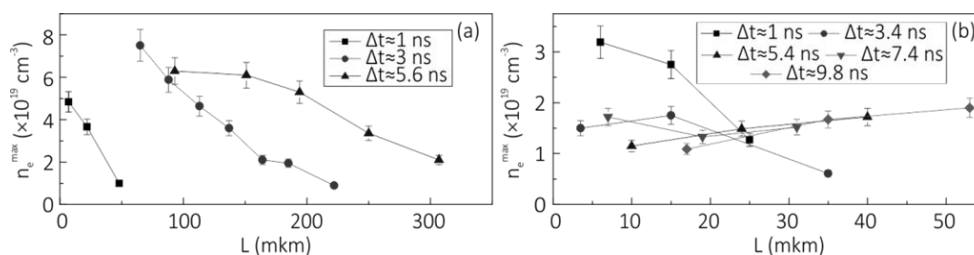


Рис. 1. Распределение электронной плотности плазмы вдоль плазменного канала с катода: (a) – при токе разряда $I_{\max} \sim 300$ А, (b) – при токе разряда $I_{\max} \sim 40$ А. Параметр L (мкм) соответствует расстоянию от поверхности катода до точки определения электронной плотности плазмы в центре симметрии растущего искрового канала.

Работа проведена при поддержке гранта Российского научного фонда №22-29-00799.

Литература

- [1]. Parkevich E.V., Khirianova A.I. On the Possible Threshold Character of the Spark Microstructure Formation. Bulletin of the Lebedev Physics Institute, 49(9), 302-306 (2022), doi: 10.3103/S1068335622090068; <https://doi.org/10.3103/S1068335622090068>.

ЭМИССИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ ВО ВРЕМЯ ИНТЕНСИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ СТРИМЕРОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ РАЗРЯДЕ

¹Паркевич Е.В., ¹Хирьянова А.И., ¹Хирьянов Т.Ф., ¹Байдин И.С., ¹Шпаков К.В.,
¹Родионов А.А., ¹Болотов Я.К., ¹Рябов В.А., ²Куриленков Ю.К., ¹Огинов А.В.

¹Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
parkevich@phystech.edu,

²Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.170

В работе получены исчерпывающие данные о спектральных и временных характеристиках низкочастотных (НЧ) (10–150 МГц) и высокочастотных (ВЧ) (1–4 ГГц) радиоизлучений, регистрируемых во время развития протяженного высоковольтного разряда в 50 см воздушных промежутках при напряжениях порядка 1 МВ. Исследована взаимосвязь генерации радиоизлучений с формированием стримеров в разряде. Показано, что распространение стримеров от катода до анода сопровождается только эмиссией НЧ-радиоизлучения, тогда как ВЧ-радиоизлучение возникает при движении встречных стримеров с анода. При этом мощность НЧ-радиоизлучения резко возрастает почти синхронно с появлением эмиссии ВЧ-радиоизлучения. Установлено, что ВЧ-радиоизлучение имеет сложную спектрально-временную структуру и представляет собой множество коротких (менее 1 нс) всплесков мощности ВЧ-радиосигнала, характеризующихся различными частотными составляющими в субнаносекундных интервалах времени. Впервые методом высокочастотной радиоинтерферометрии локализованы области «источников» радиоизлучений с сантиметровой точностью. Обнаружена тесная связь между генерацией ВЧ-радиоизлучений и интенсивным развитием многочисленных стримеров противоположной полярности.

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>

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ АТОМОВ ГЕЛИЯ В ПЛАЗМЕ ТОКОВЫХ СЛОЕВ МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ

Кирий Н.П., Харлачев Д.Е.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, Россия, kyrie@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.171

Исследована динамика атомов гелия в плазме токовых слоев, сформированных в 2D и 3D магнитных конфигурациях. Исследования выполнены методами спектроскопии. С помощью доплеровского уширения спектральной линии He I 587.6 нм определены температура и энергия направленного движения атомов гелия в разные моменты времени.

Токовые слои создавались в сильно неоднородном магнитном поле с особой линией X типа при разряде в гелии с помощью экспериментальной установки ТС-3D. Градиент магнитного поля в данных экспериментах составлял $h = 0.5$ кГс/см, начальное давление гелия $p = 320$ мТорр, максимальная величина электрического тока $J_z = 45$ кА. Для создания 3D магнитной конфигурации вдоль X-линии прикладывалось однородное магнитное поле с индукцией $B_z = 2.9$ кГс, в 2D магнитных конфигурациях $B_z = 0$ [1].

С помощью двухканальной оптической схемы излучение плазмы собиралось из центральной квазицилиндрической области, вытянутой вдоль направления тока в слое (ось z), а также вдоль ширины (наибольшего из поперечных размеров) слоя (ось x), что позволило определить температуру атомов гелия в центральной области токового слоя и энергию направленного движения атомов гелия, усредненную вдоль ширины слоя. Профили линии He I 587.6 нм регистрировались в одном импульсе работы экспериментальной установки с помощью программируемой цифровой камеры Nanogate 1UF, которая состоит из электронно-оптического преобразователя, усилителя яркости на основе микроканальной пластины и детектора излучения - CCD матрицы. Длительность строб-импульса камеры составляла 0.8 мкс при том, что время жизни токового слоя ~ 6 мкс [2-5].

Обнаружено, что при формировании токового слоя в 2D магнитной конфигурации в отдельные моменты времени уширения линии He I 587.6 нм, измеренные вдоль оси x , в ~ 7 раз превышали уширения линии, измеренные в z -направлении. Анализ экспериментальных данных показал, что это различие обусловлено появлением в токовом слое быстрых сверхтепловых потоков атомов гелия, направленных из центра слоя к его боковым краям (вдоль оси x). Энергия направленного движения атомов гелия в процессе эволюции токового слоя быстро возрастает, достигая величины $W_x = 480 \pm 120$ эВ, что в ~ 20 раз превышает температуру атомов гелия $T_a = 20 \pm 2$ эВ в те же моменты времени.

Появление быстрых атомов гелия в плазме токового слоя коррелирует с генерацией ускоренных потоков ионов гелия [2-5] и связано, по всей видимости, с резонансной перезарядкой ионов гелия на атомах гелия [6].

При формировании токового слоя в 3D магнитной конфигурации направленное движение быстрых атомов гелия не наблюдалось, как не наблюдалось ранее [2-5] ускорение ионов гелия в 3D магнитной конфигурации.

Литература

- [1]. Франк А.Г., Гавриленко В.П., Кирий Н.П., Островская Г.В. // ЭНТП. М.: Янус. 2008. Серия Б. Т. III-2. С. 335.
- [2]. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. С. 17.
- [3]. Кирий Н.П., Франк А.Г. // Физика плазмы. 2012. V. 38, P. 1042.
- [4]. Frank A.G., Kyrie N.P. // Plasma Physics Reports. 2017. V. 43 (6). P. 696.
- [5]. Frank A.G., Kyrie N.P., Satunin S.N., Savinov S.A. // Universe. 2021, 7. 400.
- [6]. Майоров С.А. // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2007. Т. 34 (2). С. 26.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДА ПРИ БОЛЬШИХ ЗНАЧЕНИЯХ ПОТЕНЦИАЛА В ЛАБОРАТОРНОЙ ПЛАЗМЕ

Иванов В.А., Коныжев М.Е., Камолова Т.И., Дорофеюк А.А.

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.172

Известно, что величина электрического поля на поверхности электрода в плазме играет существенную роль в развитии различных типов разрядов. Обычно предполагают, что в плазме при исследовании образования слоя с разделением электронов и ионов вблизи электрода, находящегося под отрицательным потенциалом Ψ_0 и погруженного в плазму с объемной плотностью заряженных частиц n и электронной температурой T_e , выполняется условие малых значений потенциала $e\Psi_0/T_e \ll 1$, где e – заряд электрона. Для плоского случая при $e\Psi_0/T_e \ll 1$ решение уравнения Пуассона $\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} = -4\pi en \left[1 - \exp\left(-\frac{e\Psi(x)}{T_e}\right) \right]$ определяет

величину электрического поля E_0 на поверхности электрода $E_0 = \frac{\Psi_0}{r_D}$, где $r_D = \sqrt{\frac{4\pi ne^2}{T_e}}$ – классический радиус Дебая. При этом получается известная формула для дебаевского экранирования поля в плазме $E(x) = \frac{\Psi_0}{r_D} \exp\left(-\frac{x}{r_D}\right)$. При больших значениях электрического потенциала электрода в плазме $e\Psi_0/T_e \gg 1$ ситуация кардинально меняется. Уравнение Пуассона будет иметь вид $\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} = -4\pi en \sqrt{\frac{T_e}{2e\Psi(x)}}$, из которого следует решение для

величины электрического поля на поверхности электрода в виде:

$$E(\Psi_0) = \frac{\Psi_0}{L}, \text{ где } L = r_D \left(\frac{e\Psi_0}{2T_e}\right)^{\frac{3}{4}} \quad [1].$$

Параметр L можно назвать модифицированным радиусом Дебая, который равен произведению классического радиуса Дебая r_D на большую величину $\left(\frac{e\Psi_0}{2T_e}\right)^{\frac{3}{4}}$. В условиях, когда $e\Psi_0/T_e \gg 1$, модифицированный радиус Дебая L в некоторых случаях может быть на 2 порядка больше классического радиуса Дебая r_D . Расчеты показывают, что для лабораторной плазмы с электронной температурой $T_e = 10$ эВ и плотностью $n = (10^{10} - 10^{13}) \text{ см}^{-3}$ величина модифицированного радиуса Дебая может в 30–180 раз превышать классический радиус Дебая, и, соответственно, величина электрического поля на поверхности отрицательного электрода будет в 30–180 раз меньше поля, рассчитанного по классической формуле. Так, для плазмы с плотностью 10^{13} см^{-3} и температурой $T_e = 10$ эВ, при потенциале электрода 1000 В, классические формулы дают значения радиуса Дебая $r_D \approx 7,5$ мкм и завышенную величину напряженности электрического поля $E \approx 1,35$ МВ/см. При этом значение модифицированного радиуса Дебая составляет $L \approx 235$ мкм, а величина электрического поля на поверхности электрода снижается до значения $E \approx 75$ кВ/см.

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

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ВТСП ПРОВОДНИКИ И МАГНИТЫ ДЛЯ УТС – ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ В РОССИИ И В МИРЕ

Высоцкий В.С.

ОАО «ВНИИКП». Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.278

В настоящее время в России и в мире активно рассматриваются и разрабатываются проекты новых устройств термоядерного синтеза (УТС) с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в электромагнитных системах (ЭМС). Использование ВТСП позволяет получать магнитные поля в обмотках ЭМС порядка 20 Тл и выше, что позволяет снижать габариты устройств УТС на основе токамаков и повышать эффективность устройства. Однако для создания ЭМС требуются специальные комбинированные проводники с рабочими токами порядка десятков килоампер и плотностью тока до сотен А/мм² изготовленные на основе стандартных ВТСП лент, выпускаемых промышленностью.

В докладе представлены возможные проекты УТС с ВТСП ЭМС в мире и России. Обсуждаются варианты возможных проводников на основе ВТСП лент и подходы к изготовлению обмоток ЭМС на их основе. Обсуждается подход к изготовлению тороидальной обмотки компанией Commonwealth Fusion Science и результаты ее испытаний, когда впервые в мире в обмотке такого размера было получено магнитное поле в 20 Тл при температуре 20 К. Показаны последние результаты разработок и испытаний проводника для геликоидального термоядерного реактора FFHR в Японии. Представлены российские подходы к разработке проводников для ЭМС устройств УТС. Сформулированы основные проблемы и необходимые направления исследований и разработок при создании ВТСП ЭМС для устройств УТС.

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ»**

**SECTION
«PHYSICAL BASIS FOR PLASMA AND BEAM
TECHNOLOGIES»**

ДИНАМИКА СВЕЧЕНИЯ НАНОСЕКУНДНЫХ РАЗРЯДОВ В СВЕРХЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ВОЗДУХА С УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Мурсенкова И.В., Зиганшин А.Ф., Ляо Ю., Иванова А.А.

МГУ им. Ломоносова, физический факультет; Москва, Россия, murs_i@physics.msu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.174

Разряды в высокоскоростных потоках газа активно исследуются на протяжении последних десятилетий в рамках задач плазменной аэродинамики [1, 2]. Актуальность современных исследований связана с необходимостью определения конкретного механизма воздействия плазмы разрядов на высокоскоростные потоки. В работе экспериментально изучена динамика свечения наносекундных поверхностного скользящего [3] и комбинированного объемного [2] разрядов в структурированных сверхзвуковых потоках воздуха с числами Маха 1.16-1.70. Разряды длительностью ~ 500 нс инициировались в разрядной камере ударной трубы [2, 3]. Свечение разрядов анализировалось на основе регистрации с наносекундным разрешением электронно-оптической камерой K011 БИФО [2, 3]. Одновременно регистрировались ток и эмиссионный спектр разряда.

Экспериментально показано, что в неоднородных потоках газа с ударными волнами на динамику излучения разрядов оказывает влияние характер распределения плотности в разрядной области. На рисунке 1 показано девятикадровое изображение свечения поверхностного скользящего разряда в потоке с наклонной ударной волной, которое показывает немонотонное изменение интенсивности излучения разряда общей длительностью больше 4 мкс. Вследствие пространственной неоднородности энерговклада формируются ударно-волновые конфигурации, взаимодействующие с газоразрядной плазмой, и оказывающие воздействие на течение в канале продолжительностью свыше 100 мкс [2, 3].

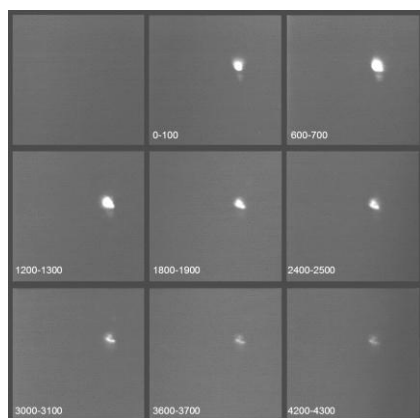


Рис. 1. Девятикадровое изображение поверхностного скользящего разряда в потоке с наклонной ударной волной. Число Маха потока 1.58, плотность 0.06 кг/м^3 . Время на кадрах указано в наносекундах.

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ.

Литература

- [1]. Стариковский А.Ю., Александров Н.Л. Управление газодинамическими потоками с помощью сверхбыстрого локального нагрева в сильнонерасположенной импульсной плазме. Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 2. С. 126-192
- [2]. Дорошенко И.А., Знаменская И.А., Кузнецов А.Ю., Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н. Исследование плазодинамических процессов наносекундного диапазона при формировании ударных волн от импульсных разрядов. ЖТФ, 2018. Т. 88, Вып. 5. С. 684-691.
- [3]. Mursenkova I.V., Kuznetsov A.Yu., and Sazonov A.S. Unsteady interaction of nanosecond surface sliding discharge with plane shock wave. Appl. Phys. Lett., 2019. Vol. 115, No 11. 114102.

ПОЛУЧЕНИЕ НИТРОСОЕДИНЕНИЙ В РЕАКЦИИ С ВОДОЙ, АКТИВИРОВАННОЙ ИМПУЛЬСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ

¹Пискарев И.М., ²Аристова Н.А., ³Иванова И.П.

¹НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, i.m.piskarev@gmail.com

²Уральский федеральный университет, Нижнетагильский технологический институт, г. Нижний Тагил, Россия, aristova-na@mail.ru

³ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, ivanova.ip@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.175

Дистиллированная вода активировалась импульсным излучением горячей плазмы. Горячая плазма создавалась генератором искрового разряда ИР10. Рабочим газом служил воздух при атмосферном давлении. Мощность, выделяемая в разряде, составляла 0.59 Дж/с. Интенсивность УФ излучения генератора ИР10 составляла $(1.26 \pm 0.2) 10^{-10}$ моль(см²с)⁻¹.

Идентификация 4-нитрофенола осуществлялась по линии поглощения 300 нм, которая в щелочном растворе смещалась до 401 нм. Исследовалась зависимость выхода 4-нитрофенола в реакции фенола с активированной водой от концентрации фенола в исходной пробе 8 ÷ 500 мг/л для времени обработки 10 минут (доза 350 ± 20 Дж). Активированная импульсным излучением горячей плазмы вода смешивалась с пробой раствора фенола в соотношении 1:1. Концентрация 4-нитрофенола растет с концентрацией исходного фенола и выходит на плато, определяемое количеством генерируемых активных частиц. Исследовалась также зависимость выхода 4-нитрофенола в реакции с активированной водой при концентрации фенола в пробе 25 мг/л от времени обработки до 40 минут, доза до 1450 ± 50 Дж, см. рисунок 1. Видно, что максимальная доля образовавшегося 4-нитрофенола составляет примерно 70% от начальной концентрации фенола. Дополнительно сравнивался выход 4-нитрофенола при прямом воздействии излучения на раствор фенола 25 мг/л и через активированную воду. Результаты приведены в таблице 1.

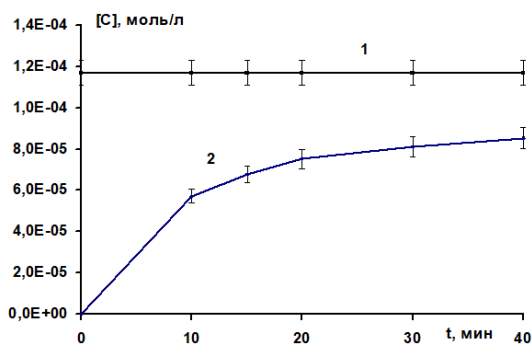


Рис. 1 [C] – концентрация продуктов, моль/л; t, мин – время, в течение которого активировалась излучением проба воды. Цифрами обозначены: (1) – исходная концентрация пробы фенола 25 мг/л в смеси с дистиллированной водой 1:1; (2) – концентрация 4-нитрофенола в смеси исходного фенола 25 мг/л и воды 1:1, активированной излучением в течение времени t через два дня после обработки.

Таблица 1. Концентрация 4-нитрофенола, образовавшегося при непосредственном воздействии излучения на раствор фенола и через активированную воду.

Условия Эксперимента	Концентрация 4-нитрофенола
Непосредственное воздействие излучения	$(5.9 \pm 0.5) 10^{-5}$ моль/л
Через активированную Воду	$(6.4 \pm 0.5) 10^{-5}$ моль/л

Из таблицы видно, что выход 4-нитрофенола при непосредственном воздействии излучения на раствор и через активированную воду одинаков.

Таким образом показано, что выход 4-нитрофенола при контакте с активированной излучением плазмы водой составляет порядка 70%, а выход продукта в реакции с активированной водой и при непосредственном воздействии излучения на раствор одинаков.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ ПЛАЗМОТРОНА ПОСТОЯННОГО ТОКА НА СВОЙСТВА ГРАФЕНА

Шавелкина М.Б., Филимонова Е.А., Амиров Р.Х., Иванов П.П.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия
mshavelkina@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.176

Широкий диапазон свойств графена (высокая подвижность носителей заряда, большая теплопроводность, химическая стабильность, механическая жёсткость) обусловлен степенью несовершенства двумерного кристалла, которая зависит от наличия собственных дефектов в кристаллической решетке и/или примесных дефектов в виде чужеродных атомов. Известны: гидрированный графен, деформированный вследствие присоединения водорода на отдельных участках графена; графен, легированный атомами азота; окисленный графен (содержащий кислородные группы), отличающиеся своими свойствами и областями применения.

В данной работе приведены результаты исследования плазмохимического синтеза графена в объеме при пиролизе углеводородов в плазменных струях плазмотрона постоянного тока мощностью до 45 кВт. Было установлено, что, используя смесь из гелия с добавкой пропан-бутановой смеси, достигается максимальный выход графена, содержащего водород в соотношении с углеродом 1:4. Если добавлять ацетилен к азоту, то в плазменной струе формируется азотсодержащий графен при давлении 100 Торр. При введении метана в плазму аргона при давлении в реакторе 350 Торр на выходе образуются малодефектные наноструктуры с латеральным размером до 2000 нм, что намного превосходит их геометрию при синтезе в других условиях. Согласно исследованию растровой электронной микроскопией, во всех случаях форма наноструктур – хлопьевидная, т.е. синтез в объеме приводит к образованию деформированного графенового листа [1]. Кроме того, как показал элементный анализ, отличаются наноструктуры присутствием разных чужеродных атомов и в разных количествах, что приводит к разной степени несовершенства, и это подтверждается анализом спектров комбинационного рассеяния света.

Известно, что при пиролизе углеводородов основными продуктами процесса являются сажа, ацетилен, водород, дивинил, этилен, этан и бензол, а факторами, влияющими на их образование: исходное сырьё; температура; время контакта и давление [2]. В эксперименте исходные углеводороды отличаются молекулярной массой и строением, но плазменные условия обеспечивают высокую степень их диссоциации. Давления в реакторе близки. Таким образом, при разложении углеводородов с помощью плазмотрона постоянного тока основным фактором, влияющим на различие в составе газофазных компонентов, является время контакта или время нахождения частиц при высоких температурах. На основе созданной модели реактора [3] для каждой плазмообразующей системы были получены профили температур, отличающиеся темпом снижения температур. Очевидно, что это приведет к разным временным интервалам контакта, и, следовательно, к разным условиям для формирования кристаллической структуры графена.

Таким образом, экспериментально и с помощью моделирования установлена корреляция между составом газовой фазы и степенью несовершенства графена.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № 075-01056-22-00).

Литература

- [1]. Shavelkina M. et al. J. Materials, 2020, 13,1728.
- [2]. Шурупов С.В. Газохимия, 2009, 5 (9), 64.
- [3]. Shavelkina M.V. et al. J Phys D Appl Phys., 2019, 52, 495202.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА С НАНОСТРУКТУРОЙ ТИПА «ПУХ»

¹Федорович С.Д., ^{1,2}Будаев В.П., ¹Чилин М.С.

¹НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, fedorovichsd@mail.ru,

²НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.177

Одним из негативных процессов, оказывающих влияние на эрозию и служащих источником загрязнения плазмы, является образование униполярных дуг (УД), когда поверхность является катодом и анодом одновременно. Униполярные дуги могут преимущественно генерироваться на шероховатых и неоднородных поверхностях, в том числе на вольфрамовых поверхностях типа «пух». Такие поверхности из слоев нановолокон диаметром 20-50 нанометров формируются при облучении вольфрама гелиевой плазмой в течение часовых разрядов при особых условиях потока частиц на поверхность. В установке ПЛМ [1] при испытаниях вольфрама стационарными потоками плазмы на поверхности формируются наноструктурированные слои типа «пух» толщиной до 1,5 микрон.

В данной работе исследованы эмиссионные свойства модифицированной поверхности вольфрама с такой наноструктурой типа «пух» [1]. Эксперимент проведен с использованием образца, с площадью поверхности 1,5 см², равномерно покрытой структурой типа «пух». Ширина межэлектродного зазора между полусферической поверхностью анода и образцом 0,3 мм. Отрицательный потенциал в интервале 0 – 10 кВ подавался на образец (рисунок 1 а). Вакуумная камера откачивалась до давления остаточных газов 6·10⁻⁶ Торр. Результаты эксперимента в сравнении с данными работы [2] представлены на рисунке 1 б. Полученный ток электронной эмиссии может вызвать взрывную электронную эмиссию и эрозию, что необходимо учитывать при эксплуатации термоядерных установок.

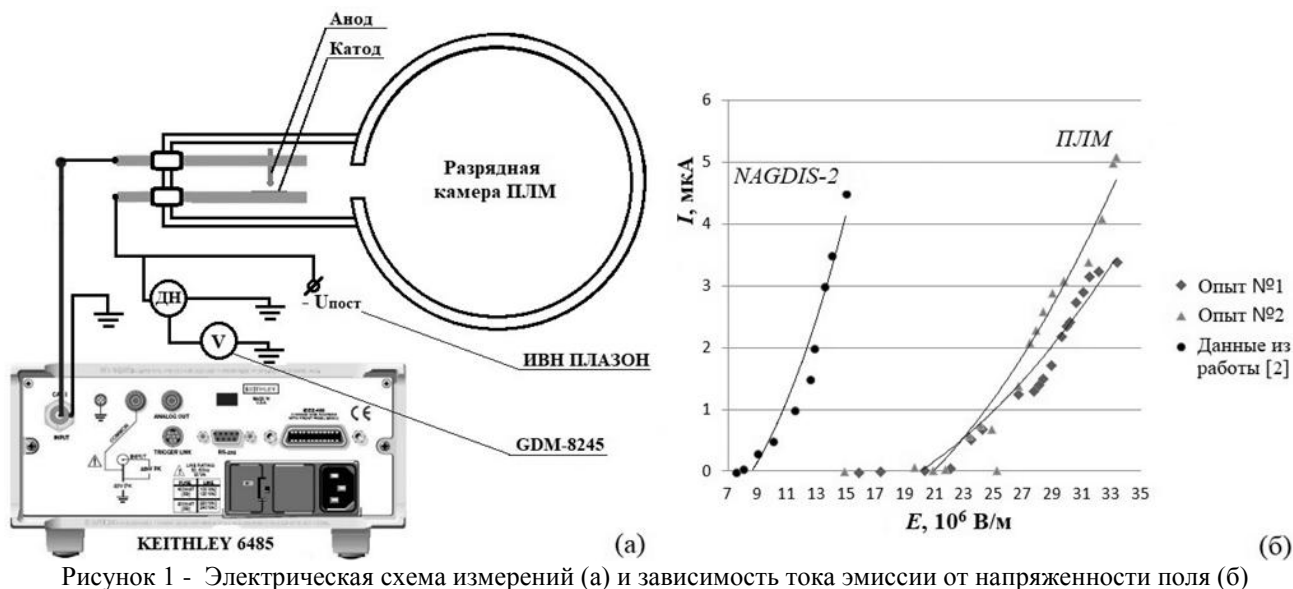


Рисунок 1 - Электрическая схема измерений (а) и зависимость тока эмиссии от напряженности поля (б)

Плазменные испытания выполнены в рамках проекта 223 ЕОТП-УТП ГК «Росатом», анализ материалов проведен при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ FSWF-2020-0023, оценки радиационных эффектов проведены при поддержке гранта РФФИ 19-29-02020.

Литература

- [1]. Будаев В.П. и др. ВАНТ сер. Термоядерный синтез. –2017. –Т.40, №3. – С.35.
 [2]. Hwangbo D. at al. IEEE Trans. Plasma Sci. – 2017. Vol. 45, No. 8. – P. 2080.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ ПРОТЯЖЁННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ДУГ ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ В РАЗНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕДАХ

Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В

НИИ механики МГУ, г. Москва, Россия, e-mail: krestytroitsk@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.178

Работа посвящена исследованию протяжённых сильноточных электрических дуг атмосферного давления на установке П-2000 НИИ механики МГУ [1]. Изучение таких разрядов продолжают исследования [2], связанные с уточнением и развитием представлений о влиянии внешнего магнитного поля на устойчивость протяженного дугового разряда и формирование многоканальных токовых структур. В отличие от работы [3], посвящённой преимущественно разрядам в воздушной среде, в настоящей работе основной акцент сделан на изучение особенностей влияния ориентации внешнего магнитного поля на динамику инициирования и развития разряда в разных газовых средах (CO_2 , Ar, N_2) и сопоставление полученных результатов с данными исследования в воздушной среде. 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 [3-5]. Рассмотрены вертикально ориентированные разряды. Изучались дуги между графитовыми (ЗОПГ) электродами разных диаметров (6-150мм). Инициирование разряда осуществлялось размыканием первоначально сомкнутых графитовых электродов. Межэлектродное расстояние 5 – 10 см. Продолжительность разрядов 0,5-2 с. Теоретическое моделирование дуг проведено в электротехническом приближении на основе классических эмпирических данных Г. Айртона. Проводилась высокоскоростная видеосъёмка разрядов с частотой 1200 к/с. Линейный CCD - приемник Toshiba-TCD1304 спектроанализатора регистрировал излучение дуги в диапазоне 260 660 нм. По осциллограммам тока и напряжения проводилась синхронная диагностика энерговклада и его оценка по разным областям дуг, а также пирометрическое измерение температуры катода. Измерялось магнитное поле и газодинамическое давление внутри разрядной камеры. Показано, что на устойчивость горения сильноточных дуг существенное влияние оказывает динамика электродных струй-факелов. Традиционные же модели дуг во внешнем магнитном поле [6] без учёта этих факторов показывают, что направление внешнего аксиального поля не влияет на стабильность дуг, влияя лишь на направление их закрутки.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова.

Литература

- [1]. Glinov A.P., Golovin A.P., and Kozlov P.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2055(2021) 012006.
- [2]. Глинов А.П., Головин А.П., Шалеев К.В. // Прикладная физика, 2018, № 2, с. 21-28.
- [3]. 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.
- [4]. Головин А.П., Глинов А.П. // Ломоносовские чтения, секция механики, тезисы докладов, Изд. МГУ 2022, с. 58-59.
- [5]. Глинов А.П., Головин А.П., Козлов П.В. // там же, с. 57-58.
- [6]. Недоспасов А.В., Хаит В.Д. Колебания и неустойчивости низкотемпературной плазмы, М.: Наука 1979, 168 с.

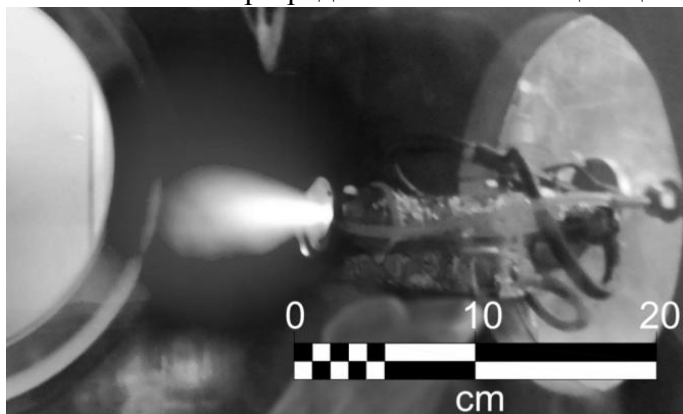
ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ, СОЗДАННОЙ ГЕНЕРАТОРОМ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С ПОДАЧЕЙ ГАЗА В РАЗРЯДНЫЙ КАНАЛ В СМЕСИ ГАЗОВ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Шлойдо А.И., Туркин А.В.

АО ГНЦ «Центр Келдыша», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.179

Генераторы электронных пучков (ГЭП), работающие непосредственно в газовой среде, являются перспективным средством решения многих технологических задач, таких как конверсия газов, пучково-плазменное напыление и т.д. Обширные экспериментальные исследования особенностей работы ГЭП на основе стационарного открытого разряда были проведены в [1, 2], также возможности расширения рабочего диапазона таких ГЭП при использовании в разрядном канале замещающего газа, например, гелия, рассмотрены в [3].



На рисунке плазма, созданная генератором при давлении замещающего газа (He) 2,6 кПа, давлении смеси газов 1 кПа, напряжении 5,0 кВ и токе 7,6 мА.

Для эффективного использования ГЭП в технологических установках и исследованиях плазмохимических процессов необходимо знание параметров плазмы в зоне взаимодействия потока электронов с окружающим газом. Однако прямое измерение этих параметров сопряжено с целым рядом

технологических трудностей. В качестве альтернативы прямому измерению параметров потока предложена расчетно-экспериментальная методика оценки параметров плазмы. Мощность пучка электронов, как и длина их свободного пробега, находится по измерениям ВАХ и энергетического КПД [4] ГЭП. Степень ионизации смеси газов – в предположении баланса процессов ионизации и рекомбинации заряженных частиц. Показано, что в плазме, созданной ГЭП в смеси газов среднего давления, ключевую роль в рекомбинации играет диссоциативная рекомбинация частиц. В этом случае степень ионизации газа пропорциональна квадратному корню из удельной (на единицу объема плазмы) мощности энерговыделения пучка и не зависит от давления газа. Даны оценки достоверности исходных допущений.

Используя измеренные в [4] ВАХ проведены расчеты характеристик плазмы в смеси газов (O_2 - 20,9%, N_2 - 78,1%, пары H_2O - 1%) при давлении от 1 до 2,5 кПа.

Рассмотрены варианты экспериментального подтверждения методики определения характеристик плазмы.

Литература

- [1]. Бобров В.А., Войтешонок В.С., Головин А.И. и др. Патент № 2535622 С1 РФ, МПК H05H 1/24 Генератор электронного пучка (варианты) EDN ZFSYOL
- [2]. Voiteshonok V.S. et al // J. Phys.: Conf. Ser. 927 012073 DOI 10.1088/1742-6596/927/1/012073 EDN XXQTDV
- [3]. Shloydo A.I., Turkin A.V. et al // Journal of Physics: Conference Series Moscow, 2021. P. 012009. DOI 10.1088/1742-6596/2055/1/012009. EDN NWEZJK
- [4]. Войтешонок В.С., Головин А.И., Егорова Е.К., Ломакин Б.Н., Туркин А.В., Шлойдо А.И., // ТВТ, 2017, Т. 55. № 5. С. 685-691. DOI 10.7868/S0040364417050209. EDN ZFSJEN

ОСТЫВАНИЕ ЗОНЫ РАЗРЯДОВ, СКОЛЬЗЯЩИХ ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА

Знаменская И.А., Карнозова Е.А., Руденко С., Дорощенко И.А.

*Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия,
znamen@phys.msu.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.180

Практический интерес к разрядам, скользящим по поверхности диэлектрика, связан с решением проблем изоляции (повышения электрической прочности поверхности), исключением условий возникновения плазмы разряда (например, на обшивке летательных аппаратов), с возможностями применения поверхностных разрядов для управления высокоскоростными газодинамическими потоками как в камерах сгорания летательных аппаратов, так и на обтекаемых поверхностях.

При рассмотрении разряда, скользящего по поверхности необходимо учитывать материал, подложки, смачиваемость и проводимость ее поверхности. Главными причинами ухудшения внешней изоляции (уменьшение напряжения пробоя) являются загрязнения поверхности диэлектрика, роль которых особенно заметно проявляется при увлажнении.

В работе исследованы условия развития разрядов:

1. Разряд, скользящий по поверхности диэлектрика вблизи диэлектрической вставки на горизонтальной поверхности плазменного листа; длина 30 мм.
2. Вертикальный колонообразный разряд вблизи окна разрядной камеры высотой 24 мм (режим контракции объемного разряда).

Регистрация велась через кварцевые окна рабочей камеры ударной трубы.

Теневая высокоскоростная съемка позволила зарегистрировать цилиндрические ударные волны от области импульсного линейного энерговклада вблизи вертикальных и горизонтальных стенок, измерить скорость [1].

Получены последовательные изображения инфракрасных полей, нагретых разрядами наносекундной длительности стенок камеры, исследовано время релаксации теплового излучения стенок вблизи диэлектрической вставки в форме прямоугольного параллелепипеда размером $6 \times 2 \times 48$ мм³. Показано, что время остывания области текстолитовой стенки, нагретой плазмой, может длиться до 30 мс и существенно превышает время остывания кварцевой стенки (до 4 мс).

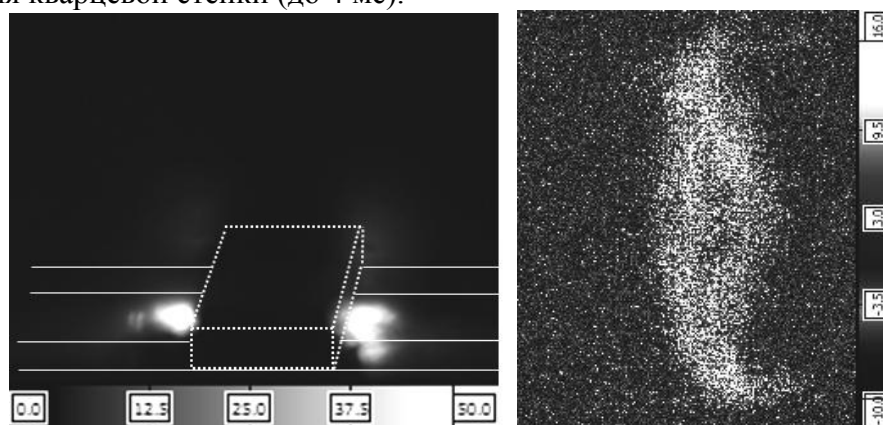


Рис. 1. Инфракрасная съемка нагретой стенки слева и окна камеры справа

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-29-00652

Литература

- [1]. Кузьмин Г.П., Минаев И.М., Рузадзе А.А. Обтекание вязким потоком газа плазменного листа, образованного скользящим разрядом // Прикладная физика. - 2004. - No 6. - С. 96-104.

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ РАСПЛАВА НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

¹Ерискин А.А., ¹Никулин В.Я., ²Колокольцев В.Н.

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, г. Москва, Россия, subzerno@gmail.com*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия, v.kolokoltsev@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.181

Целью работы было исследование морфологических изменений, возникающих на поверхности металлических мишеней, расположенных на различных расстояниях от анода, при воздействии импульсов плазмы на установке типа Плазменный фокус (ПФ). Ранее было замечено, что при воздействии плазмы на металлические мишени характер разрушений и морфология поверхности сильно зависят от расстояния между мишенью и анодом установки. Это создает определенные трудности при подборе оптимальных режимов работы установки ПФ при заданных расстояниях от мишени до анода. Эксперименты выполняли на установке плазменный фокус ПФ-5 (ФИАН). Энергетический запас емкостного накопителя (20 мкф) при напряжении ~18 кВ составлял ~3.2 кДж. Рабочим газом был азот при давлении в вакуумной камере ~1 Торр. Анод и катод установки, соответственно, диаметрами 30 и 50 мм, были выполнены из меди (Cu). Мишени размером ~90x90 мм и толщиной ~1 мм были изготовлены из сплава АМг, Cu, стали Ст3 и нержавеющей стали типа Х18Н10Т. Число импульсов плазмы, воздействующих на мишень, менялось от единиц до нескольких десятков импульсов. Обнаружено, что на расстоянии ~25 мм от анода на поверхности металлов образуются кольцевые структуры, геометрия которых соответствует размерам анода и катода. Наиболее интенсивная область воздействия плазмы ~8-10 мм располагается по центру анодной области и по размеру практически совпадает с диаметром конусного отверстия в аноде. При этом на поверхности мишеней из Ст3 и нержавеющей стали формируются тонкие нити расплава в области порядка размеров анода. Нити из расплавленного металла искривляются и закручиваются по и против часовой стрелки относительно центра анодной области. В случае воздействия плазмы на мишени из сплава АМг и Cu формируются прямые нити расплава. Наиболее отчетливо картина из пересекающихся нитей расплава наблюдается при многократном воздействии плазменных импульсов. Предполагается, что искривление нитей расплава связано с движением расплава металла в вихревом магнитном поле. Существенное значение при этом играют токи, протекающие через токово-плазменную оболочку и металлическую мишень, близко расположенную к аноду. На фотографиях плазменных струй, полученных с помощью электронно-оптического преобразователя, обнаружены потоки плазмы с правым и левым вращением, что косвенно подтверждает наличие таких магнитных полей. Эти соображения также подтверждаются тем, что на мишенях из диамагнитной Cu и в парамагнетике АМг искривление линий расплава не наблюдается. С увеличением расстояния от мишени до анода установки ~50 мм и более описанные выше картины воздействия плазмы на расплав металла не наблюдаются. При этом области воздействия плазмы сильно делокализованы при одновременном уменьшении интенсивности потока плазмы. Результаты экспериментов позволяют заключить, что расположение металлических мишеней на близких расстояниях от анода оказывает существенное влияние как на формирование токово-плазменной оболочки, так и на морфологию поверхности металла при воздействии плазмы на установках типа ПФ.

Работа выполнена по государственным заданиям: 075-00715-22-00 и 0023-2022-0004.

УСТАНОВКА ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС С АНОДНЫМ НАКОНЕЧНИКОМ ИЗ ТИТАНА

¹Ерискин А.А., ¹Никулин В.Я., ²Колокольцев В.Н.

¹*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, г. Москва, Россия,
subzerno@gmail.com*

²*Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия,
v.kolokoltsev@yandex.ru*

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.182

На основе установки ПФ-5 мейзеровского типа с анодным узлом (анод и катод), изготовленными из меди, выполнена модернизация путем замены медного наконечника анода на титановый. Целью работы являлось изучение возможности получения достаточно химически чистых покрытий и пленок из Ti и других металлов на поверхности мишеней из различных материалов. Установка имела следующие параметры: запасаемая энергия 3.2 кДж при рабочем напряжении до +18 кВ; емкость конденсаторной батареи 20 мкФ (4 конденсатора по 5 мкФ). Разрядная камера была изготовлена из сплава типа АМг и имела размеры: внутренний диаметр 180 и высота 146 мм. Рабочими газами были: дейтерий и благородные газы. Диаметры анода и катода, соответственно, были равны 30 и 51 мм. Длина анода была равна 43 мм. Интервалы времени между импульсами плазмы составляли ~3 мин. Известно, что при получении различного рода покрытий и пленок на установках типа плазменный фокус в них присутствуют примеси, связанные с распылением материала анода (Cu). В то же время при решении ряда прикладных задач требуется получение покрытий и пленок достаточно чистого химического состава. Считается, что изготовление анодного узла из другого материала с меньшей электропроводностью может привести к нестабильной работе установки и не позволит получить характерного для неё схождения тока в виде воронки (токово-плазменной оболочки) и сохранению высокой плотности энергии в плазменном пинче.

В работе представлены первые экспериментальные результаты исследования рабочих параметров установки ПФ-5 с титановым анодом (при сохранении катода из меди) и другой вариант – замена в анодном узле из Cu только медного наконечника анода на титановый. В первом случае корпус анода был изготовлен из стали типа X18H10T и покрыт пленкой Ti толщиной ~0,4 мм. Анодный наконечник был изготовлен из титана марки VT1-0 и установлен вместо медного. Оказалось, что в этом случае режим работы установки значительно изменился, «особенность» была мала и наблюдалась только в области максимума амплитуды производной тока разряда. При этом интенсивность плазменного потока также была невелика. Во втором случае, при замене только медного наконечника анода на титановый, наблюдалось увеличение амплитуды «особенности» и существенное увеличение энергии в плазменном импульсе. С помощью электронно-оптического преобразователя получены фотографии плазменной струи. Установлено, что характер формирования плазменного потока во многом схож с тем, который наблюдается на анодном узле, изготовленном из меди. Выполнены первые опыты по воздействию кумулятивных потоков плазмы Ti на металлические мишени и силикатное стекло. Полученные результаты позволяют заключить, что установки типа плазменный фокус с энергией в несколько килоджоулей можно использовать для получения интенсивных потоков плазмы из различных металлов путем соответствующей замены анодного наконечника. При этом одновременно достигается и достаточно высокая химическая чистота покрытий, необходимая при решении ряда прикладных задач.

Работа выполнена в рамках госзаданий: 075-00715-22-00 и 0023-2022-0004.

ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ НА СТЕКЛА ЧЕРЕЗ ДИАФРАГМЫ НА УСТАНОВКЕ ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС

¹Боровицкая И.В., ²Гайдар А.И., ¹Колокольников В.Н., ¹Кобелева Л.И., ³Мезрин А.М.,
⁴Никулин В.Я., ⁴Силин П.В.

¹Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва, Россия, v.kolokotsev@yandex.ru

²Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, г. Москва, Россия, a_i_g@bk.ru

³Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия, amezrin@rambler.ru

⁴Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия, lfpp@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.183

Целью работы являлось получение тонких пленок тугоплавких металлов: Мо, W и Ta небольших размеров (<5 мм) на стеклянных подложках на установке Плазменный фокус (ПФ). В работе использовали установку ПФ-4 (ФИАН) с коаксиальными электродами и запасаемой энергией в конденсаторной батарее ~ 3,2 кДж. Осаждение пленок металлов на стеклянные подложки выполняли через металлические диафрагмы с отверстиями диаметром: 2.5, 3.5 и 4.5 мм. Размер диафрагм определялся возможностью получения достаточно однородных пленок на подложках при заданной запасаемой энергии в установке ПФ-4. Держатель образцов и диафрагмы были изготовлены из нержавеющей стали типа X18H10T. Толщина металлических фольг подбиралась таким образом, чтобы имело место полное расплавление и испарение металла за время действия одного импульса плазмы. Толщина фольг была <50 мкм. Рабочими газами были аргон (Ar) и азот (N₂) при давлении в рабочей камере ~ 1 Торр. Подложки из силикатного стекла размером ~ 20x20 мм изготавливали из фотопластинок толщиной ~1,5-2,0 мм. Подложки промывали этанолом и дистиллированной водой. Пленки металлов исследовали на растровом микроскопе EVO-40 с рентгеновским микроанализатором, оптическом профилометре 3D модели S Neox фирмы Sensobar-Tech, SL, цифровом профилометре XP-200 фирмы AMBIOS и оптическом микроскопе Leica DM. На рис.1а,б,в показана типичная картина распределения частиц металла и элементный состав пленки Та.

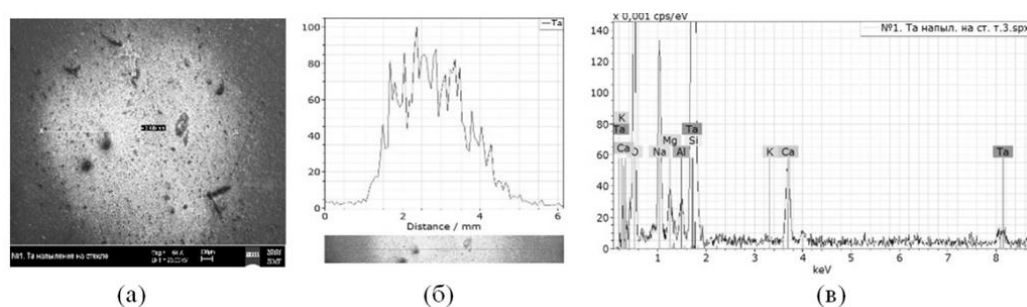


Рис. 1. Пленка тантала на стеклянной подложке (растровый микроскоп EVO-40): (а) – область осаждения Та; (б) – относительная концентрация Та в области напыления; (в) – элементный состав пленки.

Средняя толщина пленок металлов на подложках находилась в интервале от единиц до ~10 мкм. Высокая адгезия пленок металлов со стеклянными подложками достигалась за счет глубокого проникновения частиц под поверхность стекла при высокой скорости плазменной струи >10⁷ см/с. Следует отметить, что осаждаемые пленки состоят из отдельных металлических частиц размером от десятков до сотен нанометров и поэтому их свойства существенно отличаются от пленок, получаемых магнетронным способом.

Работа выполнена по государственным заданиям № 075-00715-22-00 и 0023-2022-0004.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗЭЛЕКТРОДНОГО ПЛАЗМЕННОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ БПРД-100 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ.

Баркалов Е.Е., Веселовзоров А.Н., Камин Д.В., Свирский Э.Б.

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, e-mail: aveselov14@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.184

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» ведутся работы по созданию макета безэлектродного плазменного ракетного двигателя БПРД-100. Расчётные параметры этого двигателя: мощность 100 кВт, тяга 3 Н, удельный импульс 5000 с, тяговый к.п.д $\approx 70\%$.

Как правило для измерения тяги электроракетные двигатели (ЭРД) размещались непосредственно на самом тягоизмерительном устройстве. Это было возможно в связи с относительно небольшим весом и компактностью разрабатываемых до настоящего времени моделей ЭРД, а также возможностью создания системы гибких токо- и газоподводов от стендового оборудования к двигателю, размещённому на тягоизмерительном устройстве. К сожалению, конструкция БПРД-100 не позволяет пойти по этому стандартному пути из-за большого веса и больших размеров двигателя, а также жёсткости системы коммуникаций от стендового оборудования к двигателю. Поэтому в данной работе была рассмотрена возможность определения тяги БПРД-100 по локально измеренным параметрам плазменной струи, вытекающей из двигателя, таким как энергия ионов, плотность ионного тока и т.д., для измерения которых был разработан соответствующий диагностический комплекс.

В состав комплекса вошли: тягоизмерительное устройство, разработанное по схеме крутильных весов с системой обратных связей, различного типа измерительные зонды (одиночные электростатические зонды Лэнгмюра, многосеточные зонды), электроизмерительные приборы, масс-спектрометр динамического типа МХ-7304, осциллография, вычислительная техника, а также система механических устройств для перемещения и фиксации положения зондов относительно плазменной струи двигателя и т.д. Для создания плазменной струи использовалась имеющаяся на стенде небольшая модель стационарного плазменного двигателя СПД-100. Двигатель СПД-100 устанавливался на тягоизмерительное устройство, и тяга измерялась при работе двигателя на разных рабочих газах (Ar, Kr, Xe) в широком диапазоне параметров. Одновременно с измерением тяги проводились измерения параметров плазменной струи, вытекающей из двигателя. Измерялись распределения ионного тока по сечению пучка, спектры ионов по энергии, наличие и количество многозарядных ионов и т.д. Затем на основе полученных данных рассчитывались значения тяги F для нескольких режимов работы двигателя СПД-100 по следующему эмпирическому соотношению: $F = 1,13 * (\sqrt{M * E_i} / e) * I_i * (n^+ + n^{2+} * \sqrt{2})$.

Здесь M и E_i – масса и средняя энергия однократно-заряженных ионов рабочих газов, I_i – величина ионного тока, n^+, n^{2+} – доли однократно- и двукратно-заряженных ионов рабочих газов в плазменной струе двигателя.

Разница между значениями тяги, полученными с помощью тягоизмерительного устройства и рассчитанными на основе измеренных параметров плазменной струи, находится в пределах $\pm 10\%$. Этот результат подтверждён данными испытаний модели СПД-100 на разных газах в широком диапазоне разрядных напряжений и подач рабочего газа. Поэтому рассмотренный выше подход представляется вполне обоснованным для определения тяги на основе измеренных параметров плазменной струи, по крайней мере, на первоначальном этапе испытаний макета двигателя БПРД-100. Кроме того, существенным является то, что измеренные параметры плазменной струи позволяют судить о процессах образования плазмы и её ускорения в рабочей камере двигателя и искать возможности для оптимизации этих процессов и соответственно самого двигателя.

РАСТЕКАНИЕ ТОКА В ТОНКИХ ФОЛЬГАХ ИЛИ ПЛОСКИХ ТОКОВЫХ СЛОЯХ

Гаранин С.Ф., Кравец Е.М.

*ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская обл., Россия, e-mail:
SFGaranin@vniief.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.185

Для рассмотрения эволюции распределения токов в неоднородных тонких проводящих слоях или фольгах используется интегро-дифференциальное уравнение, с помощью которого трехмерная задача для магнитного поля сводится к двумерной, а для распределения токов по ширине неоднородных проводящих слоев или фольг это уравнение позволяет свести двумерную задачу для магнитного поля к одномерной.

Для однородных проводящих слоев с постоянной проводимостью пространственный масштаб распределения тока, сосредоточенного вначале в ограниченной области, растет пропорционально времени со скоростью $u = c^2 / 4\pi\sigma\Delta$, где σ – проводимость материала слоя, Δ – его толщина.

В качестве приложения к задачам переброса тока с помощью электровзрывных размыкателей рассмотрено распределение тока по ширине фольги для периодической системы плоских фольг типа «змеек». Показано, что в этой системе вначале в фольге устанавливается распределение тока, соответствующее идеальной проводимости фольги. Затем за времена $\sim s/u$ ($2s$ – ширина фольги) происходит релаксация распределения тока в фольге к равномерному.

Оценки показывают, что если фольги используются в качестве размыкателей, то токи по фольгам в процессе переброса тока в нагрузку должны успевать распределяться равномерно по их ширине, поэтому поправки на неоднородность распределения тока в размыкателях должны быть невелики.

СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАНАРНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ РАЗРЯД С ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ

¹Шандриков М.В., ^{1,2}Окс Е.М., ¹Черкасов А.А.

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия,
shandrikov@opee.hcei.tsc.ru*

²*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.186

Представлены результаты экспериментальных исследований разрядной системы на основе планарного магнетронного разряда с дополнительной инжекцией электронов. Принципиальное отличие предложенного способа от известных систем с электронным ассистированием состоит в том, что инжекция электронов в магнетронный разряд осуществляется с обратной стороны распыляемой мишени через центральное отверстие. Такой подход обеспечивает дополнительное ускорение инжектируемых электронов в катодном слое магнетронного разряда и увеличение энергетической эффективности разрядной системы. В качестве эмиттера электронов использовалась плазма тлеющего разряда с полым катодом и вакуумно-дугового разряда. Магнетронный разряд функционировал в сильноточном (5÷50 А) импульсном (200÷400 мкс, 5÷25 Гц) режиме. Диаметры медной мишени и центрального эмиссионного отверстия составляли 125 и 2 мм, соответственно. В качестве рабочего газа использовался аргон. Масс-зарядовый состав ионов определялся с использованием квадрупольного и время-пролетного спектрометров.

Показано, что использование дополнительной инжекции электронов в катодный слой магнетронного разряда позволяет в 2÷3 раза уменьшить нижнее предельное рабочее давление магнетронного разряда при поддержании амплитуды тока разряда на заданном уровне. При этом совместное использование центральной инжекции электронов и конического отражающего электрода, расположенного за выходным отверстием в мишени на пути пучка инжектированных электронов, позволяет поддерживать высокое значение доли ионов материала мишени, в том числе в диапазоне низких значений рабочего давления, где стандартный магнетронный разряд характеризуется увеличением доли ионов рабочего газа, либо не реализуется в сильноточной форме. Исследованы оптимальная форма, размеры и пространственное положение отражающего электрода для достижения наибольшего влияния на параметры магнетронного разряда. Продемонстрированы основные изменения микроструктуры пленок, формируемых при снижении рабочего давления в процессе магнетронного осаждения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-19-00136).

ПРИМЕНЕНИЕ СТРУЙНОГО ВЧЕ РАЗРЯДА В ДИНАМИЧЕСКОМ ВАКУУМЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СВМПЭ И ПОЛИУРЕТАНОВОЙ МАТРИЦЫ

¹Абдуллин И.Ш., ²Желтухин В.С., ¹Некрасов И.К., ¹Сагитова Ф.Р.

¹ООО «Плазма-ВСТ», г. Казань, Россия, plasma.vst@gmail.com,

²КФУ, г. Казань, Россия, igknekrasov@stud.kpfu.ru.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.187

Проведены исследования по применению струйного ВЧЕ разряда в условиях динамического вакуума для создания композиционного материала с применением волокнистых материалов. Целью исследования являлось повышение смачиваемости волокнистого материала путем модификации поверхности в плазменной струе ВЧЕ разряда.

В качестве плазмообразующего газа использовался воздух, давление варьировалось от 13 до 133 Па, энергия ионов, поступающих на обрабатываемый материал, составляла от 50 до 100 эВ при плотности ионного тока от 0.7 до 0.9 А/м², частота генерации плазмы устанавливалась на значении 13.56 МГц, время обработки составляло от 5 до 15 мин. Описание установки представлено в работе [1].

Установлено, что физическим инструментом обработки в струйном ВЧЕ разряде является поток низкоэнергетических ионов [1]. В данной работе проводилось сравнение характеристик КМ с применением ВЧЕ плазменной обработки на основе СВМПЭ и полиуретановой матрицы (ПЭПУ) и эпоксидной матрицы (ПЭЭ), и на основе арамидной ткани Русар-С и эпоксидной матрицы (АРЭ) (табл.1). На рис.1 представлен вид сбоку на КМ.

Рисунок №1. Вид сбоку плазмообработанного КМ на основе СВМПЭ и эпоксидной смолы.

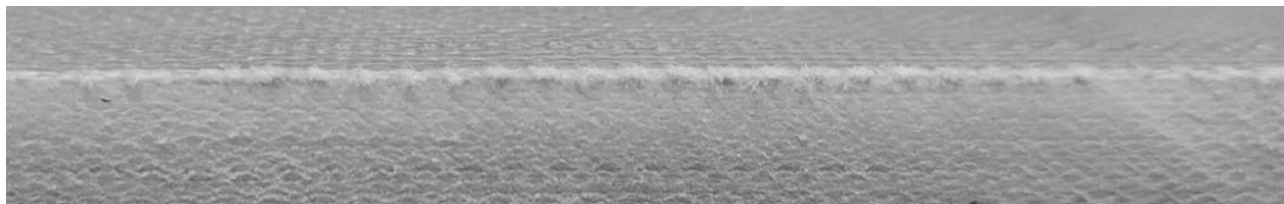


Таблица №1. Сравнение характеристик

Параметр	Материал		
	ПЭПУ	АРЭ	ПЭЭ
Разрывное удлинение, %	4.1	2,6	3,6
Плотность, к см ³	1,10	1,45	1,20
Удельный модуль, км	13305	5208	12005
Удельная прочность, Сн/Текс	360	285	168

Таким образом, получен композиционный материал, обладающий высокими физико-механическими характеристиками.

Литература

- [1]. И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, Н.Ф. Кашапов. Высоочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения / - Казань: Изд-во Казанского ун-та. 2000. 348 с.

АНАЛИЗ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ПРИ ВСТРЕЧНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ДЕЙТЕРИЕВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

^{1,2}Бурмистров Д.А., ¹Гаврилов В.В., ¹Жарова А.А., ¹Житлухин А.М.,
^{1,3}Лиджигорьяев С.Д., ^{1,3}Топорков Д.А.

¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Россия

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

³Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.188

Исследование взаимодействия Д-Д плазменных потоков проводили на экспериментальной установке 2МК-200, состоящей из двух электродинамических ускорителей с импульсным напуском газа, установленных на расстоянии 3 м друг от друга. Рабочее напряжение варьировали от 16 до 24 кВ [1]. Ускорители соединялись плазмопроводом диаметром от 219 до 166 мм с сужением к середине. С помощью многовитковых соленоидов в плазмопроводе создавалось квазистационарное магнитное поле индукцией от 1 до 2 Тл к центру лайнера.

В экспериментах интегральный за импульс выход нейтронов определяли с помощью индиевых и серебряных активационных датчиков на основе счетчиков СБТ10А, помещенных в полиэтиленовый блок-замедлитель.

Для восстановления нейтронного выхода кроме калибровочной величины пользовались аппроксимацией экспоненты уменьшения числа распадов в детекторе, когда известен период полураспада активного элемента. То есть производилась аппроксимация сигнала с детектора функцией: $\Delta N = N_0 (1 - e^{-(\lambda\delta)}) e^{-\lambda t}$, откуда вычислялось число активированных ядер серебра N_0 , которое пропорционально нейтронному выходу.

На рисунке 1 представлена типичная кривая распада серебра, полученная в ходе эксперимента при напряжении на конденсаторной батарее 16 кВ.

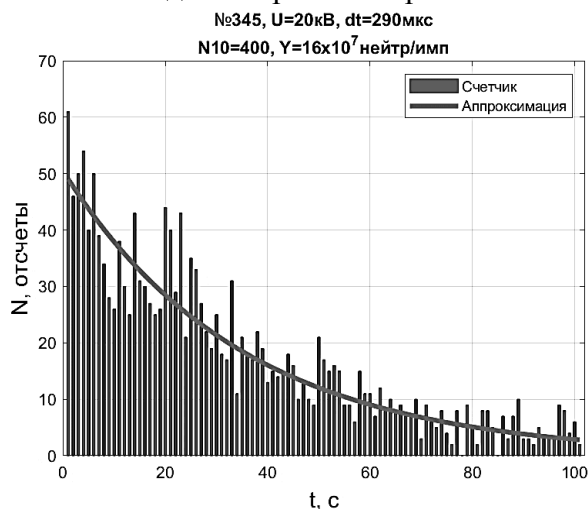


Рисунок 2 – Отклик активационного детектора, соответствующая $1,6 \cdot 10^8$ нейтрон/импульс

В режимах работы ускорителей с напряжением конденсаторной батареи $U > 20$ кВ головная часть потока являлась источником интенсивного нейтронного излучения. Нейтронный выход за время пролёта 5-10 мкс достигал $N \sim 10^{10}$ нейтронов.

Литература

[1]. Житлухин А.М., Илюшин И.В., Сафронов В.М. Физика плазмы. 1982. том 8. 508-518

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА, ФОРМИРУЕМОГО ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ДЕЙТЕРИЕВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

¹Жарова А.А., ^{1,2}Бурмистров Д.А., ¹Гаврилов В.В., ¹Житлухин А.М.,
^{1,3}Лиджигоряев С.Д., ^{1,3}Топорков Д.А.

¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк, Россия

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

³Национальный исследовательский университет "МЭИ", г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.189

Одним из возможных практических применений импульсных плазменных ускорителей является создание источников нейтронного излучения для использования в различных научных и технологических целях. В работе приводятся результаты исследования импульсного источника Д-Д нейтронного излучения, основанного на базе установки 2МК-200, состоящей из двух электродинамических ускорителей, установленных на расстоянии 3 м друг от друга [1]. Импульс длительностью 5-10 нс генерировался при столкновении двух потоков плазмы с энергосодержанием 70-100 кДж в коническом плазмопроводе диаметром от 219 до 166 мм с сужением к середине. Плазменные потоки двигались навстречу друг другу в продольном магнитном поле с индукцией до 2 Тл.

В результате столкновения потоков в камере взаимодействия формировалось цилиндрическое плазменное образование. С целью компактизации источника нейтронов в центральное сечение добавлялась сверхзвуковая D₂ газовая струя. Плотность завесы составляла 10¹⁷ частиц/см³.

Для определения протяжённости источника генерации нейтронов, образовавшегося в результате столкновения плазменных потоков, применялись сцинтилляционные детекторы с кристаллом стибьена, помещенные в нейтронные коллиматоры. Детектор измерял интенсивность нейтронного излучения в пределах телесного угла $7.85 \cdot 10^{-3}$ ср., а слой литированного полиэтилена толщиной 30 см обеспечивал ослабление нейтронного потока, не попадавшего в телесный угол, в 10 раз. Детекторы помещались в дополнительную свинцовую оболочку для защиты от тормозного γ – излучения [2].

Эффективное взаимодействие потоков происходит при столкновении быстрых головных частей (с низкой плотностью) с основными частями встречного потока.

Столкновение плазменных сгустков происходило в центральном сечении плазмопровода на расстоянии 1,5 м от обоих ускорителей. Смещение области генерации в зависимости от параметров эксперимента составило $\pm 0,5$ м.

Литература

- [1]. В.В. Гаврилов, Ф.Г. Еськов, А.М. Житлухин, Д.М. Кочнев, и др. Физика плазмы. 2020. 46. 606-612
- [2]. В.И. Юревич. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2012. Т. 43. 703-805

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА В ЧАСТОТНОМ РЕЖИМЕ

Савенко Н.О., Багдасаров Г.А., Гасилов В.А.

*Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН, г. Москва, Россия,
savenkonki@gmail.com*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.190

В настоящее время активно исследуются частотные режимы работы ускорителей электронов на основе капиллярных разрядов. Электроны в них ускоряются под действием лазерных импульсов фемтосекундного диапазона длительности, пропускаемых через плазму разряда. В настоящем докладе обсуждаются результаты трехмерного магнитогидродинамического моделирования цикла капиллярного разряда, включающего стадии заполнения капилляра рабочим газом (водород), формирование плазменного канала и восстановление рабочей среды перед началом следующего разряда. Моделируемый капилляр имеет круглое сечение диаметром до ~ 500 мкм, соединенный с каналами подачи газа.

Моделирование выполнено главным образом для получения такой характеристики, влияющей на эффективность ускорителя в целом, как характерное время, необходимое для получения установившихся течений на отдельных этапах работы ускорительной системы:

- этап заполнения капилляра газом из подводящих каналов до выхода на стационар;
- этап электроразряда в капилляре и выход параметров на уровень параметров этапа заполнения.

Свободными параметрами в данной задаче являются: длина капилляра, его диаметр, форма среза, давление подаваемого газа через подводящие каналы. Было принято, что капилляр 2 см в длину, 300 мкм в диаметре, круглого среза, а давление на входе 125 мбар при температуре 293К. В основном расчете предпринята попытка обеспечить, за счет вариаций свободных параметров, симметрию плазменного канала вдоль оси капилляра, по возможности сохраняя его профиль (с пониженной плотностью на оси), необходимый для фокусировки лазерного пучка. Показана возможность симметризации канала за счет использования четырех подводящих каналов, расположенных крестообразно. Показана возможность использования капиллярного разряда в частотном режиме.

Расчеты проводились на суперкомпьютерах K60 и K100 Центра коллективного пользования ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Литература

- [1]. G.A. Bagdasarov, K.O. Kruchinin, A.Yu. Molodozhentsev, P.V. Sasorov, S.V. Bulanov, V.A. Gasilov Discharge plasma formation in square capillary with gas supply channels. *Physical Review Research* 4, 013063 (2022)
- [2]. A.J. Gonsalves, F. Liu, N.A. Bobrova, P.V. Sasorov, C. Pieronek, J. Daniels, S. Antipov, J.E. Butler, S.S. Bulanov, W.L. Waldron, D.E. Mittelberger and W.P. Leemans Demonstration of a high repetition rate capillary discharge waveguide. *Journal of Applied Physics* 119, 033302 (2016)

СТОЛКНОВЕНИЕ ВСТРЕЧНЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ГАЗОВОЙ СТРУЕЙ В ПРОДОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

¹Топорков Д.А., ¹Бурмистров Д.А., ¹Гаврилов В.В., ¹Житлухин А.М., ¹Лиджигоряев С.Д.,
¹Пушина А.В., ²Пикуз С.А., ²Рязанцев С.Н., ²Скобелев И.Ю.

¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, Россия, toporkov@triniti.ru

²Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.191

В настоящей работе, мотивированной разработкой компактного источника мощного рентгеновского излучения [1-4], представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия с газовой мишенью двух встречных высокоэнергетичных плазменных потоков. Сверхзвуковая газовая струя азота/неона формировалась с помощью плоского сопла Лавалья. Максимальная плотность частиц в струе толщиной ≈ 4 см и шириной ≈ 10 см достигала $4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Плазменные потоки со скоростями $(4 \div 6) \times 10^7 \text{ см/с}$, ионной плотностью $(2 \div 4) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и энергосодержанием до 100 кДж создавались электродинамическими коаксиальными ускорителями с импульсным напуском газа – водорода, азота и неона.

Варьирование химического состава взаимодействующих объектов позволило получить широкий набор экспериментальных данных. В докладе основное внимание уделяется определению параметров плазмы, образующейся при взаимодействии мощных плазменных потоков с газовой струей, а также измерению энергетических и спектральных характеристик рентгеновского излучения, генерируемого этой плазмой.

Динамика взаимодействия плазменных потоков с газовой струей регистрировалась с помощью многокадровой рентгеновской МКП-камеры, оснащенной обскурами. Мощность и энергия излучения, генерируемого в зоне взаимодействия плазменных потоков с газовой мишенью, измерялись рентгеновскими фотодиодами. Методом фильтров определялся временной ход электронной температуры плазмы, образующейся в процессе взаимодействия плазменных потоков со струей. Для регистрации излучения плазмы с пространственно-временным разрешением в спектральном диапазоне $1 \div 70$ нм использовался спектрограф с пропускающей решеткой и МКП-камерой. Наблюдаемые интенсивности линий сопоставлялись с результатами численного моделирования спектров, что также позволяло оценивать электронную температуру плазмы.

В заключение сопоставляются экспериментальные результаты, полученные при взаимодействии встречных плазменных потоков различного химического состава с газовой мишенью. В частности, отмечается, что в экспериментах с газовой струей и водородными плазменными потоками эффективность преобразования энергии потоков в энергию рентгеновского излучения оказалась выше, чем при использовании азотных и неоновых потоков плазмы.

Литература

- [1]. Гаврилов В.В., Еськов А.Г., Житлухин А.М., Кочнев Д. М., Пикуз С.А., Позняк И.М., Рязанцев С.Н., Скобелев И.Ю., Топорков Д.А., Умрихин Н.М. // Физика плазмы, 2018, т. 44, № 9, с. 730–739
- [2]. Гаврилов В.В., Еськов А.Г., Житлухин А.М., Кочнев Д. М., Пикуз С.А., Позняк И.М., Рязанцев С.Н., Скобелев И.Ю., Топорков Д.А., Умрихин Н.М. // Физика плазмы, 2020, том 46, № 7, с. 606–612
- [3]. Топорков Д.А., Гаврилов В.В., Житлухин А.М., Карлыханов Н.Г., Костюшин В.А., Матвеев Ю.И., Позняк И.М. // XLVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2021 г., Т4-1
- [4]. Gavrilo V.V., Es'kov A.G., Zhitlukhin A.M., Kochnev D.M., Poznyak I.M., Pikuz S.A., Ryazantsev S.N., Skobelev I.Yu., Toporkov D.A., Umrikhin N.M. // 47th EPS Conference on Plasma Physics, 2021, EPS Europhysics Conference Abstracts, Vol. 45A, p. 545–548

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСЛОЙНЫХ ПРОФИЛЕЙ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В УГЛЕРОДЕ И БЕРИЛЛИИ НА ОСНОВЕ МЕТОДИК ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

¹Афанасьев В.П., ¹Лобанова Л.Г., ²Ефременко Д.С.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²Германский центр авиации и космонавтики, Оберпфaffenхофен, Германия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.192

В настоящей работе развита количественная методика расчета профилей изотопов водорода в бериллии и углероде на основе расшифровки спектров СПУОЭ и СОЭ.

Спектроскопия пиков упруго отраженных электронов (СПУОЭ) или Elastic Peak Electron Spectroscopy (EPES) – методика анализа содержания изотопов водорода в конструкционных материалах, часто называемая электронным Rutherford Back Scattering (ERBS) по аналогии с известным методом анализа поверхности, основанным на анализе процессов рассеяния легких ионов [1]. Спектроскопия пиков упруго отраженных электронов реализуется на установках, обладающих высоким энергетическим разрешением, удовлетворяющем критерию Рэлея. Глубина зондирования мишени определяется средней длиной свободного неупругого пробега электронов между двумя соударениями – l_{in} [1,2]. Величина l_{in} растет с ростом энергии зондирующего пучка E_0 по закону: $l_{in} \propto E_0^{0.8}$. Определяя среднее содержание изотопа водорода в слое толщиной порядка l_{in} , при различных значениях энергии зондирующего пучка E_0 , возможно определить послойный профиль интересующего изотопа водорода в слоях порядка нескольких нанометров, при энергии зондирующего пучка E_0 , порядка нескольких кэВ.

Эффективным методом анализа водорода на глубинах порядка транспортного пробега – l_{tr} является спектроскопия отраженных электронов – СОЭ [3]. Отметим, что величина l_{tr} для электронов с начальной энергией $E_0 = 5$ кэВ, зондирующих мишень из бериллия, составляет примерно 700 нм. При увеличении энергии зондирующего пучка E_0 до 30 кэВ l_{tr} составит 15 мкм. Таким образом, методика СОЭ позволяет определять водород на глубинах, варьирующихся в диапазоне от нескольких сотен нм до нескольких десятков мкм, однако недостатком СОЭ методики является определение элементного состава по зарядам ядер, т.е., в отличие от СПУОЭ, измерение суммарного по изотопному составу водорода.

Расшифровка экспериментальных результатов методик СПУОЭ и СОЭ представляет сложную процедуру. Для определения интенсивностей пиков упруго отраженных электронов в спектре СПУОЭ необходимо выполнить нетривиальную процедуру вычитания фона, созданного неупруго рассеянными электронами, а затем связать интенсивность пика, являющуюся результатом процессов многократного упругого рассеяния электронов в многокомпонентном материале, с концентрацией исследуемого элемента. Для определения концентрации водорода в бериллии или углероде методом СОЭ необходимо построить множество расчетных спектров с различным послойным профилем водорода для проведения процедуры фитинга с экспериментальными данными.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2020-0023.

Литература

- [1]. Vos M., Went M.R. Surf. Interface Anal., 2007, Vol. 39, P. 871-876.
- [2]. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Kaplya P.S., Köppen M., Ridzel O.Yu., Subbotin N.Yu., Hansen P. J. Phys.: Conf. Ser., 2017, Vol. 891, P. 012303.
- [3]. Afanas'ev V.P., Bodisko Yu.N., Kaplya P.S., Lobanova L.G., Ridzel O.Yu., Strukov A.N. J. Phys.: Conf. Ser., 2020, Vol. 1713, P. 012001.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ТЕРМОЯДЕРНЫХ ЭНЕРГИЙ С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

¹Афанасьев В.П., ¹Лобанова Л.Г., ²Шульга В.И.

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.193

Знание процессов взаимодействия потоков легких ионов с твердыми телами необходимо для практической реализации целого ряда технологических процессов [1,2]. Методы анализа твердого тела (Ion Scattering Spectroscopy – ISS, Low Energy Ion Spectroscopy – LEIS), основанные на зондировании мишени легкими ионами (изотопы водорода и ионы гелия), широко применяются для исследования мишеней сложного состава. Последовательное количественное описание процессов отражения и внедрения легких ионов в конструкционные материалы необходимо для решения проблем «первой стенки» установок для реализации УТС.

В настоящей работе представлено теоретическое описание процессов рассеяния легких ионов на основе данных по сечениям упругого и неупругого рассеяния, имеющих в современной литературе. Расчеты, выполненные как на основе аналитических моделей, так и на основе компьютерного моделирования, анализируются путем сравнения с экспериментальными данными. Рассмотрено как отражение потоков легких ионов, так и прохождение их сквозь слои поликристаллических образцов. Исследуется отражение легких ионов от слоисто-неоднородных мишеней. Рассмотрено взаимодействие легких ионов с энергией от сотен эВ до десятков кэВ с материалами в широком интервале атомных номеров. Выполнен критический обзор существующих аналитических моделей многократного рассеяния.

Значительное внимание в работе уделено проблеме описания процессов потерь энергии легких ионов. В настоящее время расчеты ведутся на основе модели Фоккера-Планка – МФП. Данная модель неприменима к описанию потерь энергии легких ионов с энергией от сотен эВ до нескольких кэВ. Неприменимость данной модели приводит к тому, что параметр, на основе которого ведутся расчеты в МФП, а именно, средние потери энергии ионов на единице длины, известен с погрешностью в сотни процентов [3] и кратно различается в задачах на отражение ионов и на прострел ионов через тонкую пленку.

В работе указано на проблему определения дифференциального сечения упругого рассеяния легких ионов в твердых телах. Показано, что, для того чтобы добиться удовлетворительного описания экспериментальных данных, необходимо определяющие параметры дифференциального сечения упругого рассеяния изменить в несколько раз по сравнению с теми, что рекомендованы в литературе.

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2020-0023.

Литература

- [1]. Курнаев В.А., Машкова Е.С., Молчанов В.А. Отражение легких ионов от поверхности твердого тела. Москва: Энергоатомиздат. 1985.
- [2]. Mashkova E.S., Molchanov V.A. Medium energy ion reflection from solids. Amsterdam: North-Holland. 1985.
- [3]. Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U., The stopping and range of ions in solids. Vol. 1. New York: Pergamon Press. 1985.

ПРОНИЦАЕМОСТЬ РЕЛЯТИВИСТСКИ НЕПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНО ИНТЕНСИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Серебряков М.А., Неруш Е.Н., Костюков И.Ю.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.194

Вопросы проницаемости электрон-ионной плазмы для лазерных импульсов исследуются уже несколько десятилетий. Считается, что релятивистски неплотная ($n_e < a_0 n_{cr}$) плазма прозрачна для (релятивистски) интенсивного лазерного излучения ($a_0 > 1$) [1]: в этом случае и закритическая плазма может стать проницаемой вследствие релятивистского увеличения массы электронов плазмы, порождающего так называемый эффект релятивистской самоиндуцированной прозрачности. Здесь n_e и $n_{cr} = m\omega^2/4\pi e^2$ – это плотность электронной плазмы и критическая плотность соответственно, $a_0 = eE_0/mc\omega$ – нормированная амплитуда лазерного поля.

Однако трёхмерное моделирование методом частиц в ячейках с помощью кода QUILL^[2] демонстрирует аномально высокое поглощение лазерного поля, начиная с интенсивности излучения примерно 3×10^{24} Вт см⁻² для длины волны 1 мкм. После этой границы дальнейшее повышение интенсивности лазерного поля не приводит к существенному увеличению глубины проникновения (оцениваемой по потере импульсом 50% энергии) лазерного импульса в плазменную мишень.

При этом моделирование производится с учётом излучения гамма-квантов и последующим образованием электрон-позитронных пар в сильном поле. Эти эффекты приводят к возникновению самоподдерживающегося электромагнитного каскада в лазерном поле. В работе [3] показано, что, несмотря на низкую плотность плазмы, продольное электрическое поле, генерируемое ей, существенно влияет на развитие электромагнитного каскада [4].

В то же время моделирование без учёта рождения электрон-позитронных пар демонстрирует, что плазма остаётся прозрачной для излучения, и глубина проникновения импульса с увеличением интенсивности излучения растёт по закону близкому к линейному.

В предыдущих работах поглощение лазерного поля в образованной в результате лазер-плазменного взаимодействия плазме наблюдалось лишь для сложных конфигураций поля и плотных плазменных мишеней.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00077).

Литература

- [1]. Kattani F., Kim A., Anderson D., and Lisak M., Threshold of induced transparency in the relativistic interaction of an electromagnetic wave with overdense plasmas, *Physical Review E*. 2000. **62**. 1234-1237.
- [2]. QUILL, <https://github.com/QUILL-PIC/Quill>
- [3]. ArXiv pre-print, <https://arxiv.org/abs/2210.01606>
- [4]. Elkina N.V. QED cascades induced by circularly polarized laser fields / A.M. Fedotov, I.Yu. Kostyukov, M.V. Legkov, N.B. Narozhny, E.N. Nerush, and H. Ruhl // *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **14**, 054401

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЧ-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

¹Желтухин В.С., ²Абдуллин И.Ш., ¹Некрасов И.К., ²Сагитова Ф.Р.

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет), г. Казань, Россия, vzheltuk@kpfu.ru

²ООО «Плазма-ВСТ», г. Казань, Россия, plasma.vst@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.195

Рассмотрена молекулярно-динамическая модель модификации поверхности СВМПЭ потоком ионов Ar, генерируемых ВЧ емкостным разрядом в динамическом вакууме. Под динамическим вакуумом понимается средний вакуум с непрерывным продувом газа в диапазоне давлений $p=13.3-133$ Па и расходом газа $G=0.01-0.25$ г/с.

Характеристики плазмы ВЧ-разряда в динамическом вакууме отличаются от свойств разряда без продува газа: степень ионизации $10^{-5}-10^{-4}$, концентрация электронов $n_e=10^{15}-10^{18}$ 1/м³, электронная температура $T_e=1-4$ эВ, температура атомов и ионов $0,03-0,06$ эВ. Образец, помещенный в поток плазмы ВЧЕ-разряда в динамическом вакууме, подвергается воздействию потока ионов с энергией $70-100$ эВ и плотностью ионного тока $0,1-3$ А/м² [1].

Модель взаимодействия ионов с полимерным материалом описывается системой уравнений классической молекулярной механики

$$\frac{dv_k}{dt} = \frac{1}{m_k} \sum_{k \neq l} F_{kl}, \quad \frac{dr_k}{dt} = v_k, \quad F_{kl} = -\text{grad } U_{kl}, \quad (1)$$

$$v_k(0) = 0, \quad r_k(0) = r_{k0}, \quad k, l = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Здесь v_k – вектор скорости k -ой частицы, r_k – ее радиус-вектор, r_{k0} – координаты начального положения частиц, F_{kl} – сила, действующая на k -ую частицу со стороны l -ой частицы, m_k – масса k -й частицы, t – время, U_{kl} – потенциал взаимодействия частиц с индексами k и l , N – количество атомов в модели.

Модель реализована с помощью универсального программного пакета молекулярно-динамического моделирования LAMMPS. Моделировалась ионная бомбардировка кристаллита СВМПЭ размером $9 \times 7.6 \times 75$ Å с энергиями ионов $10, 50$ и 100 эВ. Силовое поле моделировалось с помощью потенциала AIREBO-M.

В результате моделирования установлено, что при энергии иона до 10 эВ значительных изменений в структуре полиэтилена не происходит. При энергиях 50 эВ и 100 эВ атомы аргона проникают внутрь материала на глубину 1.8 и 2.8 нм, соответственно. Вдоль траектории движения атома происходит разрыв молекулярных цепочек, вследствие чего образуются короткие алкеновые радикалы. С поверхности полиэтилена эмиттируются отдельные атомы углерода и водорода, а также короткие молекулы углеводородов.

Результаты экспериментов показали, что активные алкеновые радикалы реагируют с кислородом воздуха при выносе обработанных образцов из вакуумной камеры после ВЧ-плазменной обработки и на поверхности СВМПЭ волокон возникают функциональные карбонильные группы ($-C=O$), вследствие чего поверхность СВМПЭ приобретает гидрофильные свойства [2].

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 Казан. ун-та, 2000.
- [2]. Kudinov V.V. et al. // Inorganic Materials: Applied Research. – 2012. – Т. 3. – №. 3. – С. 257-260.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНЫХ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ТРУБОК НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ПРОБНЫМИ ДЕЙТЕРИЕВЫМИ МИШЕНЯМИ

Исаев А.А., Шиканов А.Е., Козловский К.И., Вовченко Е.Д.

НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия, isaev@lenta.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.196

Прямое измерение нейтронных характеристик разрабатываемых лазерных генераторов нейтронов при их предполагаемых эксплуатационных режимах требует обеспечение соответствующих условий радиационной безопасности. Это, при отсутствии помещений со средствами биологической защиты, создает трудности для исследователей и разработчиков.

Для обеспечения необходимых требований радиационной безопасности генерацию нейтронов предложено осуществлять в импульсном режиме в пробных дейтериевых нейтронообразующих мишенях малого размера (площадь $\Delta S \sim 1 \text{ см}^2$) на реакции $D(d, n)^3\text{He}$, имеющей примерно на два порядка меньшее микросечение по сравнению с реакцией $T(d, n)^4\text{He}$. После чего проводить компьютерный пересчет данных нейтронных измерений на предполагаемый поток ускорительной трубки, излучаемый с реальной тритиевой мишенью в номинальном импульсно-периодическом режиме работы.

Пробная мишень из дейтерированного вещества располагалась на катоде разборной модели ускорительной трубки в точке с радиус-вектором \mathbf{r} . Число бомбардирующих ее дейтронов определяется следующей формулой:

$$\Delta N_d(\mathbf{r}) \approx \Delta N_n(\mathbf{r}) [N_A \frac{\chi_{\text{II}} \rho_{\text{II}} \Delta S}{A_{\text{II}}} \int_0^{eU(t)} dT_d \frac{\sigma_{(d,d)}(T_d)}{F_{\text{II}}(T_d)}]^{-1}, \quad (1)$$

где ΔN_n – измеренное за импульс число нейтронов, излучаемых пробной мишенью; N_A – число Авогадро; $\rho_{\text{II}}, A_{\text{II}}$ – плотность и атомная масса вещества, удерживающего дейтерий в пробной мишени; χ_{II} – среднее число атомов дейтерия, приходящихся на атом сопутствующего вещества (коэффициент стехиометрии пробной мишени); $U(t)$ – зависимость ускоряющего напряжения от времени; $\sigma_{(d,d)}(T_d), F_{\text{II}}(T_d)$ – зависимости микросечения реакции $D(d, n)^3\text{He}$ и потерь энергии дейтроном в пробной мишени на единицу длины от энергии. С использованием этой формулы было получено выражение, прогнозирующее нейтронный поток ускорительной трубки в полный телесный угол:

$$\Phi \approx f \frac{\chi_{\text{M}} \rho_{\text{M}} A_{\text{II}}}{\chi_{\text{II}} \rho_{\text{II}} A_{\text{M}} \Delta S} \int_{S_{\text{M}}} dS \Delta N_n(\mathbf{r}) \int_0^{eU(t)} dT_d \frac{\sigma_{(d,t)}(T_d)}{F_{\text{M}}(T_d)} \left[\int_0^{eU(t)} dT_d \frac{\sigma_{(d,d)}(T_d)}{F_{\text{II}}(T_d)} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{M}}, A_{\text{M}}$ – плотность и атомная масса металла удерживающего тритий в мишени ускорительной трубки; χ_{M} – коэффициент стехиометрии мишени ускорительной трубки по тритию; S_{M} – поверхность мишени ускорительной трубки; f – предполагаемая частота срабатываний ускорительной трубки.

По данной методике осуществлялась успешная интерпретация результатов экспериментов, проводимых в НИЯУ МИФИ с ионными диодами [1-3] и предполагается ее реализация в дальнейшем при разработке и создании ускорительных трубок нового поколения для генерации нейтронов [4]. Приведены примеры реализации методики.

Литература

- [1]. Didenko A.N., Shikanov A.E., Kozlovskii K.I. Shatokhin V.L., Ponomarev D.D. Plasma Physics Reports, 2014, 40(11), pp. 910-918.
- [2]. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I. Atomic Energy, 2016, 119(4), pp. 258-264.
- [3]. Shikanov A.E., Vovchenko E.D., Kozlovskii K.I., Shatokhin V.L. Technical Physics Letters, 2015, 41(5), pp 511-513.
- [4]. Anan'in O.B., Tsybin A.S., Shikanov A.E., Kozlovsky K.I. Atomic Energy, 2013, 115(2), pp. 137-141.

ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГОЗАПАСА В ПОТОКЕ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО ПРИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НА УСТАНОВКЕ ГОЛ-ПЭТ

^{1,2}Аржанников А.В., ^{1,2}Синицкий С.Л., ¹Самцов Д.А., ^{1,2}Сандалов Е.С.,
^{1,2}Калинин П.В., ^{1,2}Попов С.С., ¹Атлуханов М.Г., ^{1,2}Степанов В.Д., ¹Куклин К.Н.,
¹Макаров М.А., ¹Ровенских А.Ф.

¹*Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.197

Генерация мегаваттных потоков терагерцового излучения представляется в настоящее время важной задачей для научных исследований. Экспериментальные исследования этой направленности проводятся на установке ГОЛ-ПЭТ в ИЯФ СО РАН [1]. Генерация излучения осуществляется при релаксации сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) в замагниченной плазме. Основным механизмом генерации основан на возбуждении пучком плазменных колебаний и последующей трансформации этих колебаний в поток электромагнитного излучения в области частоты верхне-гибридных колебаний плазмы [2]. В ходе исследований, проводимых на установке ГОЛ-ПЭТ, уже найдены условия генерации потока излучения, распространяющегося вдоль его оси с последующим выходом из его торца в вакуум и, далее, поворотом излучения отражателем на угол 90° и выводом его через фторопластовое выходное окно в атмосферу [3]. При этом оказалось, что при мощности в потоке масштаба 10 МВт длительность импульса излучения, вышедшего в атмосферу, ограничивалась на уровне 0.5 мкс из-за высокочастотного пробоя с вакуумной стороны выходного окна (см. [3]). Увеличением расстояния от поворотного отражателя до выходного окна и заменой фторопластового окна на окно из полиметилпентена (ТПХ) достигнут подъём длительности импульса излучения в атмосфере до 2 мкс при указанном масштабе мощности [4].

В конфигурации эксперимента с новым выходным окном была проведена серия измерений энергосодержания в потоке излучения с помощью калориметра. Было измерено энергосодержание в потоке на выходе из окна в атмосферу в двух случаях, когда расстояние между поворотным отражателем и выходным окном составило 30 и 180 см. Кроме того, были проведены дополнительные измерения с помощью калориметра, присоединенного непосредственно к вакуумной трубе, по которой поток распространялся до выходного окна. В докладе будет представлено детальное описание проведенных калориметрических измерений энергосодержания в потоке излучения с микросекундной длительностью импульса.

Часть работы, посвящённая измерению характеристик генерируемого излучения, выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-12-00250-П).

Литература

- [1]. Samtsov D.A., Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L. et al. “Generation of a Directed Flux of Megawatt THz Radiation as a Result of Strong REB-Plasma Interaction in a Plasma Column” //IEEE Transactions on Plasma Science. (2021) doi: 10.1109/TPS.2021.3108880.
- [2]. Timofeev I.V., Annenkov V.V., Arzhannikov A.V. Regimes of enhanced electromagnetic emission in beam-plasma interactions //Physics of Plasmas. – 2015. – Т. 22. – №. 11. – С. 113109.
- [3]. Arzhannikov A.V., Sinitsky S.L., Popov S.S. 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. (2022) Т. 50. №. 8.
- [4]. Аржанников А.В., Синицкий С.Л., Самцов Д.А., и др. Энергосодержание и спектральный состав потока субмиллиметрового излучения с длительностью 5 мкс, генерируемого в плазме при релаксации РЭП // Физика плазмы Т. 48 № 10 (2022) doi:10.31857/S0367292122600418.

ПРОЕКТ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО ГЕНЕРАТОРА ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ НА КИЛОАМПЕРНОМ ПУЧКЕ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

¹Аржанников А.В., ¹Логачев П.В., ¹Бак П.А., ¹Синицкий С.Л., ¹Попов С.С.,
¹Калинин П.В., ¹Старостенко Д.А., ¹Никифоров Д.А., ¹Самцов Д.А., ¹Сандалов Е.С.,
¹Атлуханов М.Г., ²Григорьев А.Н., ²Воробьев С.О.

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

²РФЯЦ – ВНИИТФ имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.198

Электромагнитное излучение в области частот 0.15–2.0 ТГц имеет очень широкую область применения. Во-первых, потоки такого излучения позволяют решать ряд инженерно-технических задач, к которым относятся: анализ и изменение структуры материалов и объектов, визуализация объектов, скрытых под укрытиями, подавление рабочего состояния радиоэлектронных устройств с целью обеспечения безопасности и т.д. С другой стороны, потоки ТГц-излучения открывают новые возможности в фундаментальных исследованиях в области физики, химии, биологии и медицины.

Исследования механизмов генерации излучения в диапазоне частот 0.15 – 0.8 ТГц при коллективной релаксации электронного пучка с параметрами 0.6 МэВ / 15 кА / 5 нс в плазме плотностью $(3-5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ проводятся на установке ГОЛ-ПЭТ в соленоиде с многопробочным магнитным полем 4.8/3.6 Тл. В этих исследованиях при плотности тока пучка $(1-2) \text{ кА/см}^2$ достигнуто энергосодержание около 10 Дж в генерируемом импульсе излучения [1]. Для продвижения по частоте до ~ 1 ТГц и выше в системе пучок-плазма плотность тока пучка должна быть увеличена в несколько раз при сохранении его угловой расходимости на низком уровне. Пучок с такими параметрами может быть получен путем сжатия магнитным полем сечения пучка, генерируемого в линейном индукционном ускорителе (ЛИУ) [2]. Возможность преодоления препятствия для генерации излучения, возникающего за счет малой (~ 100 нс) длительности импульса пучка, подтверждается результатами экспериментальных исследований, проведенных на установке ИНАР [3,4].

В данном докладе мы проанализируем перспективы использования электронного пучка, получаемого на выходе ЛИУ, с энергией до 1 МэВ и током до 2 кА для генерации терагерцового излучения в замагниченной плазме. Данный анализ будет основан на результатах экспериментальных исследований, упомянутых ранее, и на теоретических представлениях о механизмах конверсии плазменных колебаний в электромагнитные волны. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №19-12-00250.

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), 2348-2363. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3183629>.
- [2]. D.A. Nikiforov, A.V. Petrenko, S.L. Sinitsky et al., “Investigation of high current electron beam dynamics in linear induction accelerator for creation of a high-power THz radiation source”, Journal of Instrumentation (JINST), vol.16, P11024, 2021.
- [3]. А.В. Аржанников, А.В. Бурдаков, В.С. Койдан и др. «Увеличение эффективности взаимодействия сильноточного релятивистского электронного пучка с плазмой». Письма в ЖЭТФ, 1978, Т. 227, вып.3. С. 173 – 177.
- [4]. A.V. Arzhannikov, A.V. Burdakov, V.S. Burmasov et al. Plasma heating in a solenoid by relativistic electron beam. Proc. of the 3-rd Inter. Conf. on High Power Electron and Ion Beam Res. and Tech., 1979, P. 29 – 42.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ, СОЗДАВАЕМОЙ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ, НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА СРЕД

^{1,2,3}Казаков Е.Д., ¹Орлов М.Ю., ¹Стрижаков М.Г., ⁴Сунчугашев К.А., ^{1,3}Смирнова А.Р.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, Kazakov_ED@nrcki.ru

²НИУ МЭИ, г. Москва, Россия, KazakovYD@mpei.ru

³МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия

⁴РУДН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.199

Исследованием распространения ударных волн в конденсированных средах под действием мощных импульсных нагрузок занимаются уже более 50 лет [1, 2]. Однако в большинстве исследований для создания давления на поверхности образца применяются преимущественно механические ударники или излучение мощных лазеров. В то же время формирование ударной волны посредством воздействия сильноточного электронного пучка имеет свою специфику. Как показали экспериментальные и теоретические исследования последних лет, при подобном воздействии могут наблюдаться эффекты, не описанные ранее [3-5]. Отчасти это может быть обусловлено возможностями современной диагностической аппаратуры, но в ряде случаев это без сомнения связано с особенностью вклада энергии в образец при взаимодействии сильноточного электронного пучка с конденсированной мишенью.

Ранее в работе [3] был предложен метод визуализации распространения ударной волны в прозрачных материалах на основе хронографической регистрации лазерного излучения, проходящего через образец. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования прохождения ударной волны, возникающей при воздействии сильноточного электронного пучка установки Кальмар (ток до 40 кА, энергия электронов до 350 кэВ, длительность импульса на полувысоте 100 нс) с различными наборами многослойных мишеней. Рассмотрены «сэндвичи» из материалов с близкими и существенно различающимися механическими свойствами.

Важным прикладным значением такого исследования является обеспечение возможности исследования затухания ударной волны в пористых композитных материалах и определения в них скорости звука, что весьма затруднительно при применении традиционных методов. Применение же оптимизированной оптической схемы [6] позволяет исследовать связь между особенностями динамики плазмы, вылетающей с поверхности образца с формированием и распространением ударных волн.

Такие исследования чрезвычайно важны для разработки покрытий защитных экранов, минимизирующих последствия техногенных катастроф, а также для специальных приложений.

Литература

- [1]. Кормер С.Б.//Успехи физических наук. 1968.Т.94. Вып. 4. С. 641-687.
- [2]. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: «Янус-К». 1996. – 408 с.
- [3]. Демидов Б.А., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г. и др. //Приборы и техника эксперимента. 2020. № 3. С. 90-95.
- [4]. Гуревич М.И., Казаков Е.Д., Калинин Ю.Г., Курило А.А., Тельковская О.В., Чукбар К.В. // Журнал технической физики. 2021. Т. 91. № 11. С. 1655-1661.
- [5]. Бойков Д.С., Ольховская О.Г., Гасилов В.А. //Математическое моделирование. 2021. Т. 33. № 12. С. 82-102.
- [6]. Казаков Е.Д., Стрижаков М.Г., Орлов М.Ю., Курило А.А., Крутиков Д.И. Патент на изобретение 2770751 С1, 21.04.2022. Заявка № 2021130536 от 20.10.2021.

ВЧ-ПЛАЗМЕННАЯ МОДИФИКАЦИЯ СТЕКЛОВОЛОКНА В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ВАКУУМА

¹Ершов И.П., ²Абдуллин И.Ш., ³Желтухин В.С.

¹ООО ПТО «Медтехника», Казань, Россия

²ООО «Плазма-ВСТ», Казань, Россия,

³Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия, vzheltukhin@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.200

Одним из перспективных направлений практического применения ВЧ плазмы с продувом газа в диапазоне пониженного давления 13.3-133 Па (т.н. «динамический вакуум») является очистка материалов от загрязнений [1, 2].

При производстве стеклоткани на стекловолокно наносятся специальные технические покрытия – замасливатели, обеспечивающие улучшение адгезии поверхности стекловолокна с матрицей в полимерных композиционных материалах и стеклопластиках (прямые замасливатели) и защищающие элементарные волокна и нити от истирания, образования микротрещин и разрушения при переработке (технологические, или текстильные, замасливатели). После получения стеклоткани необходимо удалить с поверхности технологический замасливатель, препятствующий адгезии наполнителя к полимерной матрице.

Использование ВЧ разряда в условиях динамического вакуума относится к сухим и экологически чистым процессам, не требующим использования токсичных химических реагентов, поэтому исследование возможностей применения данного метода для очистки стеклоткани от замасливателя является актуальной задачей.

Для оценки плазменного воздействия на технологический замасливатель выполнено моделирование методом Монте-Карло низкоэнергетичной (70–100 эВ) ионной бомбардировки поверхности стеклоткани. Исходными данными для моделирования явились состав плазмы аргона и молекулярно-массовое распределение компонентов замасливателя.

В результате моделирования установлено, что воздействие плазменной обработки приводит к изменению фракционного состава замасливателя с образованием газообразных и легкокипящих фракций. Удаление газообразной и легкокипящей фракций приводит к изменению молекулярно-массового распределения компонент замасливателя.

Сопоставление результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований показывает, что при плазменной обработке стеклоткани в среде аргона ионная бомбардировка, как фактор физического воздействия плазмы, играет основную роль, химическое воздействие плазмы имеет существенно меньшее значение.

Литература

- [1]. Абдуллин И.Ш. и др. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2000.
- [2]. Азанова А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. – 2018. – Т. 82. – №. 2. – С. 217-220.

КИНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ В ОБЪЕМЕ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ПРИ СИНТЕЗЕ ГРАФЕНА

Филимонова Е.А., Шавелкина М.Б., Амиров Р.Х., Иванов П.П.

Объединенный институт высоких температур РАН, г. Москва, Россия, helpfil@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.201

Одним из распространенных методов получения нанокристаллических порошков является газофазный синтез. В этом случае химические процессы происходят вблизи или на холодной поверхности, что ограничивает производительность метода и делает зависимыми свойства продуктов синтеза от материала подложки. Для повышения качества наноструктур и производительности метода предлагается использовать в качестве среды газоразрядную плазму. Метод основан на разложении углеводородов в плазменных струях, создаваемых плазмотроном постоянного тока, при давлении несколько ниже атмосферного. Чтобы синтезировать конкретную углеродную наноструктуру в данных условиях, необходимо определить ключевые химические реакции, интервал температур для их эффективного протекания, состав промежуточных продуктов конверсии и температурный профиль.

Цель данной работы состояла в нахождении ведущих реакций для разных начальных составов газа; конечного состава смеси; зависимости газофазных продуктов от природы несущего газа и профиля температуры вдоль плазменного потока. Состав конечных и промежуточных (вдоль струи) продуктов, полученных в результате кинетического подхода, сравнивался с результатами, полученными в рамках термодинамического подхода. Рассматривалось три состава: I - CH_4/N_2 , II - $\text{C}_3\text{H}_8/\text{C}_4\text{H}_{10}/\text{He}$ и III - CH_4/Ar при одинаковом давлении $P=350$ Торр. Максимальная температура на срезе сопла изменялась в диапазоне 8000-10000 К, конверсия в струе проходила в течение ~ 1 с, профили температуры были разные (разная скорость охлаждения струи). В экспериментах [1] для указанных выше условий для смеси III на выходе из реактора образуются малодефектные наноструктуры с латеральным размером до 2000 нм, что намного больше, чем при синтезе для других смесей.

В результате кинетических расчетов были выявлены различия в конверсии для трех смесей. Для смеси II концентрация электронов на срезе сопла была почти на порядок меньше, чем для смесей I и III. Это связано с тем, что потенциал ионизации гелия значительно выше, чем для азота и аргона. Ион-молекулярные и электрон-ионные реакции играют роль в течение первых нескольких миллисекунд. Основные химические реакции, которые влияют на появление зародышей из молекул C_2 в результате образования перенасыщенного пара и выпадения твердой фазы, происходят в диапазоне $T=4000-2500$ К с участием радикала C_2H [2]. Конечными продуктами в газовой фазе являются H_2 и C_2H_2 . Для смеси III струя имела резкую скорость охлаждения, и смесь уже к $t=35$ мс имела $T\sim 4000$ К. Диапазон температур 4000-2500 К длился ~ 200 мс. Для смесей I и II длительность указанного диапазона была приблизительно такая же, однако, момент с $T\sim 4000$ К наступал к 380 мс. В результате, для смеси III оставалось значительно больше времени для роста твердых наночастиц, т.к. первые зародыши образовались значительно раньше. Аналогичным образом ведут себя C_2H , C_2 и углеродная твердая фаза (суммарно, включая графен) в термодинамическом расчете, где их рост начинался при $T\sim 3200$ К и прекращался при $T=2500$ К, т.е. когда из объема исчезает C_2H , и соответственно, C_2 , однако при $T=4000-2500$ К для достижения термодинамического равновесия не хватает времени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание № 075-01056-22-00).

Литература

- [1]. Shavelkina M. et al. J. Materials, 2020, v.13, p.1728.
- [2]. Shavelkina M.B., Filimonova E.A., Amirov R.Kh. PSST, 2020, v.29, 025024.

НЕРАВНОВЕСНЫЕ ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ В НАНОДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ: ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ПРИЛОЖЕНИЯ

Змиевская Г.И.

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия
zmig@mail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.202

Стохастическая молекулярная динамика неравновесных плазмохимических столкновений [1] и дисперсных сред [2, 3] согласуется с плазменными кодами. Ранее кинетические коды плазмы [4] были реализованы для пылевой плазмы дивертора термоядерного реактора и исследования баллистического режима электронов полупроводников.

Фазовые переходы (ФП) 1-го рода на начальной неравновесной стадии, когда формируются зародыши ФП (капли плазмы разряда жидкой или кристаллической фазы конденсации на поверхности) называют нуклеацией. При воздействии потоков ионов инертных газов на образец формируются неточечные вакансионно-газовые дефекты (ВГД) в кристаллической решетке, происходит ФП. Размеры зародышей ФП и их распределение в объеме образца определяют решением квазилинейных кинетических уравнений в частных производных Фоккера-Планка с нелинейными коэффициентами (Колмогорова-Феллера, Смолуховского) и уравнений стохастического аналога Ито в смысле Стратоновича устойчивыми численными методами семейства Монте-Карло (схема Розенброка).

Нуклеация ФП представлена суперпозицией двух процессов Броуновского движения (БД): диффузии в фазовом пространстве размеров зародышей (или их кластеризации) и диффузии в декартовых координатах объема модели, т.е. моделью броуновской частицы с переменной массой. Флуктуации размера кластеров зародышей ФП, как капель конденсации в плазме разряда, так и ВГД в твердом теле, зависят от модели энергии Гиббса, как суммы вкладов энергий образования зародыша, что позволяет рассчитывать плотность вероятности распределения кластеров по размерам в точках объема. БД кластеров ВГД (в случае имплантации ионов) инициируется косвенным упругим взаимодействием между ВГД и границами образца. Возникновение ВГД возмущает колебания акустических фононов решетки, частоты которых изменяются при рассеянии на дефектах, что учтено при выводе зависимости потенциала взаимодействия от координат ВГД в объеме и модулей упругости среды [5]. Броуновская диффузия в расчетах ФП в металлах и полупроводниках зависит также от фриделевских осцилляций электронной плотности. В процессе расчета траекторий БД потенциалы взаимодействия ВГД учитываются самосогласованным образом при расчете траекторий стохастической молекулярной динамики.

Вычислительные эксперименты пористости нанодисперсной среды могут быть востребованы в моделях сенсоров и лазерных полупроводниковых плазменных антенн, а также при плазменной обработке поверхностей с пористо - капиллярной структурой. Численная оценка скорости изменения размеров пор и распределения локальных упругих напряжений, создаваемых нанопорами, представляет интерес для управления свойствами пористых полупроводников, для создания матриц диэлектриков с включениями наночастиц металла в интересах плазмоники. Варьируя параметры имплантации ионов (длительность и интенсивность потока, площади и направления воздействия, температуры поверхности), можно в широких пределах управлять дисперсностью сред.

Литература

- [1]. Змиевская Г.И. // Физика плазмы, 1997, Т. 23, №4, С. 368-382.
- [2]. Змиевская Г.И., Бондарева А.Л. // Физика плазмы, 2011, Т.37, № 1, С. 93-102.
- [3]. Змиевская Г.И. // ФТТ, 2020. Т. 62, №1, С. 40-45,
- [4]. 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.
- [5]. Морозов А.И., Сигов А.С. // УФН, 1994, Т. 164, № 3, С. 243–261. }

СРАВНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ С ОПТИМАЛЬНЫМ ПОДАВЛЕНИЕМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И БЕЗ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

²Диас Михайлова Д.Е., ¹Стрелков П.С., ³Карташов И.Н.

¹*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, strelkov@fpl.gpi.ru*

²*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, tomasrulit@mail.ru*

³*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, igorkartashov@mail.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.203

Проведено экспериментальное исследование плазменного релятивистского СВЧ усилителя с полосой усиления около 1.5 ГГц с максимальным значением коэффициента усиления на частоте около 3 ГГц. Широкая полоса усиления этой схемы усилителя ранее позволила продемонстрировать перестройку частоты усилителя от 2.4 ГГц до 3.1 ГГц. На электронном пучке с током 2 кА и энергией электронов 500 кэВ было получено СВЧ излучение мощностью 100-150 МВт и длительностью импульса 300 нс [1]. В данной работе на вход усилителя подавался сигнал с частотой 2.716 ГГц.

Отражение волн от элементов выходной части усилителя приводит к появлению обратной связи и переходу усилителя в режим самовозбуждения в широкой полосе частот 1.5-3.5 ГГц. Последнее обусловлено тем, что формируемый на взрывоэмиссионном катоде ускорителя электронный пучок имеет высокий уровень шума в исследуемом частотном диапазоне.

Подавление обратной связи осуществлялось путем размещения керамических СВЧ-поглотителей внутри электродинамической системы усилителя. Использовались поглотители, описанные в работе [2]. Оптимальный коэффициент ослабления поглощающего элемента был выявлен методом подбора и составил порядка 20 дБ.

В докладе излагаются результаты экспериментов по исследованию параметров усилителя без подавления обратной связи (без поглотителя) и с оптимальным подавлением обратной связи (с поглотителем).

Установка поглотителя приводит к увеличению максимального значения энергии усиленного сигнала W_{f_0} , повышению его стабильности в заданном диапазоне значений плотности плазмы и к резкому уменьшению энергии шумов W_1 . В диапазоне значений плотности плазмы $5 < n < 8.5$ отн.ед. доля шумов W_1 / W_{f_0} не превышает 11%.

Добавление поглотителя в схему плазменного усилителя приводит к стабилизации частоты излучения, причём в диапазоне значений плотности плазмы $6 < n < 10$, где наблюдается максимальная энергия усиленного СВЧ импульса, частота излучения плазменного СВЧ усилителя равна частоте магнетрона 2.716 ГГц с учётом точности её измерения $\pm 1,9$ МГц.

Литература

- [1]. Strelkov P.S. Experimental relativistic plasma microwave electronics // Physics Uspekhi 62 (5), 2019, P. 465-486. DOI: 10.3367/UFNr.2018.09.038443.
- [2]. Стрелков П.С., Тараканов В.П., Диас Михайлова Д.Е., Иванов И.Е., Шумейко Д.В., Физика плазмы, 2019, т.45, №4, с. 345-354. DOI: 10.1134/S1063780X19030097.

СПЕКТРАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ РАЗРЯДОВ, ИНИЦИИРУЕМЫХ В ПОРОШКОВЫХ СМЕСЯХ ИМПУЛЬСАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО ГИРОТРОНА

Летунов А.А., Князев А.В., Логвиненко В.П., Воронова Е.В., Харлачев Д.Е.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, let@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.204

В докладе приведены результаты оптических измерений в экспериментах по синтезу микро и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда. Разряды инициировались импульсами излучения мощного гиротрона в тонких слоях порошковых смесей со свободной верхней поверхностью. Использовалось излучение гиротрона с длиной волны 4 мм, длительностью от 1 до 8-и мс при мощности 100 – 500 кВт. В некоторых экспериментах применялась дополнительная ультрафиолетовая инициация от размещаемой выше порошка проволочной мишени, что позволило получать устойчивый пробой смесей как с малым количеством металла, так иногда и чисто диэлектрических. Одновременно использовалось до 7-и спектральных приборов с различным разрешением. Регистрировались спектры при сборе света с нижней и верхней поверхностей порошкового слоя и на некоторой высоте вдоль слоя с высотой оси светосбора над подложкой ~2,5 см.

В результате применения как спектральных приборов высокого разрешения (M833, производства СОЛАР ЛС и модифицированный ВМС-1), так и обзорных спектрометров AvaSpec с более высоким чем ранее спектральным разрешением были получены более детальные характеристики плазмы разрядов исследуемого типа. В частности, были обнаружены линии иона титана. Кроме того, в разрядах со смесью порошков, содержащей 10% Pt были обнаружены ранее маскировавшиеся линиями примесей, непрерывным фоном и шумами линии платины.

Расширение состава порошковых смесей и модифицирование режимов разряда позволило обнаружить условия, в которых регистрировалась высокая интенсивность излучения линии H α бальмеровской серии водорода. В результате была надежно оценена локальная электронная плотность. Она составляет единицы на 10^{20} м⁻³. Характерная величина электронной температуры, измеряемая по линиям атомов титана и алюминия [1], как и ранее была ~0,5 эВ. Характерная величина дебаевского радиуса вычисляемая по этим результатам ~30 мкм, лишь несколько больше среднего размера частиц порошковых смесей.

Полученные результаты позволяют лучше понять физику разрядов исследуемого типа и необходимы для успешного моделирования происходящих в них процессов.

Работа выполнена в рамках госзадания ГЗ БВ10–2022 «Изучение инновационного синтеза микро- и наночастиц с контролируемым составом и структурой на основе микроволнового разряда в гиротронном излучении».

Литература

- [1]. Knyazev A.V., Letunov A.A., Voronova E.V., Logvinenko V.P., in XLIX International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Zvenigorod, 2022, Book of Abstracts, p. 202, DOI: 10.34854/ICSPAF.2022.49.1.162

КОНТРОЛЬ ГЕНЕРАЦИИ ЦИТОКИНА TNF- α ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АКТИВИРОВАННОГО ПЛАЗМОЙ РАСТВОРА ХЕНКСА ДЛЯ ПРОТИВООПУХОЛЕВОЙ ТЕРАПИИ

^{1,2}Гудкова В.В., ^{1,2}Разволяева Д.А., ¹Кончечков Е.М., ^{1,2}Борзосекон В.Д., ^{1,3}Павлик Т.И.

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, gudkova-vi@fpl.gpi.ru

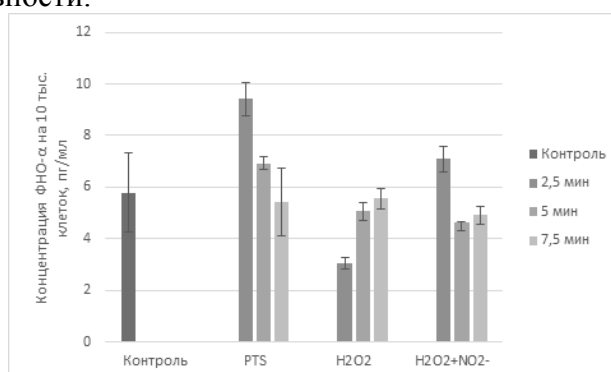
²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия, borzosekov-vd@rudn.ru

³РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, г. Москва, Россия, ti.pavlik.u@gmail.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.205

В настоящее время широкомасштабно развиваются исследования, посвященные применению холодной плазмы атмосферного давления при лечении онкологических заболеваний. Повышенный интерес к использованию неравновесных разрядов при атмосферном давлении вызван их уникальной плазмохимией [1]. В данной работе исследуется влияние раствора Хенкса, обработанного холодной плазмой прямого пьезоразряда [2], на продукцию фактора некроза опухоли мононуклеарными лейкоцитами человека. Под действием прямого пьезоразряда в растворе образуются активные формы кислорода и азота, которые влияют на окислительно-восстановительные процессы в опухолевых клетках, разрушая их. Ранее [3] были установлены сильные буферные свойства раствора Хенкса: данный раствор сохраняет нейтральное значение кислотности среды ($\text{pH } 7,6 \pm 0,5$) при исследуемых временах обработки (2,5, 5, 7,5 мин). Также фотокалориметрическими методами были выявлены зависимости концентраций пероксида водорода и нитрит-ионов от времени обработки.

В исследовании проводится сравнение действия на генерацию ФНО- α раствора Хенкса, обработанного холодной плазмой (PTS), с действием химических растворов H_2O_2 и NO_2^- . Пероксид водорода во всех исследуемых концентрациях снижал продукцию ФНО- α , в добавлении с нитрит-ионами не изменял продукцию ФНО- α по сравнению с контролем. Раствор Хенкса, обработанный холодной плазмой в течение 2,5 мин, повышал продукцию ФНО- α , а при большем времени обработки продукция ФНО- α не отличалась от контроля. Можно предположить, что при обработке раствора Хенкса в определённых режимах (2,5 мин) в нём создаётся уникальный набор АФК, стимулирующий клетки иммунной системы к противоопухолевой активности.



Литература

- [1]. Peter J Bruggeman et al. Foundations of atmospheric pressure non-equilibrium plasmas // Plasma Sources Science and Technology. – 2017. 26 123002.
- [2]. Kolik L.V. et al. Study of characteristics of the cold atmospheric plasma source based on a piezo transformer. Russian Physics Journal, Vol. 62, No. 11, March, 2020.
- [3]. Гудкова В.В., Павлик Т.И., Разволяева Д.А. «Прямой пьезоразряд как источник H_2O_2 и NO_2^- в водных растворах». Труды конф. «Радиоинфоком – 2022». Москва, 2022, с. 278-282.

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ AR-HG МИКРОВОЛНОВЫХ ЛАМП НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Давыдов А.М., Артемьев К.В., Бережецкая Н.К.

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

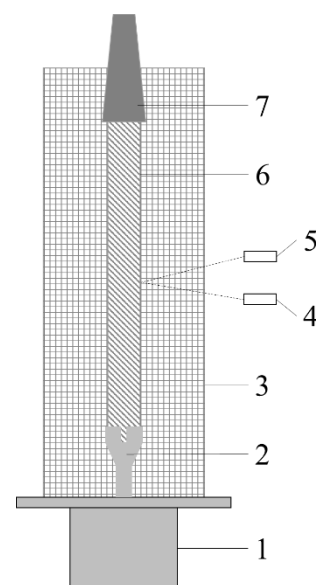
DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.206

В работе представлены результаты измерений излучательных характеристик микроволновых безэлектродных аргон-ртутных ламп низкого давления $10^{-2} \dots 2$ Торр. Схема эксперимента представлена на рисунке. Экспериментальная установка: 1 – магнетрон мощностью 650...1500 Вт (в импульсе); 2 – внутренний электрод цангового типа; 3 – металлическая сетка (1×1 см); 4 – ФЭУ-142, ФЭУ-106; 5 – Спектрометр AvaSpec-S2000; 6 – ртутно-аргоновая лампа; 7 – СВЧ поглотитель. Для измерения абсолютного значения интенсивности УФ-излучения (254 нм) использовалась методика актинометрии на основе фероксолата калия. При данном способе возбуждения разряд представлял из себя систему контрагированных каналов, распространяющуюся вдоль поверхности кварцевой трубки внутри нее. Были исследованы динамические излучательные характеристики разряда и их зависимость от давления аргона.

Характеристики исследовались в двух режимах – холодный и горячий. Холодный – режим одиночных импульсов, при котором температура лампы составляла ~ 20 °С, а давление насыщенных паров ртути $P_{рт} = 1,22 \cdot 10^{-2}$ Торр. Горячий – импульсно-периодический режим со средней мощностью ~ 70 Вт, при котором температура лампы достигала ~ 100 °С и $P_{рт} = 0,271$ Торр.

В холодном режиме интенсивность УФ-излучения была обратно пропорционально давлению аргона в лампе. В горячем режиме интенсивность УФ-излучения незначительно возрастала с увеличением давлением аргона в лампе.

Было показано, что КПД лампы в обоих режимах возрастал с понижением мощности магнетрона с 1500 Вт до 650 Вт. При этом вид разряда не менялся.



ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ ПРЯМЫМ ПЬЕЗО-РАЗРЯДОМ И ЕЕ ДИАГНОСТИКА ПО ПОГЛОЩЕНИЮ В УФ ДИАПАЗОНЕ

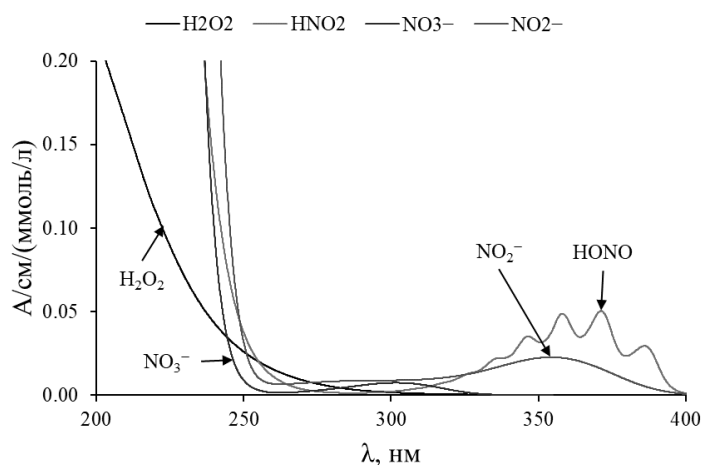
Артемьев К.В., Давыдов А.М., Малахов Д.В.

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.207

Исследовалась наработка долгоживущих кислород- и азотсодержащих реактивных частиц в дистиллированной воде, обработанной низкотемпературной плазмой прямого (без диэлектрического барьера) пьезо-разряда [1]. К долгоживущим реактивным частицам относятся нитрат- и нитрит-ионы (NO_3^- , NO_2^-), пероксид водорода (H_2O_2), а также азотистая кислота (HONO). Применение плазменно обработанной воды широко исследуется в биомедицинских приложениях, сельском хозяйстве и пищевой промышленности [2].

Метод диагностики реактивных частиц, представленный в работе, основан на поглощении ими фотонов в диапазоне 200...400 нм [3]. Диапазоны поглощения этих частиц пересекаются между собой, но спектры поглощения качественно отличаются друг от друга (см. рисунок). Это позволяет разложить общий спектр поглощения на составляющие – спектры поглощения каждой из частиц. Данный метод диагностики является неинвазивным и позволяет



одновременно определять концентрации реактивных частиц.

Прямой пьезо-разряд генерировался в воздухе при атмосферном давлении над поверхностью воды. Обработка воды объемом 10 мл проводилась в прямоугольной кювете (2×5 см) со стенками из кварца КУ. Пучок диагностического УФ-излучения проходил через кювету вдоль ее большей стороны. Время обработки воды составляло 8 минут. За это время в ней нарабатывалось 240 мкмоль/л NO_3^- , 200 мкмоль/л NO_2^- , 140 мкмоль/л HONO и 350...450 мкмоль/л H_2O_2 . Нарботка пероксида водорода зависела от влажности воздуха.

В работе получены данные о временной динамике концентраций частиц NO_3^- , NO_2^- , H_2O_2 и HONO как во время обработки разрядом, так и в течение 3 дней после нее.

Литература

- [1]. E.M. Konchekov, A.P. Glinushkin, V.P. Kalinitchenko, K.V. Artem'ev, D.E. Burmistrov, V.A. Kozlov and L.V. Kolik. Properties and use of water activated by plasma of piezoelectric direct discharge // *Front. Phys.*, January 2021, Volume 8, Article 616385.
- [2]. Renwu Zhou et al. Plasma-activated water: generation, origin of reactive species and biological applications *J. Phys. D: Appl. Phys.* 53 303001. 2020.
- [3]. K. Tachibana and T. Nakamura. Examination of UV-absorption spectroscopy for analysis of O_3 , NO_2^- , and HONO compositions and kinetics in plasma-activated water // *Japanese Journal of Applied Physics* 59, 056004 (2020).

ИНИЦИАЦИЯ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА С ПОВЕРХНОСТИ КВАРЦЕВОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СВЧ-ИМПУЛЬСА ГИРОТРОНА (75 ГГц, 400 кВт, 8 мс)

Заклецкий З.А., Малахов Д.В., Гусейн-заде Н.Г., Воронова Е.В., Бадьянова Л.В., Степахин В.Д.

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,
fiveziggen@gmail.com*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.208

Проблемы, связанные с порогами образования плазмы при облучении сложных металлодиэлектрических мишеней микроволнами как в глубоком вакууме, так и в различных газах, привлекают исследователей довольно давно [1].

В данной работе представлено исследование инициации и развития микроволнового разряда, возникающего при прохождении миллисекундного СВЧ-импульса гиротрона на поверхности кварцевой подложки, с внедренными в нее микрочастицами металла. Приведены результаты микроволновых измерений поглощения СВЧ-излучения в этом процессе, оценки скорости движения фронта разряда вдоль поверхности пластины, зависимость температуры подложки от длительности СВЧ-импульса. Также приведены результаты спектрального анализа – вращательные и колебательные температуры молекул.

Визуализация инициации и развития микроволнового разряда, возникающего при прохождении миллисекундного СВЧ-импульса гиротрона проводится при помощи высокоскоростной камеры Phantom VEO (скорость 7 400 кадров в секунду при разрешении 1280 x 800). В верхней части рисунка 1 представлен вид поверхностного разряда поддерживаемый СВЧ-импульсом гиротрона длительностью 8 мс, на нижней части представлен первый кадр, полученный после окончания СВЧ-импульса.

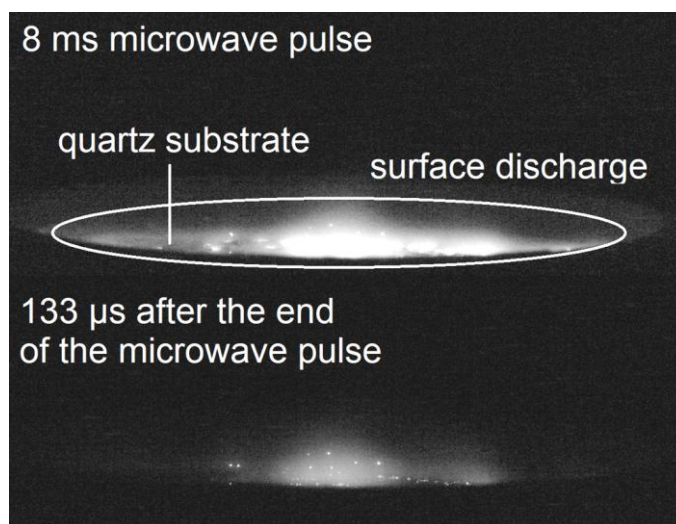


Рис.1 - Характерный вид сбоку на поверхность кварцевой подложки с которой развивается разряд

Литература

[1]. G.M. Batanov et al. 1996 J. Phys. D: Appl. Phys. 29 1641

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ШУМОВОЙ ГЕНЕРАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ МИКРОВОЛНОВЫХ ИСТОЧНИКОВ

Иванов И.Е.

Институт общей физики имени А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия, iei@fpl.gpi.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.209

Полоса усиления и полоса возможной генерации в плазменных релятивистских микроволновых источниках (ПРМИ) составляет 1,5 – 2 ГГц. Излучение записывается в цифровой форме на скоростном осциллографе Tektronix в режиме реального времени с шагом дискретизации $s = 16$ пс. Полоса регистрации до 4 ГГц. Для оценки корреляционных свойств таких сигналов можно применить методы корреляционного анализа, используя стандартные формулы для автокорреляционной функции и коэффициентов корреляции. Интегрирование проводится на конечном интервале времени, от которого могут зависеть результаты вычислений. Анализируется одна осциллограмма и вычисляются коэффициенты корреляции двух последовательных участков осциллограммы с одинаковой длительностью $\tau = s \times n_\tau$, где n_τ – количество точек осциллограммы на интервале интегрирования τ . Результат состоит из коэффициентов корреляции, которые возводятся в квадрат и усредняются. В результате получается положительное число, соответствующее данной выборке τ для всей осциллограммы. Изменяя длительность выборки, мы получаем график мощности корреляции от τ для всей осциллограммы.

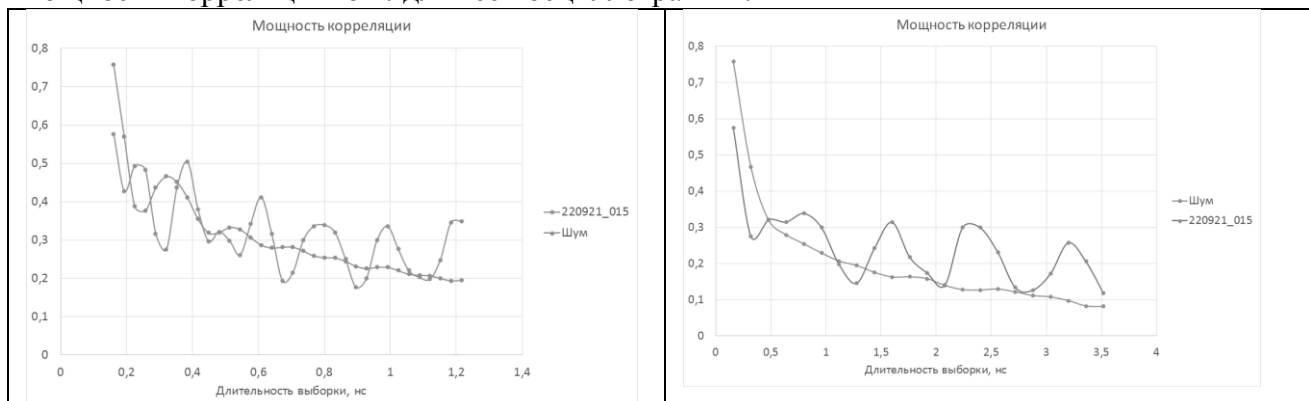


Рис.1

Рис. 2

На рисунке 1 приведены графики мощности корреляции для длительностей выборки в диапазоне 10 – 76 точек (0,16 – 1,216 нс) для двух осциллограмм – шумовой (Шум) и для осциллограммы, содержащей участки узкополосной генерации (файл 220921_015). Для шумовой генерации интерференционные эффекты затухают в районе 0,6 – 0,7 нс. Можно сказать, что время корреляции для осциллограммы Шум равно $\sim 0,6$ нс. Для другого файла эти эффекты продолжают и можно сказать лишь, что время корреляции существенно больше 1 нс.

Следует отметить, что интерференционные эффекты существенным образом зависят от шага, с которым меняется длительности выборок. На рисунке 1 приращение выборки равно двум точкам осциллограммы (0,032 нс). На рисунке 2 те же осциллограммы обработаны с шагом приращения 10 точек (0,160 нс) и в более широком диапазоне 10 – 220 точек (0,16 – 3,52 нс). Из последнего рисунка очевидно, что время корреляции для файла 220921_015 существенно превышает 3,5 нс, а для шумовой генерации время корреляции определить нельзя.

Выбирая различные временные интервалы, можно исследовать корреляционные особенности различных участков осциллограммы.

АКТИВАЦИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ С ПОМОЩЬЮ МНОГОИСКРОВОГО КОЛЬЦЕВОГО РАЗРЯДА С ИНЖЕКЦИЕЙ ГАЗА В РАЗРЯДНЫХ ПРОМЕЖУТКАХ

^{1,2}Разволяева Д.А., ^{1,2}Гудкова В.В., ¹Кончевков Е.М., ¹Моряков И.В., ¹Анпилов А.М.,
¹Бережецкая Н.К., ^{1,2} Борзосекон В.Д.

¹ИОФ РАН, г. Москва, Россия, darzylv@fpl.gpi.ru

²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.210

В последние годы все больший интерес вызывает применение жидкостей, обработанных с помощью плазменных технологий, в сельскохозяйственной промышленности. Активные вещества, генерируемые плазмой, приводят к изменению и активации физических и химических свойств, биохимических и молекулярных процессов в растениях. Это способствует прорастанию и обеззараживанию семян, росту растений, борьбе с насекомыми, сохранению качества сельскохозяйственной продукции и восстановлению почвы, что в совокупности может привести к увеличению производства продуктов питания [1].

В работе исследуется зависимость влияния подаваемого газа (воздух, Ar) на образование активных форм кислорода и азота в водных растворах с помощью многоискрового кольцевого разряда с инъекцией газа в разрядных промежутках. Разрядная система представляет собой электроды из нержавеющей стали, расположенные по кольцу с одинаковым промежутком 1,5 мм. В каждом разрядном промежутке формируется микроплазменный разряд [2]. Параметры источника питания: $U \leq 20$ кВ, $I \leq 300$ А, $f \leq 50$ Гц, $W \leq 1,6$ Дж, $\mathcal{V}_{\text{потока}} = 3 \frac{\text{л}}{\text{мин}}$.

Концентрация пероксида водорода (H_2O_2) и нитрит-ионов (NO_2^-) при инъекции воздуха и аргона в воде Milli-Q представлена на рисунке. Полученные зависимости наработки активных форм кислорода и азота от длительности обработки позволят провести в будущих исследованиях оптимизацию воздействия активированной жидкости на растения и посадочный материал.

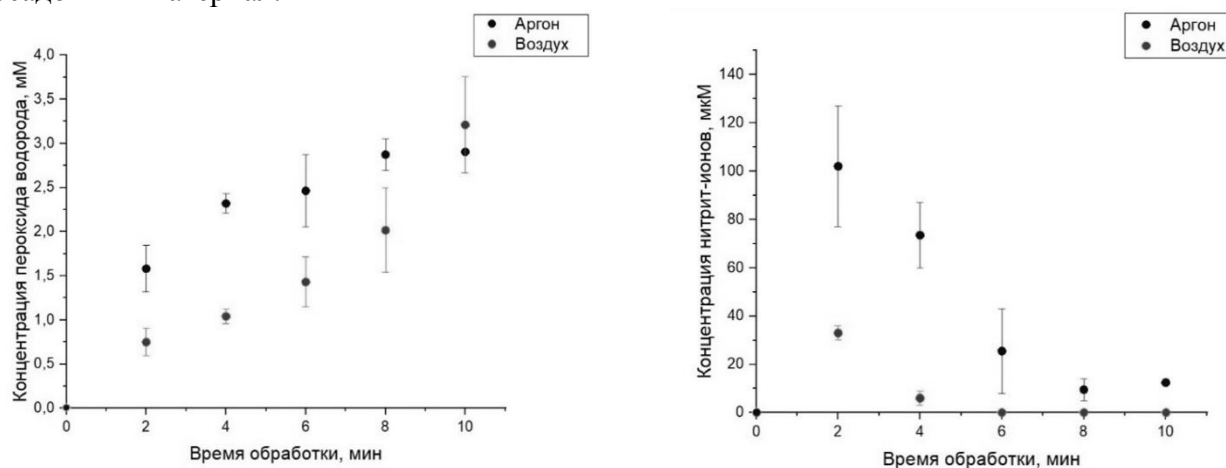


Рисунок. Концентрация пероксида водорода и нитрит-ионов в деионизованной воде Milli-Q в зависимости от длительности воздействия многоискровым кольцевым разрядом с протоком атмосферного воздуха или аргона.

Литература

- [1]. Dingmeng G., Hongxia L., Lei Z., Jinzhuo X., Chi H., J. Sci. Food Agric. 2021 Sep; 101(12):4891-4899. doi: 10.1002/jsfa.11258
- [2]. Anpilov A.M., Barkhudarov E.M. et al., 2001. J. Phys. D: Appl. Phys. 34, 993-999.

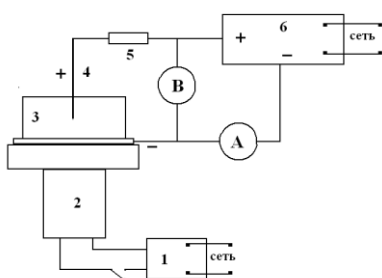
ВОЗДЕЙСТВИЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ПОВЕРХНОСТЬ ЗЕРНА ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ, ЗАРАЖЕННОГО ГРИБАМИ

Бычков В.Л., Ваулин Д.Н., Горячкин П.А., Черников В.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
e-mail: bychvl@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.211

Интерес к воздействию плазмы коронного разряда в воздухе на поверхность различных биологических объектов представляет практический характер. Для борьбы с грибными болезнями пшеницы обычно применяется протравливание семян химическими препаратами. В настоящее время интенсивно развиваются новые технологии, связанные с применением низкотемпературной плазмы атмосферного давления. Это создает возможность использования такой плазмы для обработки термочувствительных материалов, включая биологические ткани, семена растений и сами растения. В данной работе исследуется воздействие коронных разрядов на зараженность семян мягкой озимой пшеницы сорта «Шеф» грибными болезнями. На рис. 1 представлена принципиальная схема. Она состоит из кюветы, заполненной изучаемым веществом, и электрической цепи. Верхний электрод или набор электродов диаметром 0,9 мм (с радиусом кончика 0,2 мм) или 2 мм (с радиусом кончика 0,4 мм) располагался на высоте 8 мм над поверхностью исследуемого вещества. Расстояние между электродами в верхней многоэлектродной композиции (4) составляло 11 мм. Электроды находились под положительным или отрицательным напряжением. Кювета (3) была диэлектрической (с металлическим электродом на её дне) или металлической, цилиндрической, диаметром 90 мм (рис. 1.), высотой 18 мм. Для более равномерной обработки вещества в кювете (3) использовался



электрический двигатель (2). Время воздействия в экспериментах по обработке семян озимой пшеницы составляло до 2-3 ч.

Проведены исследования воздействия положительного и отрицательного коронного разряда на семена пшеницы мягкой озимой, зараженные твердой головней, альтернариозом и гельминтоспориозом. Результаты показали, что обработка семян положительной короной оказывала более сильное обеззараживающее воздействие в сравнении с отрицательной короной. При этом оптимальным временем воздействия (по всхожести) для отрицательной короны являлся диапазон 60-90 минут. Положительная корона привела к депрессии всхожести семян пшеницы до 5-7%, снизив её уровень ниже требований стандарта. При выявленном подавлении альтернариоза и гельминтоспориоза плазмой отсутствует необходимость в применении химических протравителей семян. В наименьшей степени воздействие коронных разрядов оказывало влияние на зараженность семян твердой головней.

Полученные в исследовании данные свидетельствуют, что существует необходимость в продолжении исследований в этом направлении с целью определения оптимальной продолжительности воздействия на зараженное зерно и соответствующих мощностей разряда.

ОБРАЗОВАНИЕ ПЛАЗМОИДОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА НА МЕТАЛЛЫ

Бычков В.Л., Байдак В.А., Ваулин Д.Н., Сороковых Д.Е., Черников В.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
e-mail: bychvl@gmail.com

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.212

Интерес к воздействию плазмы капиллярного разряда в воздухе на поверхность различных металлических и диэлектрических материалов представляет практический характер. Он связан с изучением создания новых потребительских свойств у поверхностей и частиц образованных на этих поверхностях под действием плазмы капиллярного разряда.

Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

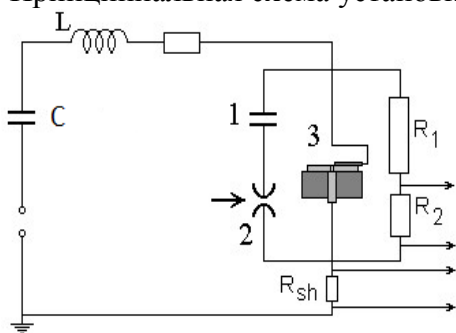


Рис. 1. Схема капиллярного плазмотрона. 1 – инициирующая емкость, 2 – коммутатор, 3 – капилляр, R_1 , R_2 – сопротивления делителя напряжения, R_{sh} – сопротивление шунта для определения тока разряда, C – батарея конденсаторов.

Обычно капиллярный плазмотрон в наших экспериментах обладал следующими характеристиками: длительность импульса 7 -14 мс, энергия в импульсе изменялась в диапазоне 300-1500 Дж, напряжение на разрядном промежутке 300 В, значения тока в импульсе 50-100 А. Диаметр канала плазмотрона от 1,5-2 мм. Длина струи составляла 11.0-14.0 см. Температура плазмоида может составлять 6000-7000 К.

При воздействии плазмоида капиллярно разряда на образцы из припоя кроме капель припоя появлялись долгоживущие светящиеся образования размером до 1.5 см и характерным временем жизни большее 6-7 с. Они взрывались и оставляли следы взрыва на бумаге. Этот эффект открывает новый способ создания присадок для топлив, которые образуются во время работы плазмотрона.

При воздействии плазмы разряда на образцы графита на его поверхности образовывались структуры типа графена и нано трубок. Данные эксперименты, которые носят предварительный характер, показывают, что создание нанокомпонентов может происходить в условиях плазмы капиллярного разряда в воздухе.

САМОСОГЛАСОВАННАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПОЛЕТЫ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА СВЕРХНИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ

²Бондаренко Д.А., ¹Бычков В.Л., ¹Вавилин К.В., ¹Двинин С.А., ¹Кралькина Е.А.,
¹Задириев И.И., ²Маринин С.Ю., ¹Никонов А.М.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия,
s_dvinin@mail.ru,

²АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.213

В последние годы актуальной стала организация полетов космических аппаратов (КА) на сверхнизких околоземных орбитах (СНОО) (180 – 300 км), открывающих широкие перспективы для развития телекоммуникаций, транспортных операций, а также широкого круга научных исследований. Основная проблема полетов на СНОО состоит в высоком сопротивлении остаточной атмосферы, приводящим к быстрой потере высоты КА. Выходом из положения является оснащение КА электроракетными двигателями (ЭРД), способными компенсировать потери скорости. Однако расчеты показывают, что запасы топлива, необходимые для долговременной работы КА на высотах 180 – 200 км, неоправданно велики. В связи с этим в мире интенсивно ведутся работы по изучению возможности использования потока остаточных атмосферных газов в качестве рабочего процесса ЭРД.

Электрическая двигательная установка, использующая в качестве рабочего тела газы, составляющие остаточную атмосферу Земли, состоит из устройства забора атмосферных газов (УЗАГ) и электрического двигателя, способного создавать тягу T , компенсирующую аэродинамическую силу трения D . Последнее математически может быть выражено следующим образом [1]:

$$T = m_{\infty} (\eta_c u_e - u_{\infty, e}) > D$$

где η_c – отношение потока нейтральных частиц, достигших газоразрядной камеры ЭРД, к потоку частиц, поступающих в УЗАГ через его фронтальное сечение, u_e – эффективная скорость истечения нейтральной и ионной компоненты из ЭРД, $u_{\infty, e} \cong u_{\infty}$ – эффективная скорость нейтральных частиц, поступающих в УЗАГ, m_{∞} – массовый расход газа, поступающего в УЗАГ.

Отметим, что величины фронтального сечения УЗАГ, его конструкция и длина определяют поток и скорость нейтральных частиц, поступающих на вход ЭРД. В свою очередь, энергетическая эффективность режимов работы ЭРД существенно зависит от потока рабочего газа. В связи с этим в настоящей работе представлены первые результаты по разработке модели УЗАГ-ЭРД, позволяющей согласовать входное сечение УЗАГ, его длину с параметрами ЭРД, призванного компенсировать потери на преодоление сопротивления остаточной атмосферы. Для проведения расчетов использована глобальная модель индуктивного ВЧ двигателя [2], а также значения коэффициента трения на сверхнизких высотах, полученные в работе [3].

Литература

- [1]. Filatyev A.S., Yanova O.V. The Control Optimization of Low-Orbit Spacecraft with Electric Ramjet. Acta Astronautica, V. 158, May 2019, p. 23-31, Elsevier Ltd. doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.10.039.
- [2]. Kralkina E.A., Vavilin K.V., Zadiriev I.I., Nekliudova P.A., Shvydkiy G.V. Optimization of discharge parameters in an inductive RF ion thruster prototype. Vacuum, V.167, p.136-144 – 2019.
- [3]. Romano F. RF Helicon Plasma Thruster for an Atmosphere-Breathing Electric Propulsion System (ABEP). PhD thesis, 2021.

ГЛОБАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С БОЛЬШОЙ ПЛОЩАДЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ

¹Двинин С.А., ²Кодирзода З.А., ³Синкевич О.А., ²Солихов Д.К.

¹МГУ имени М.В.Ломоносова, Россия, Москва, e-mail: dvinin@phys.msu.ru

²ТНУ, Физический Факультет, Таджикистан, Душанбе, e-mail: davlat56@mai.ru

³НИИ МЭИ, Москва, Россия, e-mail: oleg.sinkevich@itf.mpei.ac.ru

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.214

Высокочастотные емкостные (ВЧЕ) разряды низкого давления широко используются для сухого травления тонких пленок и плазменного химического осаждения [1–3]. Электродинамическая модель симметричного разряда была построена в [2]. Эксперименты [3] и численные расчеты [4], показали, что несимметрия может быть обусловлена как несимметричным возбуждением, так и спонтанным формированием осевой или азимутальной неоднородности разряда.

Спонтанное нарушение симметрии разряда при низких давлениях может быть связано с возможностью поддержания различными модами поля, в частности, изменением соотношения амплитуд четной и нечетной поверхностных волн. Геометрия установки, для которой строилась модель, изображена на рис. 1. Предполагалось, что ВЧ мощность подводится к двум электродам 1 и 2, помещенным в вакуумную камеру 5. Между плазмой 3 и электродами, а также стенкой камеры существуют слои пространственного заряда 4. Предполагалось, что их толщина пропорциональна амплитуде колебаний границы плазмы.

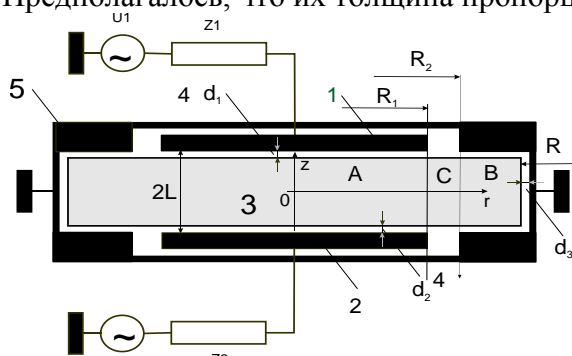


Схема установки: 1, 2 – верхний электрод и подложкодержатель, 3 – плазма, 4 – слои пространственного заряда, 5 – вакуумная камера

дополнительно неравенство толщин слоев пространственного заряда и несимметрию полей четной и нечетной поверхностных волн.

Расчеты в рамках глобальной модели сопровождались расчетом пространственной структуры электромагнитного поля и импеданса разряда с помощью программы Comsol Multiphysics® и показали удовлетворительное согласие.

Литература

- [1]. Adamovich I., Baalrud S. D., Bogaerts A. et all. J. Phys. D: Appl. Phys. 2017, V.50, 323001.
- [2]. Двинин С.А., Синкевич О.А., Кодирзода З.А., Солихов Д.К. Физика плазмы. 2020. Т. 46. №12, с. 1094; 2021. Т. 47, с. 40; с. 195.
- [3]. Двинин С.А., Постников С.А., Солнцев Г.С., Цветкова Л.И. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. С. 1297.
- [4]. Kawamura E., Lieberman M.A., and Lichtenberg A.J. Phys. Plasmas, 2018. V. 25. 093517; <https://doi.org/10.1063/1.5048947> 25, 093517
- [5]. Двинин С.А., Довженко В.А., Солнцев Г.С. Физика плазмы. 1982. Т. 8. С. 1228.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ЭЦР РАЗРЯДА В РЕЗОНАТОРЕ

¹Двинин С.А., ^{2,3}Корнеева М.А.

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, s_dvinin@mail.ru

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия, korneevama@mail.ru,

³ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.215

Разряды на электронном циклотронном резонансе применяются в современной физике для создания источников многозарядных ионов, ионов водорода для ускорителей протонов, маневровых двигателей космических аппаратов, плазмохимических установок для обработки материалов [1]. Работа представляет собой продолжение исследований [2], в которых рассмотрены характеристики разряда в магнитной ловушке, помещенной в цилиндрический резонатор. Осевое магнитное поле магнитной ловушки растет в осевом и убывает в радиальном направлении. Резонатор возбуждается прямоугольным волноводом (мода H_{10}), через узкую щель в боковой стенке. Широкая стенка волновода параллельна оси OZ . Циклотронная частота Ω_{c0} в центре разряда может быть меньше, равна или больше частоты поля. Плазма возбуждается в цилиндрической кварцевой колбе, занимающей большую часть резонатора. В работе исследовано изменение структуры электромагнитного поля при изменении плотности электронов n_e в плазме при отношении частоты столкновений электронов ν к частоте поля ω $\nu/\omega=0.1$. Пространственное распределение электромагнитного поля и импеданс разряда рассчитывались с помощью пакета Comsol Multiphysics®.

Анализ пространственного распределения при $\omega=\Omega_{c0}$ показал следующие наиболее характерные структуры поля:

1. При очень низких плотностях возмущение поля резонатора плазмой мало и пространственное распределение соответствует полю моды, для которой частота поля наиболее близка к резонансной. В этой области поглощение возбуждающей плазму волны в резонаторе пропорционально плотности электронов.

2. При дальнейшем увеличении n_e поле в плазме может быть представлено в виде бегущих волн, распространяющихся от области возбуждения резонатора волноводом в область резонанса, где $\omega\sim\Omega_c$, в которой и происходит основное поглощение.

3. В тех случаях, когда плотность плазмы на границе колбы оказывается достаточно высока, чтобы возбуждаемые волны начали отражаться от границы плазмы, формируется электромагнитная волна, распространяющаяся вдоль боковой границы колбы в азимутальном направлении. Проникновение поля в резонансную область уменьшается.

4. Дальнейшее увеличение плотности электронов приводит к уменьшению поглощения распространяющейся в азимутальном направлении волны и формированию азимутальной периодической структуры.

В работе предложены аналитические аппроксимации для электромагнитного поля в рассматриваемых случаях.

Литература

[1]. Wu W., Zhang A., Peng S. et al. Vacuum. 2020, V. 182. 109744. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109744>

[2]. Двинин С.А., Корнеева М.А. Труды XLIX Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. ICSPAF-2022. Звенигород, 18–22 марта 2022, с 186.

УСТАНОВКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ИМПУЛЬСНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Панин С.Е., Кутуков А.К., Байбаков Г.С., Сергеечев А.А.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.216

Одним из методов модифицирования металлических материалов является их обработка концентрированными потоками энергии (КПЭ). В качестве КПЭ используется лазерное излучение, сильноточные электронные пучки, импульсные потоки высокотемпературной плазмы. При такой обработке изменение состава, микроструктуры и свойств материала происходит в тонком поверхностном слое до нескольких десятков мкм. Изменения свойств материалов при использовании методов КПЭ обусловлены теплофизическими (быстрый нагрев и быстрое остывание), металлургическими (легирование) и ударно-волновыми процессами (деформация) [1].

В АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» в течение нескольких десятков лет проводятся исследования влияния обработки импульсными плазменными потоками (ИПП) различных промышленных инструментов (свёрл, подшипников и др.) на их ресурс, износостойкость, коррозионную стойкость. Результаты показывают перспективность данного метода. В частности, для некоторых свёрл было достигнуто увеличение износостойкости в 15 раз после обработки ИПП. В АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» была разработана установка для обработки изделий сложной геометрической формы импульсными плазменными потоками «КСПУ-Б».

Установка для обработки изделий сложной геометрической формы импульсными плазменными потоками включает в себя рабочую камеру, состоящую из двух секций, разделённых между собой шиберным затвором. На торце одной из секций (секция ускорителя) размещаются электроды квазистационарного плазменного ускорителя [2]. На торце второй секции располагается система для крепления и позиционирования изделий.

Энергопитание квазистационарного плазменного ускорителя на установке КСПУ-Б осуществляется от конденсаторной батареи. Батарея разделена на отдельные секции. Каждая секция подключается к ускорителю через управляемый вакуумный разрядник. Запуск управляемого вакуумного разрядника осуществляется с помощью блока поджига.

Вакуумная система установки КСПУ-Б включает в себя систему предварительной форвакуумной откачки и систему высоковакуумной откачки. Система форвакуумной откачки состоит из двух сухих спиральных насосов и позволят получить давление в рабочей камере порядка 10^{-1} мм.рт.ст. Система высоковакуумной откачки представлена турбомолекулярным насосом и откачивающим его форвакуумным насосом. С помощью системы высоковакуумной откачки в рабочей камере достигается давление порядка 10^{-4} мм.рт.ст.

Управление установкой КСПУ-Б осуществляется программно-аппаратным способом. Была разработана специальная программа управления, в которой оператор имеет возможность задавать необходимое давление рабочего газа, напряжение на секции конденсаторной батареи, время коммутации секции с электродами плазменного ускорителя.

Работа выполнена в рамках КП РТТН Государственный контракт № Н.4ф.241.09.22.1120 от «25» августа 2022 г. «Создание технологии комплексного воздействия мощными импульсными потоками высокотемпературной плазмы и лазерного излучения. Этап 2022 года».

Литература

- [1]. Грибков В.А. и др. М.: Круглый год, 2001, 528 с.
- [2]. Kutukov A.K. et. al. Phys. At. Nucl., 2022, vol. 95, No. 10, pp 1-6.

**ДОКЛАДЫ СЕКЦИИ
«ПРОЕКТ ИТЭР: ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО»**

**SECTION
«ITER PROJECT:
A STEP TO THE FUTURE OF POWER ENGINEERING»**

ПРОЧНОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СБОРКИ ДИВЕРТОРА С ПОЛНОСТЬЮ ВОЛЬФРАМОВОЙ ОБЛИЦОВКОЙ ДЛЯ РЕАКТОРА-ТОКАМАКА ИТЭР

Лабусов А.Н., Маханьков А.Н., Миронов И.А., Панов В.С.

АО «НИИЭФА», г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: labusov@sintez.niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.217

В соответствии с обязательствами в рамках проектирования и строительства реактора-токамака ИТЭР Российская Федерация отвечает, в том числе, за поставку центральных сборок дивертора. Выполненные в 2008-2010 гг. расчетно-конструкторские работы по проектированию дивертора подтвердили его прочность и ресурс для так называемой водородной фазы работы установки. Однако принятые организацией ИТЭР в 2012 г. новые планы работы токамака потребовали подтверждения работоспособности как дивертора целиком, так и его центральной сборки в частности, для фазы работы установки с выделением нейтронов. В связи с новыми требованиями к плазме облицовка дивертора с 2012 г. стала полностью вольфрамовой. Выполненные в 2012-2014 гг. прочностные расчеты центральной сборки выявили несоответствие базовой конструкции 2010 г. критериям прочности внутрикамерных компонентов ИТЭР. В течение 2015-2021 гг. АО «НИИЭФА» были проведены расчетно-конструкторские работы с целью разработки конструкции центральной сборки дивертора, удовлетворяющие условиям работы с выделением нейтронов. Как результат выполненных работ, в декабре 2021 г. изготовленный полномасштабный прототип центральной сборки дивертора был успешно отправлен из АО «НИИЭФА» и принят в организации ИТЭР.

Для центральной сборки дивертора реактора-токамака ИТЭР можно выделить следующие аспекты, влияющие на ее работоспособность при эксплуатационных нагрузках:

1. прочность опор;
2. прочность силовой несущей конструкции;
3. прочность теплозащитных элементов;
4. прочность соединения защитных плиток.

В результате работы было выявлено, что прочность и ресурс опор в первую очередь зависит от механических нагрузок, вызванных электромагнитными силами при срывах тока плазмы.

Прочность и ресурс силовой несущей конструкции центральной сборки дивертора определяется как механическими нагрузками, вызванными электромагнитными силами при срывах тока плазмы, так и тепловыми нагрузками, в первую очередь тепловыделением в материалах конструкции при нейтронном облучении.

Прочность и ресурс силовой конструкции и трубок охлаждения теплозащитных элементов центральной сборки дивертора определяется механическими нагрузками, вызванными электромагнитными силами при срывах тока плазмы.

Прочность и ресурс облицовки (защитных плиток) теплозащитных элементов центральной сборки дивертора определяется тепловыми нагрузками, действующими на обращенные к плазме поверхности.

В результате работы разработана конструкция прототипа центральной сборки дивертора, в целом удовлетворяющая эксплуатационным требованиям для так называемой первой загрузки дивертора в реактор-токамак ИТЭР.

6-ТИ КАНАЛЬНЫЙ ИМИТАТОР СИГНАЛОВ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ДМНП ИТЭР

Джурик А.С., Воробьев В.А., Николаев А.И., Кашук Ю.А., Кормилицын Т.М.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, a.dzhurik@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.218

Диагностика Диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП) входит в состав комплекса нейтронных диагностик ИТЭР и предназначена для измерения полного нейтронного потока и термоядерной мощности токамака-реактора. Диагностика состоит из трех одинаковых подсистем. В каждой подсистеме ДМНП измерение нейтронного потока производится с помощью детекторного модуля, который состоит из 2-х ионизационных камер деления (ИКД) в трехсекционном исполнении.

Сигналы каждой ИКД обрабатываются отдельным измерительным каналом. Во всех измерительных каналах реализовано по три измерительных тракта (алгоритма) – счетный, флуктуационный и токовый. В одной подсистеме рассчитывается 18 значений скоростей счета и значение нейтронного потока. Такая сложная измерительная система необходима для удовлетворения требований ИТЭР по диапазону измерений, погрешностям и надежности.

В докладе представлены текущие результаты разработки 6-ти канального имитатора сигналов детекторного модуля ДМНП. Имитатор представляет собой аппаратно-программный комплекс, позволяющий генерировать сигналы, подобные сигналам ИКД. Имитатор предназначен для проведения комплексной наладки оборудования ДМНП и приемочных испытаний на площадке ИТЭР. Особенностью имитатора является возможность синхронной или раздельной работы каналов.

Имитатор реализован в виде трёх одинаковых устройств на базе персонального компьютера (ПК) в специальной комплектации. В каждом ПК установлена двухканальная плата генератора сигналов произвольной формы.

Управление имитатором осуществляется специальным ПО, которое обеспечивает:

- настройку плат генераторов сигналов произвольной формы;
- расчет последовательности импульсов в соответствии с заданной тестовой динамикой полного нейтронного потока и термоядерной мощности;
- формирование загрузочных (тестовых) файлов с сигналами, имитирующими динамику полного нейтронного выхода;
- генерацию (разовую или циклическую) сигналов на выходах имитатора.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.22.1123 от 14 февраля 2022 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году».

Литература

- [1]. В.А. Воробьев, С.Ю. Обудовский, Ю.А. Кашук. Методика определения времени сбора заряда и среднего заряда импульса ионизационной камеры деления. Измерительная техника №2, 2019
- [2]. Zs. Elter, C. Jammes, I. Pázsit, L. Pál, P. Filliatre, «Performance investigation of the pulse and Campbell modes of a fission chamber using a Poisson pulse train simulation code», Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 774 (2015) 60–67

РАЗБОРНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР

Колесник М.С., Пискарев П.Ю., Васильев В.А., Герваш А.А., Киселев Д.А.

АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия, kolesnik@sintez.niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.219

В рамках работ по проекту ИТЭР за последние годы по теме “компоненты, обращённые к плазме (КОП)”, к которым относятся дивертор и первая стенка, было решено много инженерных вызовов. Помимо основных нетривиальных задач по разработке конструкции и технологий изготовления КОП, решено множество сложных сопутствующих задач по обеспечению необходимых условий для проведения контроля и испытаний КОП. К таким разработкам относится разборное соединение панелей первой стенки (ППС).

Разборное соединение ППС представляет собой высоковакуумное герметичное (на основе специальных уплотнений) соединение выходных патрубков каналов охлаждения ППС и труб системы подачи гелия под давлением стенда для вакуумных испытаний. В классическом подходе данное соединение выполняется сваркой патрубков и труб между собой с дальнейшей отрезкой и очисткой ППС после проведения вакуумных испытаний. Разборное соединение несёт ряд преимуществ: отсутствие деформаций под действием сварочных напряжений, меньше риск повреждения элементов КОП (нет сварки и последующей мех обработки), отсутствие дополнительного источника загрязнения (мех обработка после испытаний). При этом главная сложность заключается в необходимости обеспечения высокой надежности разборного соединения во время всего цикла испытаний. Стоит отметить, что использование разъёмного соединения в ИТЭР предполагается только на стадии финальных испытаний готовых изделий и не связана с эксплуатацией данного вида соединения непосредственно в работе реактора ИТЭР.

В АО «НИИЭФА» разработана и обоснована расчетными методами конструкция разборного соединения ППС с двухконтурным уплотнением и дифференциальной откачкой. В качестве уплотнений выбраны цельнометаллические подпружиненные кольца, представляющие собой оболочку из упругого металла с мягким пластичным покрытием и витой пружины, установленной внутри оболочки и позволяющей сохранять упругие деформации в зоне уплотнения. В 2021 году изготовлены макеты прототипа разборного соединения ППС и начаты испытания для апробации технических решений и подходов, среди которых предварительные и окончательные вакуумные испытания на герметичность, исследование деформации элементов макета после испытаний, а также исследование микротвердости (поверхностное упрочнение) и загрязнения (перенос мягкого уплотняющего металла) сопрягающихся поверхностей. Данные испытания должны подтвердить работоспособность данного технического решения, а также определить границы его применения. Однако так как сварка будет использоваться на последующих стадиях монтажа и замены ППС внутри реактора ИТЭР, для анализа возможных проблем свариваемости патрубков ППС после использования разборного соединения была проведена серия исследований на свариваемость образцов.

В настоящий момент выполнена половина запланированного объёма испытаний, итоговые результаты и окончательное заключение о работоспособности данного подхода, а также о внедрении его в реальные испытания ППС ИТЭР будут получены к концу 2023 года.

МНОГОСЛОЙНЫЕ ОБРАЩЕННЫЕ К ПЛАЗМЕ КОМПОНЕНТЫ ИТЭР: ОТ МАЛЫХ МАКЕТОВ ДО ПОЛНОМАСШТАБНЫХ ПРОТОТИПОВ ЦСД И ППС

Пискарев П.Ю., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Герваш А.А., Маханьков А.Н.,
Кузнецов В.Е., Гурьева Т.М., Окунев А.А.

АО «НИИЭФА», г. Санкт-Петербург, Россия, email: piskarev@sintez.niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.220

Соглашение о поставке, подписанное между международной организацией (МО) ИТЭР и домашним агентством РФ ИТЭР, подразумевает изготовление высоконагруженных панелей первой стенки (ППС) и центральных сборок дивертора (ЦСД). ППС и ЦСД, совместно именуемые компонентами, обращенными к плазме (КОП), которые являются одними из самых энергонапряженных систем реактора. Для верификации разработанных конструкций и технологий изготовления КОП на пути к старту производства «серийных» компонентов для ИТЭР принят поэтапный процесс в виде: разработки и расчетного обоснования конструкции; опытного изготовления и проведения экспериментов с использованием малых макетов; изготовления и приемочных испытаний квалификационного прототипа. Завершается данный процесс получением разрешения на изготовление «серийных» компонентов ИТЭР.

Подход «design by experiment», заключающийся в отработке конструкторско-технологических решений на малых макетах реальной конструкции КОП, позволил подобрать оптимальные параметры и определить границы их использования для тех элементов конструкции, обоснование которых расчетным путем затруднено или недостаточно достоверно. В основном данный подход использовали для определения оптимального и допустимого размера плиток, из которых состоит защитная облицовка КОП, а также определения ресурса использования защитной облицовки с учетом выбранной технологии и достижимого уровня сплошности соединения, при длительной термоциклической нагрузке и ее максимальных проектных значениях.

Также на малых макетах отработаны методики неразрушающего контроля сварных соединений многослойной металлической композиции КОП, включающие методики ультразвукового, радиационного, капиллярного и визуального контроля. Отработаны методики сдаточных заводских испытаний: гидравлических и вакуумных с контролем герметичности, термоциклических. Проведена квалификация критических технологий изготовления многослойной композиции КОП, а именно: технологий пайки бериллиевой и вольфрамовой облицовки; технологий получения герметичного биметаллического соединения CuCrZr-IG/316L(N)-IG (сварка взрывом и диффузионная сварка горячим изостатическим прессованием). Проведена отработка собираемости, ремонтно- и контролепригодности разработанной конструкции КОП, определена достижимая точность параметров изделия с учетом полного цикла изготовления и накопленных деформаций.

Завершением перечисленных работ в АО «НИИЭФА» стало успешное изготовление и прохождение приемочных испытаний прототипа ЦСД, направленного впоследствии в МО ИТЭР для выполнения работ по интеграции компонентов дивертора в единую кассету. Также в настоящий момент на завершающей стадии находятся работы по прототипу ППС.

В рамках проекта ИТЭР на пути к старту производства «серийных» ЦСД и ППС АО «НИИЭФА» получены уникальный опыт и компетенции в области разработки конструкции КОП, созданы и освоены уникальные технологии изготовления, методики контроля и испытаний, созданы производственная и экспериментальная стендовые базы, налажена кооперация с ключевыми участниками производственного процесса. Перечисленные наработки и достижения являются надёжной базой для старта будущих национальных проектов в области разработки и создания КОП для установок управляемого термоядерного синтеза.

ИННОВАЦИИ И ДОСТИЖЕНИЯ ГИБРИДНОГО КОММУТАЦИОННОГО АППАРАТА СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОЙ КОММУТАЦИИ ТОКА ИТЭР

Алексеев Д.И., Карпишин М.В., Манзук М.В., Рошаль А.Г., Семенов А.И.,
Соленый А.А.

АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
dmitry.alekseev@sintez.niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.221

Международный экспериментальный термоядерный реактор ИТЭР – уникальная электрофизическая установка, способная воспроизводить в земных условиях управляемую термоядерную реакцию, протекающую в недрах звёзд.

Очень длительный (порядка 20 минут) режим горения плазменного разряда в сочетании с огромной энергоемкостью сверхпроводниковых катушек токамака ИТЭР требует, с одной стороны, большой мощности источника питания для быстрого подъема тока в начальной части импульса, а с другой стороны, источник питания должен быть рассчитан на длительное поддержание тока во время плоской части импульса, что практически недостижимо в традиционных источниках питания.

Данное обстоятельство предопределило использование самих сверхпроводниковых катушек в качестве индуктивного накопителя с целью создания условий, необходимых для омического нагрева и пробоя плазменного шнура. В этом случае перед началом рабочего импульса в катушку заводится ток обратного направления по отношению к току во время плоской части импульса, а затем в контур тока вводится активное сопротивление – в процессе выделения на нём энергии, запасенной в магнитном поле катушки, создается вихревое электрическое поле, необходимое для инициирования тока в плазме.

Как следствие, появилась необходимость создания сложного коммутационного оборудования для выполнения оперативных переключений в цепях постоянного тока, величина которых достигает 45 килоампер. Коммутация постоянных токов такой величины в цепях с большой индуктивностью представляет собой сложную инженерную и научно-техническую задачу, решить которую с использованием стандартных промышленных образцов электротехнического оборудования не представляется возможным.

Функция прерывания постоянного тока при инициировании плазменного разряда возложена на многоступенчатые гибридные коммутационные аппараты, входящие в состав системы оперативной коммутации тока, электрическая схема которой показана на рисунке 1.

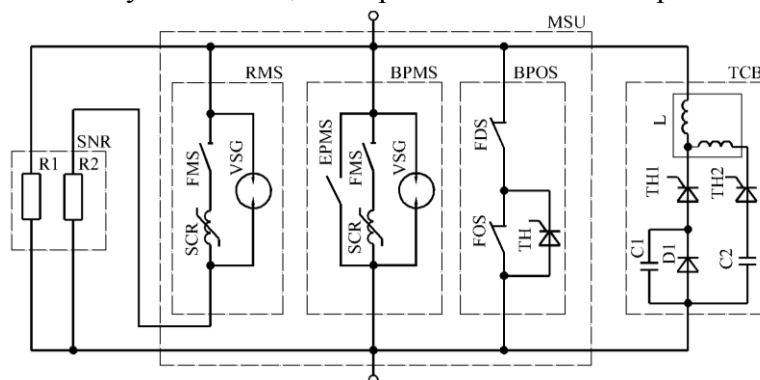


Рисунок 1.

Основой гибридного размыкателя являются аппараты с пневмодинамическим приводом, которые рассчитаны на длительное протекание больших постоянных токов и обеспечивают бездуговую коммутацию тока в цепь энергопоглощающего резистора с помощью двухступенчатой системы противотока.

Система оперативной коммутации тока была разработана и испытана в АО «НИИЭФА» в рамках выполнения работ по соглашению о поставках 4.1.P3.RF.01.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДРАЙВЕРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭКРАНАМИ ФАРАДЕЯ ДЛЯ МНОГОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ 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.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия
e-mail: d.gavrisenko@g.nsu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.222

Инжекция атомарных пучков является одним из основных способов нагрева плазмы в термоядерных установках. 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 для нагрева, основанный на ускорении и нейтрализации пучка отрицательных ионов водорода [1]. Для получения пучка используется высокочастотный поверхностно-плазменный источник. Индукционный ВЧ разряд поддерживается внутри цилиндрического объема ВЧ драйвера при подаче ВЧ напряжения на внешнюю трехвитковую антенну [2]. Для предотвращения перегрева и эрозии керамической стенки драйвера внутрь вставлен защитный цилиндрический фарадеевский экран с продольными щелями. Установка экрана уменьшает эффективность передачи ВЧ мощности в разряд. Целью данной работы является анализ и сравнение ВЧ драйверов с различными защитными экранами и ВЧ антеннами в многосекундных импульсах.

Эксперимент проводился на испытательном стенде, представляющий собой вакуумный объем с установленным на нем ВЧ драйвером. Стенд оборудован сеточным зондом на вакуумном подвижном вводе. Система охлаждения стенда имеет измерители потока и температуры воды. Для измерения температуры поверхностей элементов ВЧ драйвера использовался тепловизор.

В экспериментах анализировались три разных защитных экрана. Получена зависимость плотности ионного тока на выходе драйвера от вкладываемой мощности для разных экранов и разных конфигураций антенны. Измерена мощность, отводимая водяным охлаждением от защитного экрана, в импульсах длительностью 30 секунд. Выполнены измерения температуры экрана и драйвера.

В результате проведенных экспериментов испытаны защитные экраны с разными конструкциями. Проведен анализ распределения тепловых нагрузок на элементы ВЧ драйвера. Определены ограничения по длительности работы ВЧ драйвера при использовании различных защитных экранов.

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FWGM-2022-0019).

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, Volume 61, Number 11, 116017 (2021)
- [2]. I. Shikhovtsev, G. Abdrashitov, Yu. Belchenko, V. Belov, V. Davydenko, A. Gorbovsky, A. Ivanov, V. Kapitonov, A. Kondakov, V. Mishagin, A. Sanin, O. Sotnikov, E. Shubin, Inductive RF Drivers for Neutral Beam Injectors at BINP, AIP. Conf. Proc., 2052, 040016 (2018)

ОБЗОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОВ БЫСТРОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ ДЛЯ КАТУШЕК ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ/ЦЕНТРАЛЬНОГО СОЛЕНОИДА ИТЭР

Громов А.Б., Серебров Р.А., Фридман Б.Э., Макарова А.Д.

АО "НИИЭФА", г. Санкт-Петербург, Россия, email: gromov@sintez.niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.223

Аппараты быстрого вывода энергии (Fast Discharge Unit - FDU) предназначены для защиты сверхпроводящих катушек полоидального поля и центрального соленоида (poloidal field/ central solenoid - PF/CS) ИТЭР путем вывода энергии, запасенной в магнитной системе, в случае потери катушками состояния сверхпроводимости или других аномальных событий, которые могут потенциально привести к повреждению катушек или силового оборудования. Это обеспечивается путем размыкания токовой цепи системы питания катушек и последующим выводом тока в разрядные резисторы.

Аппараты быстрого вывода энергии входят в состав системы питания (coil power supply system - CPSS) сверхпроводящих катушек ИТЭР. Двенадцать FDU защищают шесть катушек CS (CS1U, CS1L, CS2U, CS2L, CS3U, CS3L) и шесть катушек PF (PF1 - PF6). Каждый аппарат FDU состоит из блока коммутации тока (current commutation unit - CCU) и разрядного резистора для рассеивания энергии (Fast Discharge Resistors, FDR).

Система управления и диагностики является неотъемлемой частью PF/CS FDU и предназначена для управления компонентами, входящими в состав FDU, при выполнении функции защиты сверхпроводящих катушек ИТЭР.

Система управления PF/CS FDU состоит из двух частей: Conventional и Interlock. Система Conventional необходима для передачи данных и управления, в то время как система Interlock предназначена для защиты оборудования CPSS. Шкафы управления (Local Control Cubicles - LCC) включают в себя аппаратуру управления, являющуюся частью систем Conventional и Interlock.

Последняя часть FDU - диагностическое оборудование, которое предоставляет информацию для функции защиты FDU и позволяет снизить частоту возникновения неполадок. Аппаратные средства диагностики обеспечивают мониторинг силового и высоковольтного оборудования и передают информацию о функционировании FDU контроллерам внутри системы[1].

В данной статье описаны функции, архитектура и дизайн системы управления PF/CS FDU.

Литература

[1]. Gromov A.B. et al., 2020 J. Phys.: Conf. Ser. **1507** 072023.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ БЕРИЛЛИЕВОЙ ОБЛИЦОВКИ НА ЭЛЕМЕНТЫ ПАНЕЛИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ РЕАКТОРА ИТЭР

Бобров С.В., Герваш А.А., Глазунов Д.А., Мамбеткеримов Д.С., Огурский А.Ю., Пискарёв П.Ю., Рузанов В.В.

АО «НИИЭФА», г. Санкт-Петербург, Россия, email: glazunov@niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.224

Панель первой стенки (ППС) реактора ИТЭР представляет собой многослойную конструкцию с каналами водяного охлаждения и является одной из самых энергонапряжённых систем реактора. ППС состоит из массивного основания из нержавеющей стали, на которое крепятся обращенные к плазме элементы (ОПЭ), соединённые в спарки и облицованные бериллиевыми плитками.

При изготовлении ОПЭ используются такие технологии как прецизионная механическая обработка, диффузионная сварка при помощи горячего изостатического прессования (ГИП) стали 316L(N)-IG и бронзы CuCrZr, лазерная и орбитальная сварка, неразрушающий контроль сварных швов – визуальный, капиллярный, радиографический, пайка бериллиевой облицовки с последующим ультразвуковым контролем качества паяного слоя. Готовые ОПЭ проходят термоциклические испытания, имитирующие тепловое воздействие плазмы – 1000 циклов нагружения на мощности $4,7 \text{ МВт/м}^2$ длительностью 30 секунд каждый, выполняются статические гидравлические испытания – выдержка при давлении 7,15 МПа в течение 30 минут, гидравлические испытания потоком жидкости с целью определения заблокированных каналов, вакуумные испытания с контролем герметичности при внутреннем давлении гелия до 4 МПа; допустимая скорость утечки гелия не должна превышать $1 \cdot 10^{-10} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ при комнатной температуре и $5 \cdot 10^{-10} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ при 250°C .

Одной из самых технологически сложных операций при изготовлении ОПЭ является быстрая пайка бериллиевой облицовки на бронзовый теплоотводящий слой при помощи медного низкотемпературного аморфного ленточного припоя, разработанного специально для этих целей в ООО «МИФИ-АМЕТО». Пайка осуществляется в вакуумной камере при помощи индукционного нагрева медным водоохлаждаемым индуктором.

В период с 2021 по 2022 год выполнена пайка бериллиевой облицовки на 50 ОПЭ, 40 из которых в дальнейшем будут использованы для изготовления полномасштабного прототипа ППС с целью прохождения квалификационных испытаний в рамках подготовки к серийному производству ППС. В настоящий момент работы по изготовлению прототипа ППС находятся в завершающей стадии. В процессе выполнения работы раскрыты и обсуждены ключевые вопросы процесса пайки, представлен план дальнейших работ с использованием данной технологии.

ПРОЦЕДУРА КОНТРОЛЯ СКОРОСТИ ПОТОКА ВОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ В ПОЛНОМАСШТАБНОМ ПРОТОТИПЕ ПАНЕЛИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ОТСУТСТВИЯ ЗАБЛОКИРОВАННЫХ КАНАЛОВ

Мамбеткеримов Д.С., Пискарев П.Ю., Герваш А.А., Глазунов Д.А., Окунева Е.В.,
Васильев В.А.

*АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
email: mambetkerimov@sintez.niiefa.spb.su.*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.225

Конструкция панели первой стенки (ППС) ИТЭР включает в себя большое количество параллельных каналов охлаждения, блокировка которых в процессе изготовления может привести к перегреву и дальнейшему выходу из строя соответствующего элемента. В технической спецификации соглашения о поставке, подписанного между международной организацией (МО) ИТЭР и домашним агентством РФ ИТЭР, для контроля состояния параллельных каналов ПП ППС был предложен метод тестирования изделия горячей водой с одновременным отслеживанием теплового отклика на поверхности с помощью чувствительного тепловизора. Для реализации метода требуется термостабилизированное помещение. В АО «НИИЭФА» был предложен альтернативный, менее трудоемкий и менее затратный метод, заключающийся в определении неравномерности распределения потока воды по отдельным ответвлениям каналов охлаждения панели - для каждой пары пальцев. Особенность этого метода в том, что контроль осуществляется без внесения изменений в потоки теплоносителя в каналах охлаждения на ограниченном участке трубопровода - для этого используется ультразвуковой расходомер.

Операция контроля осуществляется с помощью ультразвукового расходомера модели Fluxus F601. Этот расходомер позволяет проводить измерения на гладких трубах с внутренним диаметром 6 мм и более на испытательном участке длиной 26 мм (прямой участок, без поворотов и сварных швов). В существующей конструкции ППС нет участков труб, пригодных для измерения. В связи с этим предлагается использовать для измерений прямой участок пальца. Сечение канала охлаждения пальца представляет собой сложную форму с неравномерным распределением расходов, что невозможно учесть в стандартных настройках программного обеспечения расходомера. Кроме того, поперечное и продольное сечения канала охлаждения реального изделия всегда будут отличаться с некоторым разбросом от номинальных значений из-за деформаций, возникших после сварки основания пальца. Таким образом, для корректировки показаний ультразвукового расходомера необходимо использовать комплексный поправочный коэффициент. Программа и методика испытаний включает испытания спарок пальцев до и после их установки на основание ППС. До установки на панель показания расхода, полученные ультразвуковым расходомером, калибруются для каждой спарки по показаниям кориолисова расходомера. После установки спарок на основание панели используется полученный ранее комплексный поправочный коэффициент.

Для предварительных испытаний были созданы макеты, повторяющие геометрию канала в пальцах ППС с различной высотой канала. При испытаниях на данных макетах подтвердилась возможность использования ультразвукового расходомера для нецилиндрического сечения при помощи введения поправочного коэффициента.

В ходе проведенных работ была подтверждена пригодность предложенного АО «НИИЭФА» метода контроля скорости потока воды ультразвуковым расходомером. Соответствующая процедура разработана в АО «НИИЭФА», утверждена МО ИТЭР и одобрена для дальнейшего использования в «серийных» ППС.

КОРРОЗИЯ СОЕДИНЕНИЙ МАЛОАКТИВИРУЕМОЙ СТАЛИ С ВОЛЬФРАМОВОЙ ОБЛИЦОВКОЙ В СРЕДЕ ЖИДКОГО ЛИТИЯ

Попов Н.С., Бачурина Д.М., Богданов Р.И., Сучков А.Н.

НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия, NSPopov@mephi.ru

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.226

Рост мощности исследовательских установок управляемого термоядерного синтеза, а также проекты таких термоядерных реакторов как ИТЭР и ДЕМО, предъявляют повышенные требования к обращённым к плазме материалам (ОПМ). Существующее водяное охлаждение не способно отводить потоки тепла, достигающие 20 МВт/м² на наиболее нагруженном узле – диверторе, поэтому перспективным является использование жидких металлов в качестве теплоносителя [1-3]. Дивертор состоит из вольфрамовой мишени, соединённой со стальной основой. В настоящий момент разработан метод пайки вольфрама со сталью, заключающийся в применении проставки из тантала и припоя 48Ti-48Zr-4Be мас.% (TiZr4Be).

Литий обладает высокой теплопроводностью и теплоёмкостью, помимо этого литий используется в концепте жидкометаллической стенки как ОПМ. Однако этот металл ограниченно совместим с материалами ТЯР из-за высокой скорости коррозии, особенно с медью и бронзой, которые используются в трубах охлаждения [4]. Коррозия большинства материалов в жидком литии уже была изучена ранее, однако, коррозионная стойкость паяных соединений остаётся неисследованной.

В работе исследована коррозионная стойкость паяных соединений W/ЭК-181, полученных высокотемпературной пайкой TiZr4Be; пайка осуществлялась через Ta проставку, компенсирующую разность КТР вольфрама и стали. Коррозионные испытания проводили ампульным методом в расплаве Li при 600 °С в течение 100 часов. Полученные результаты показывают наличие продуктов коррозии – фазы состава 80,9Fe-12,2O-4,6Ti-1,6Cr-0.4Zr-0,3Ta ат.%, на поверхности шва. Признаков растворения паяного шва обнаружено не было. На поверхности стали были обнаружены карбиды хрома.

Для подробного изучения продуктов коррозии использована просвечивающая электронная микроскопия. Анализ микроструктуры соединения показал, что в стали происходило локальное растворение хромсодержащих фаз, а между продуктами коррозии и швом находится оксидная пленка. Продукты коррозии осаждались на поверхности соединения вследствие снижения растворимости хрома в жидком литии при охлаждении образцов.

Поскольку растворения наиболее уязвимой части – соединения вольфрама с малоактивируемой сталью – не происходит, то указанное выше соединение можно считать коррозионностойким в статическом жидком литии в течение 100 часов. Коррозионные повреждения не затрагивают паяный шов, основным видом повреждения соединения является локальная коррозия хромсодержащих фаз в стали ЭК-181.

Литература

- [1]. Natesan K., Reed C.B., Mattas R.F. // Fusion Engineering and Design. 1995. Vol. 27, № C. P. 457–466.
- [2]. Nygren R.E., Tabarés F.L. // Nuclear Materials and Energy. Elsevier Ltd, 2016. Vol. 9. P. 6–21.
- [3]. Rindt P. et al. // Fusion Engineering and Design. Elsevier B.V., 2021. Vol. 173, № April. P. 112812.
- [4]. Meng X.C. et al. // Journal of Nuclear Materials. 2019. Vol. 513. P. 282–292.

РОБОТИЗИРОВАННЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГОНАГРУЖЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИТЭР

Королев Ю.А., Лянзберг Д.В., Гурьева Т.М., Ефимов Г.О., Сеницына К.А.,
Пискарев П.Ю.

АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.227

Для выполнения УЗК энергонагруженных компонентов ИТЭР необходимо решить ряд как методических задач, связанных с отсутствием мировой практики контроля подобных изделий и материалов, так и ряд практических задач, вызванных сложным акустическим поведением материалов и нетривиальной геометрией изделий.

В энергонагруженных компонентах ИТЭР УЗК подлежит ряд соединений, отвечающих за устойчивость облицовки, обращенной к плазме и надежность теплосъемной системы, это:

- соединение стального основания и бронзовой крышки гипервапатрона панелей первой стенки (ППС), выполненное диффузионной сваркой;
- соединение стального основания и бронзовой крышки гипервапатрона Дивертора, выполненное сваркой взрывом;
- паяное соединение бериллиевой облицовки ППС к бронзе гипервапатрона;
- наплавка тонкого медного слоя на вольфрамовую облицовку Дивертора;
- паяное соединение медно-вольфрамовой облицовки Дивертора к бронзе гипервапатрона.

При разработке методического комплекса для выполнения УЗК энергонагруженных компонентов был выбран подход, минимизирующий вероятность ошибки, связанной с человеческим фактором. Для этого при решении задач УЗК используется шестиосевой промышленный робот в качестве манипулятора.

В данной статье сведены результаты применения роботизированных установок УЗК. Также приведены практические результаты исследования пределов выявляемости несплошностей паяного соединения бериллий/бронза и диффузионного сварного соединения бронза/сталь при контроле через бериллиевую облицовку. В статье показано, что соединение бериллий/бронза можно уверенно контролировать с чувствительностью $D_3 = 2$ мм. Для соединения бронза/сталь при контроле через облицовку на стадиях после пайки и после термообработки уверенно выявляются дефекты с $D_3 = 2$ мм в зонах под облицовкой и $D_3 = 3$ мм в зонах между плитками облицовки. На стадии после проведения вакуумных испытаний облицовка становится неконтролепригодной для УЗК из-за затухания на поверхности бериллия. Но проведение дополнительной термообработки делает бериллий вновь проницаемым для звука. Наиболее эффективным оказался контроль иммерсионными датчиками с частотой от 5 до 7,5 МГц и диаметром пьезоэлемента $\frac{1}{2}$ дюйма.

В выводе делается заключение, что применение роботизированного комплекса для выполнения УЗК позволяет выдержать требования ИТЭР к качеству продукции как на стадии изготовления прототипа, так и в серийном производстве. УЗК на стадии после припайки бериллия может проводиться с требуемой чувствительностью, но имеет ряд ограничений, связанных с потерями звука в материале облицовки и в межплиточном пространстве.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ЗАЩИТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ ИТЭР

Семенов А.И., Алексеев Д.И., Карпишин М.В., Манзук М.В., Рошаль А.Г.,
Соленый А.А. Харченко В.В.

*АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
aleks.semenov@sintez.niiefa.spb.su*

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.228

Значительный скачок в развитии токамаков произошел в результате перехода от резистивных к сверхпроводниковым обмоткам, что позволило радикально снизить энергозатраты на формирование и поддержание магнитных полей. Для непрерывного поддержания тока в сверхпроводниковых обмотках в течение сколь угодно большого отрезка времени практически не требуется дополнительная мощность от внешнего источника. Ограниченная мощность необходима лишь для восполнения незначительных потерь в подводящих шинах, коммутационных аппаратах, включенных последовательно с катушками, и контактных соединениях за пределами криостата. С учетом описанных выше преимуществ большинство современных крупномасштабных токамаков, включая токамак ИТЭР, имеют сверхпроводниковую магнитную систему.

В системе питания любой сверхпроводниковой обмотки предусматривается коммутационное устройство аварийного вывода энергии, основная задача которого – обеспечение надёжной защиты сверхпроводниковой обмотки при локальном переходе сверхпроводника в резистивное состояние, распространение которого может иметь серьезные и даже необратимые последствия для всей установки в целом. Для предотвращения негативного сценария необходимо быстро вывести энергию, накопленную в магнитной системе (в токамаке ИТЭР ~51 ГДж), при этом время выведения тока должно быть таким, чтобы перегрев участка, потерявшего сверхпроводящие свойства, не превысил допустимого значения. С другой стороны, скорость выведения тока, напрямую связанная с напряжением, прикладываемым к катушке, должна быть ограничена, чтобы не допустить повреждения ее изоляции.

Учитывая вышесказанное, к надежности устройств быстрого вывода энергии предъявляются исключительно высокие требования. Для повышения надежности устройство быстрого вывода энергии состоит из двух последовательно соединенных коммутационных устройств – основного и резервного. В качестве резервного применяются быстродействующие аппараты с взрывным приводом, разработанные в АО «НИИЭФА» и защищенные патентом РФ [1], в которых механическое разрушение токоведущих элементов конструкции и гашение электрической дуги происходит в водной среде за счёт энергии, получаемой в результате детонации заряда взрывчатого вещества.

Для подтверждения надежности защитных коммутационных аппаратов была проведена экспериментальная компания, целью которой было подтвердить надежность защитных аппаратов на уровне не менее 0.96, что дает надежность всей системы быстрого вывода на уровне 0.9955. Экспериментальная компания состояла из 72 экспериментов, проведенных при номинальных токах и напряжениях в коммутируемой цепи.

Литература

[1]. ПАТЕНТ РФ RU 275 54 54 С.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСАМИ КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ ТОКАМАКА ИТЭР

Терещенко Е.Р., Соколова А.И., Манзук М.В., Алексеев Д.И., Губанова Н.А.

АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
tereschenko@sintez.niiefa.spb.su.

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.229

Плазма в вакуумной камере токамака ИТЭР удерживается и контролируется сильными магнитными полями, которые создаются магнитной системой, состоящей из сверхпроводниковых катушек различного типа, питание которых осуществляется от мощных АС/DC преобразователей. Для управления токами, протекающими в катушках, характеризующихся большой индуктивностью, в системе электропитания предусмотрены комплексы коммутационных аппаратов, обеспечивающие вывод энергии, запасенной в магнитном поле, как в целях защиты, когда сверхпроводник переходит в резистивное состояние, так и в целях создания вихревого электрического поля, необходимого для инициирования плазменного разряда.

Комплексы коммутационной аппаратуры, входящие в состав системы электропитания ИТЭР, с точки зрения управления и диагностики являются сложным техническим объектом, а в силу больших масштабов установки они также представляют собой распределенный объект. Все это делает разработку системы управления и контроля нетривиальной научно-технической задачей.

Система управления в ИТЭР разделена на множество подсистем, обеспечивающих решение различных задач, каждая из которых состоит из четырех уровней управления:

- локальный (уровень оборудования);
- мастер-уровень – объединяющий в единую сеть устройства одного типа;
- верхний уровень – объединяющий в единую сеть все устройства, относящиеся к данной системе;
- центральный уровень – объединяющий в единую сеть все системы токамака.

Данная работа посвящена вопросам разработки и создания системы управления и диагностики для комплексов коммутационной аппаратуры, входящих в состав системы электропитания сверхпроводниковых катушек токамака ИТЭР на локальном и мастер-уровнях. В работе будут представлены и обоснованы общие требования к системе управления и контроля для комплексов коммутационной аппаратуры систем электропитания токамака ИТЭР, основные архитектурные решения; представлены результаты разработки и испытаний прототипов как отдельных элементов, так и системы в целом.

Все работы выполняются во исполнение обязательств Российской Федерации по пакету межправительственных соглашений о поставках высокотехнологичной продукции в обеспечение натурального вклада Российской Федерации в проект ИТЭР.

ПОЛНОМАСШТАБНЫЙ ПРОТОТИП ЦЕНТРАЛЬНОЙ СБОРКИ ДИВЕРТОРА ИТЭР

Маханьков Н.А., Маханьков А.Н., Литуновский Н.В., Мазуль И.В., Пискарев П.Ю.,
Мазаев С.Н., Окунев А.А., Кузнецов В.Е., Гурьева Т.М., Лапин А.В., Васильев В.А.

АО «НИИЭФА», г. Санкт-Петербург, Россия, email: makhann@niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.230

Основные функции центральной сборки дивертора (ЦСД) ITER, расположенной под сепаратрисой, заключаются в отражении нейтральных частиц и защите тела кассеты, а также систем диагностики от прямого взаимодействия с плазмой. ЦСД состоит из стальной опорной конструкции (СОК), на которую установлены обращенные к плазме компоненты (ОПЭ). Существует три различных ОПЭ: внутренняя отражающая мишень (ВОМ) ОПЭ; ОПЭ купола; наружная отражающая мишень (НОМ) ОПЭ. ЦСД представляет собой активно охлаждаемый компонент с давлением воды на входе 3,3 МПа и температурой воды на входе 110°C. Все ОПЭ ЦСД облицованы плоскими вольфрам-медными плитками (W-Cu). Все ОПЭ должны быть испытаны высокими тепловыми потоками и должны продемонстрировать способность выдерживать $N=5000$ циклов при $q = 5$ МВт/м² и $N=300$ циклов при $q=10$ МВт/м². ЦСД представляет собой высоковакуумное оборудование и имеет заданную допустимую скорость утечки $1 \cdot 10^{-10}$ Па·м³/с.

На этапе квалификации, в рамках, Соглашения о поставке (СП) полномасштабного прототипа ЦСД (ПП ЦСД), все ОПЭ ЦСД были изготовлены и успешно протестированы в АО «НИИЭФА». Была разработана и квалифицирована технология сварки взрывом для соединения CuCrZr / SS, лазерная и орбитальная сварки для соединений SS / SS, пайка вольфрамовой облицовки к подложке CuCrZr. Для контроля изготовленных компонентов были разработаны и внедрены протоколы неразрушающего контроля. Все ОПЭ ЦСД успешно прошли испытания на нагрузку высокими тепловыми потоками. ПП ЦСД успешно прошел гидравлические испытания на расход воды и давление, а также испытание на утечку горячего гелия.

Одной из основных проблем, выявленных при изготовлении прототипа ЦСД, было несоответствие геометрии поверхностей, обращенных к плазме, расположенных на отражающих мишенях ЦСД, к требуемой. ОПЭ купола ПП ЦСД имели самое значительное отклонение поверхности облицовки - намного превышающее допустимые допуски по профилю поверхности и по шагу поверхности между соседними ОПЭ. Последующая научно-исследовательская работа была направлена на измерение поверхностных деформаций на всех этапах изготовления ОПЭ, поиск способов их минимизации и оценку возможности применения обратного инжиниринга как способа соблюдения допусков поверхности ОПЭ.

Другой проблемой при изготовлении ПП ЦСД были дефекты пайки облицовки ОПЭ купола. Избыток припоя приводит к его проникновению в зазоры между облицовочными плитками ОПЭ купола и к перемещению расплавленного припоя, за счет гравитационных сил, от вершины ОПЭ купола к его концам, а также к дефектам пайки. Дозирование припоя по его удельному весу (по площади) помогает свести к минимуму дефекты пайки.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЭВП ДЛЯ СИСТЕМЫ БЫСТРОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ ИТЭР

Сапожников К.С., Еникеев Р.Ш.

АО «НИИЭФА», г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: sapozhnikov@sintez.niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.231

Сверхпроводящая магнитная система международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) состоит из 18 катушек тороидального поля (TF), 6 катушек полоидального поля (PF) и 6 модулей центрального соленоида (CS). В случае потери сверхпроводимости магнитная энергия, накопленная в катушках, должна быть выведена с целью их защиты от перегрева. Это достигается за счет включения силовых энергопоглощающих резисторов последовательно с катушками при помощи системы быстрого вывода энергии, состоящей из коммутационных аппаратов, батареи противотока и RC-цепи, демпфирующей коммутационные перенапряжения [1, 2].

Предохранитель включен последовательно с демпфирующей цепью для отключения аварийного тока в случае электрического пробоя конденсатора цепи. Он представляет собой неуправляемый выключатель одноразового действия, работа которого основана на отключении тока при электрическом взрыве токоведущего проводника (ЭВП).

В докладе представлены результаты разработки и исследования сильноточного высоковольтного предохранителя на основе ЭВП, предназначенного для защиты от токов короткого замыкания отдельных элементов силового оборудования системы быстрого вывода энергии ИТЭР. В соответствии с требованиями ИТЭР предохранитель предназначен для использования в импульсном режиме работы и при возникновении короткого замыкания должен отключить ток амплитудой до 30 кА, обеспечив длительный разрыв электрической цепи с напряжением до 9 кВ. Приводится результат численного моделирования режимов работы предохранителя в демпфирующей цепи, описание конструкции разработанного предохранителя, рассматриваются основные технические решения, обеспечивающие его соответствие требованиям по электрической прочности, коммутируемым токам и времени отключения, результаты экспериментальных исследований коммутационных характеристик, а также определяется электрическая прочность в импульсном режиме работы с приложением послекоммутационного напряжения.

Коммутационные испытания, проведенные на прототипах предохранителя, продемонстрировали его надежную работу в заданных параметрах. Получены положительные результаты испытаний. Простота разработанной конструкции предохранителя позволила обеспечить надежность изделия и его сравнительно небольшие габариты. Предохранитель будет использоваться в качестве защитного элемента в системе быстрого вывода энергии ИТЭР.

Литература

- [1]. I. Song, A. Roshal, V. Tanchuk, J. Thomsen, F. Milani and I. Benfatto. The fast discharge system of ITER superconducting magnets. 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2011, стр. 1-6.
- [2]. C. Neumeyer et al., ITER power supply innovations and advances, 2013 IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE), 2013, стр. 1-8.

ВАКУУМНЫЕ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СБОРКИ ДИВЕРТОРА ИТЭР

Киселев Д.А., Васильев В.А., Маханьков А.Н., Мазаев С.Н.

*АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
kiselevd@sintez.niiefa.spb.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.232

В докладе сделан обзор проблем, возникших в результате проведения вакуумных и гидравлических испытаний прототипа центральной сборки дивертора (ЦСД) международного термоядерного реактора (ИТЭР), а также приведены результаты этих испытаний.

Основная сложность заключалась в проведении вакуумных испытаний в соответствии со специфическими требованиями, предъявляемыми международной организацией (МО) ИТЭР. В первую очередь к этим требованиям относится достижение допустимого значения фонового уровня гелия в вакуумной камере во время испытаний, позволяющего обеспечить требуемую чувствительность течеискателя при нагреве ЦСД до 250°C. Испытания при температуре 250°C необходимы, так как при данной температуре будут находиться все внутрикамерные компоненты реактора, например, при отжиге. Для достижения необходимого значения уровня фона гелия был проведен отжиг ЦСД в течение 75 часов. Во время отжига температура обращенных к плазме элементов достигала 400°C, а температура стальной опорной конструкции доходила до 370°C. Также во время гелиевых испытаний использовались газопоглотители на основе сплава Ti-Zr-Al, которые позволили снизить фоновый уровень потока гелия в вакуумной камере с 10^{-10} до 10^{-11} Па·м³·с⁻¹ в эквиваленте по воздуху. В результате гидравлические и вакуумные испытания ЦСД были успешно проведены в соответствии со всеми требованиями МО ИТЭР.

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ БЫСТРОГО ЗАЩИТНОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ В РАССЕЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ РЕАКТОРНОГО ЗАЛА ИТЭР

Нечаев Н.Е., Александров Е.С., Власов А.Ю., Китаев Б.А., Крюков Ю.Л.,
Медведев М.В., Серебров Р.А., Фридман Б.Э.

АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.233

Коммутационные аппараты системы питания сверхпроводящих магнитных систем тороидального поля будут установлены в реакторном зале ИТЭР и должны функционировать в рассеянном магнитном поле (до 30 мТл), создаваемом магнитными системами токамака. Предварительные испытания коммутационных аппаратов показали нарушение работоспособности в постоянном магнитном поле почти всех элементов с магнитопроводами в коммутационных аппаратах и системах их управления, в том числе:

- силовых трансформаторов,
- трансформаторов малой мощности в системах управления, в том числе трансформаторов и дросселей блоков питания;
- магнитных элементов датчиков, в том числе магнитных модуляторов датчиков нуля тока;
- электромагнитов, в том числе электромагнитов привода высоковольтных защитных контакторов.

Причиной отказа элементов с магнитопроводами является эффект концентрации магнитного поля в ферромагнитных элементах и изменение их магнитного состояния до состояния, близкого к уровню магнитного насыщения.

В докладе рассматриваются меры по устранению указанных отказов:

- магнитное экранирование элементов с магнитопроводами;
- подбор и замена блоков питания на блоки с компонентами, устойчивыми к действию магнитного поля;
- изменение режимов работы таким образом, чтобы намагничивание во внешнем магнитном поле не нарушало работоспособность элементов;
- отказ от применения датчиков с магнитными элементами и переход на датчики других типов, например, на волоконно-оптические датчики.

Математическое моделирование и экспериментальные исследования распространения магнитного поля в магнитопроводах позволили выбрать и обосновать конфигурацию магнитных экранов. Результативность принятых мер по устранению отказов подтверждена испытаниями элементов коммутационных аппаратов и систем их управления в постоянных магнитных полях индукцией 50 мТл.

КОМПЛЕКС ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МАГНИТНЫХ КАТУШЕК ИТЭР

Попков Д.Е., Еникеев Р.Ш., Сапожников К.С.

АО «НИИЭФА», г. Санкт-Петербург, Россия, popkov@sintez.niiefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.234

Удержание плазмы в вакуумной камере токамака ИТЭР осуществляется при помощи сверхпроводящей магнитной системы, состоящей из 18 катушек тороидального поля (TF), 6 катушек полоидального поля (PF), 6 модулей центрального соленоида (CS), а также 9 катушек корректирующего поля (CC). Электропитание катушек обеспечивается системой, почти все компоненты которой будут уникальными и специально разработанными для ИТЭР [1]

Для оперативного и корректного управления сверхпроводящей магнитной системой в процессе её работы, а также для своевременного реагирования защитных систем и аппаратуры на аварийные события требуется осуществлять быстрый, точный и надежный контроль напряжений и токов в системе электропитания магнитных катушек.

Ввиду значительного масштаба и сложной архитектуры системы электропитания магнитных катушек, для обеспечения контроля напряжений и токов требуется применение большого количества различной измерительной аппаратуры, как серийно выпускаемой, так и вновь разработанной под требования ИТЭР. Количество и разнообразие измерительной аппаратуры влечет за собой необходимость передачи большого объема синхронизированных между собой данных с частотами до 20 кГц (до 100000 измерений в секунду) и их обработки. Кроме того, особенности работы в условиях ИТЭР накладывают на применяемое оборудование дополнительные требования к устойчивости от воздействия магнитных полей постоянного тока (до 50 мТ).

Для обеспечения контроля напряжений и токов в системе электропитания магнитных катушек с учетом вышеуказанных требований разработан комплекс измерения токов и напряжений системы электропитания магнитных катушек ИТЭР.

В докладе представлены результаты разработки комплекса измерения токов и напряжений системы электропитания магнитных катушек ИТЭР, описаны его состав и структура, обоснованы основные архитектурные решения, принятые в ходе разработки комплекса, а также представлены результаты испытаний как отдельных элементов комплекса, так и комплекса в целом.

Скорость и точность измерений, надежность комплекса обеспечиваются рядом технических решений, принятых при разработке. Соответствие комплекса предъявляемым требованиям подтверждено квалификационными и приемо-сдаточными испытаниями. Разработанный комплекс будет использован в ИТЭР для обеспечения контроля токов и напряжений в системе электропитания магнитных катушек.

Литература

- [1]. C. Neumeyer et al., ITER power supply innovations and advances, 2013 IEEE 25th Symposium on Fusion Engineering (SOFE), 2013, стр. 1-8.

СИСТЕМА INTERLOCK ДЛЯ БЛОКОВ АППАРАТОВ БЫСТРОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ МАГНИТНЫХ КАТУШЕК ПОЛОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ И ЦЕНТРАЛЬНОГО СОЛЕНОИДА РЕАКТОРА ИТЭР

Медведев М.В., Громов А.Б., Макарова А.Д., Шалаева А.И.,
Серебров Р.А., Фридман Б.Э.

АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.235

В случае нештатных и аварийных событий основная функция блока аппаратов быстрого вывода энергии PF/CS FDU заключается в защите сверхпроводящих катушек полоидального поля PF и центрального соленоида CS с помощью локальной системы управления Interlock.

Функции локальной системы Interlock заключаются:

- в обнаружение событий Interlock;
- в выполнение действий Interlock;
- в информировании центральной системы блокировок PIS о событиях и действиях;
- в функции мониторинга данных с интерфейсом CODAC.

Система Interlock предназначена для быстрого вывода энергии, который осуществляется посредством размыкания контуров питания катушек и включение в разрыв разрядных резисторов для поглощения энергии.

При выполнении быстрого вывода энергии управление блоком аппаратов осуществляется в режиме реального времени логическими управляющими сигналами, генерируемыми двумя булевыми процессорами Siemens Simatic Fm 352-5. В докладе рассматриваются система управления, временные диаграммы работы двух булевых процессоров и рассмотрены временные диаграммы работы системы Interlock.

В докладе представлена архитектура системы управления Interlock, которая собирает все сигналы и передает их в центральную систему Interlock с помощью Plant Interlock контроллера.

В докладе также описан интерфейс CODAC, который позволяет оператору следить за состоянием системы Interlock. С помощью интерфейса оператор осуществляет функцию мониторинга, получает данные обо всех управляющих сигналах и получает детальную информацию о диагностических сигналах системы быстрого вывода энергии.

ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫМИ АППАРАТАМИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ И ЗАЩИТНЫХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КАТУШЕК ИТЭР

Губанова Н.А. Манзук М.В., Алексеев Д.И., Рошаль А.Г., Терещенко Е.Р.,
Соколова А.И.

*АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
gubanova@sintez.niiefa.spb.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.236

За многолетний период физических исследований на токамаках системы их электропитания эволюционировали из простейших устройств на основе конденсаторных батарей до уникальных электротехнических комплексов. В наиболее крупных действующих установках импульсная мощность источников питания достигает 2,5 ГВт, а энергия, запаасаемая в магнитном поле, превышает величину 3 ГДж. Ещё более впечатляющие цифры характеризуют систему электропитания токамака ИТЭР: суммарный запас электромагнитной энергии в его обмотках превышает 50 ГДж, а импульсная мощность, развиваемая при аварийном выводе энергии из сверхпроводниковых обмоток, достигает 9 ГВт [1].

Создание устройств управления для элементов, входящих в состав системы питания электрофизической установки такого масштаба, сопряжено с необходимостью решения сложных технических задач, наиболее значимыми из которых являются:

- построение распределенной системы управления и сбора данных с большим объемом обрабатываемой и пересылаемой информации;
- сбор данных о состоянии высоковольтного и сильноточного пассивного и активного оборудования системы питания;
- решение вопросов обеспечения синхронности работы однотипных объектов управления и различных подсистем при очень быстрых скоростях протекания физических процессов;
- интеграция и взаимодействие с центральными системами управления;
- обеспечение надежности и безотказной работы системы управления;
- обработка ошибок и имплементация стратегии защиты оборудования.

В данной работе будут подробно рассмотрены вопросы и аспекты, которые решались в процессе разработки и создания системы управления коммутационными аппаратами для оперативного вывода энергии и защитных переключений в системах электропитания сверхпроводниковых катушек ИТЭР.

Работы выполняются во исполнение обязательств Российской Федерации по соглашению о поставках высокотехнологичной продукции в обеспечение натурального вклада Российской Федерации в проект ИТЭР.

Литература

- [1]. Основы проектирования магнитных термоядерных реакторов / А.Б. Алексеев [и др.]; под редакцией В.А. Глухих, Г.Л. Саксаганского, СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016, 613 с.

ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗАЩИТНОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ СИСТЕМЫ БЫСТРОГО ВЫВОДА ЭНЕРГИИ ИЗ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ КАТУШЕК ИТЭР

¹Алексеев Д.И., ¹Карпишин М.В., ²Кривошеев С.И., ¹Манзук М.В., ¹Рошаль А.Г.,
¹Семенов А.И., ¹Соленый А.А.

¹АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург, Россия,
manzuk@sintez.niiefa.spb.su

²Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург, Россия, ksi.mgd@gmail.com

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.237

Работа практически всех типов существующих сильноточных коммутационных аппаратов, за исключением твердотельных и гибридных, сопровождается горением электрической дуги, которая появляется сразу после размыкания контактов и существует до завершения процесса гашения. Электрическая дуга гаснет, когда её напряжение превышает напряжение источника питания цепи, в которой установлен размыкатель. Напряжение дуги изменяется пропорционально длине дуги. С увеличением длины дуги повышается её напряжение, поэтому одним из наиболее распространенных способов гашения дуги является её растягивание в дугогасительных камерах или же её растягивание путем деления на множество коротких дуг, что приводит к дополнительному увеличению напряжения дуги за счет создания множества зон катодного падения напряжения. Кроме того, на вольтамперную характеристику электрической дуги оказывают значительное влияние электрические и тепловые процессы, а также условия окружающей среды [1], поэтому, чем интенсивнее протекает процесс охлаждения, тем выше напряжение дуги при заданном токе.

Энергия, которая рассеивается в электрической дуге во время процесса гашения, является ключевой характеристикой коммутационного процесса постоянного тока, поскольку эта энергия, будучи функцией индуктивности и отношения напряжений дуги и источника, зависит от параметров всей внешней электрической цепи [2]. Таким образом, для надежного функционирования размыкатель постоянного тока должен рассеивать больше энергии, чем может быть накоплено в магнитном поле внешних индуктивностей.

Понимание величины энергии дуги, которая может рассеиваться без повреждений аппарата, необходимо для оценки его предельной отключающей способности, и позволяет оценить запас по коммутационной способности для конкретного применения.

В данной работе будут представлены результаты экспериментов, показывающие прямую связь между энергией, рассеиваемой в электрической дуге внутри коммутационной части взрывного размыкателя постоянного тока, и характером протекания процесса коммутации тока. Следовательно, это позволяет оценить коэффициент запаса между номинальным режимом работы, который соответствует энергии дуги в диапазоне 13...16 кДж, и критической точкой, начиная с которой наблюдаются заметные изменения кривых коммутируемого тока. Данный запас соответствует значению около 50% для первой критической точки и более 150% для точки, где происходит сбой процесса гашения электрической дуги.

Литература

- [1]. Ammerman R.F., Sen P.K. Modeling High-Current Electrical Arcs: A Volt-Ampere Characteristic Perspective for AC and DC Systems. 39th North American Power Symposium, 2007, DOI: 10.1109/NAPS.2007.4402286.
- [2]. Shukla A., Demetriades G.D. A Survey on Hybrid Circuit-Breaker Topologies. IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. V. 30, i. 2, pp. 627-641.

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЕРВОГО ЗЕРКАЛА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СВЛ ИТЭР

^{1,2}Орловский И.И., ^{1,2}Вуколов К.Ю., ^{1,2}Андреев Е.Н.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, orlovskiy_ii@nrcki.ru

²УТС-Центр, г. Москва, Россия, i.orlovskiy@fc.iterru.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.238

Оптическая схема диагностики спектроскопия водородных линий (СВЛ) установки ИТЭР включает в свой состав зеркала для передачи излучения от плазмы к детекторам за биозащитой. При этом первое зеркало, смотрящее на плазму, будет подвержено воздействию нейтронных потоков, тепловых нагрузок, а главное, потоков высокоэнергичных нейтралов перезарядки из плазмы и пересадению загрязнений с элементов конструкции вакуумной камеры и диагностических каналов. При проектировании узла первого зеркала необходимо было решить задачи выбора материала и технологии изготовления самого зеркала, проработать системы его защиты от неблагоприятных воздействий среды, а также сделать оценку времени жизни в условиях ИТЭР. В ходе работ по поставке диагностики СВЛ на ИТЭР все вышеописанные задачи были успешно выполнены. Полный комплект зеркал для трех каналов СВЛ изготовлен и готов к установке в узлы первого зеркала.

В докладе ретроспективно описываются подходы решения различных аспектов проблемы первого зеркала на фоне развития проекта ИТЭР с его старта до текущего момента. Приведены результаты численного моделирования и экспериментов, проведенных в НИЦ «Курчатовский Институт», а также на плазменных установках по всему миру при участии международной рабочей группы по проблеме первого зеркала в рамках ИТРА (International Tokamak Physics Activity).

Основное внимание уделено результатам, имеющим непосредственное отношение к итоговым конструкторским и технологическим решениям. На основе данных расчета потоков частиц на первую стенку в коде EIRINE и моделирования распространения атомов вдоль диагностических портов в пакете Zemax сделан вывод о доминировании процесса эрозии поверхности первого зеркала над осаждением материалов первой стенки во всех диагностических портах СВЛ. На основе анализа свойств оптических материалов и экспериментальных данных по их физическому распылению был сделан выбор в пользу монокристаллического молибдена в качестве материала первого зеркала. Такое зеркало сохраняет приемлемые оптические свойства даже при сильном (~1 мкм) распылении поверхности, что позволяет использовать встроенную в узел зеркала систему очистки на основе разряда в полном катоде для восстановления работоспособности зеркала после возможной аварии системы охлаждения установки. Разработана и квалифицирована в ИТЭР технология изготовления зеркала из монокристаллического молибдена. Разработана и испытана облегченная конструкция зеркала, обеспечивающая необходимые оптические свойства под расчетными тепловыми нагрузками.

В заключение приведены примеры различных организационных и технических проблем, возникавших при изготовлении поставочной партии зеркал в соответствии с правилами ИТЭР.

ТЕОРИЯ MSE ДИАГНОСТИКИ В ПАРАБОЛИЧЕСКИХ КООРДИНАТАХ

¹Демура А.В., ¹Леонтьев Д.С., ²Летунов А.Ю., ¹Лисица В.С.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, leontievdmity@gmail.com

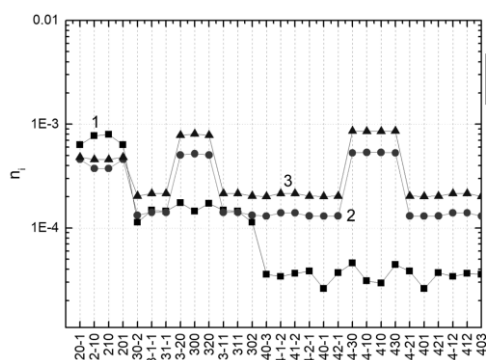
²РФЯЦ-ВНИИТФ им. ак. Е.И. Забабахина, г. Снежинск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.239

MSE диагностика является одной из основ определения токовой и магнитной структуры в современных токамаках. В ее основе лежат измерения штарковской структуры водородного пучка при его пролете через магнитное поле установки [1,2].

При пролете пучка нейтрального водорода через плазму в его системе координат возникает индуцированное электрическое поле \mathbf{E} , приводящее к расщеплению энергетических уровней атома с образованием поляризованного штарковского спектра, состоящего из двух систем хорошо разделенных компонент: π -компоненты с вектором поляризации, параллельным \mathbf{E} и σ -компоненты, с вектором поляризации, лежащим в плоскости, перпендикулярной \mathbf{E} (Motional Stark Effect-MSE) [2].

В данной работе проводился расчет сечений возбуждения переходов в атоме водорода при столкновении с протонами в приближении внезапных возмущений с использованием параболических волновых функций. Расчеты спектров в лабораторной системе наблюдения, связанные с волновыми функциями с осью квантования



вдоль электрического поля, проводились с помощью разложения по базису параболических волновых функций, ориентированных вдоль вектора переданного импульса \mathbf{q} , что упрощает вычисление матричных элементов. Для расчета вероятности возбуждения перехода использовались условия нормировки [3, 4], позволяющие устранить расхождение сечений переходов. Скорости радиационных распадов рассчитывались по формулам Гордона [5]. На основе данных по радиационно-столкновительным процессам

была построена кинетическая модель для определения населенностей первых четырех уровней атома водорода. При этом рассматривалось два случая: 1) с уровня $n=4$ происходит радиационный распад на нижние уровни; 2) с 4 уровня происходит ионизация атома и радиационного распада нет. На рисунке 1 показаны рассчитанные в работе населенности уровней. Сравнение с данными работы [6], обнаружило достаточно хорошее согласие данных для населенностей уровней с $n=2$ и $n=3$.

Литература

- [1]. Крупин В.А. и др. Разработка MSE диагностики профиля тока для установки Т-10. Москва: НИЦ «Курчатовский институт», 1995. 33 с.
- [2]. Marchuk O. et al. // J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys. 2009. Vol. 43, № 1.
- [3]. Skobelev I.Y., Vinogradov A. V. // J. Phys. B At. Mol. Phys. 1978. Vol. 11, № 16. P. 2899–2905.
- [4]. Виноградов А.В. и др. // Успехи Физических Наук. 1980. Т. 119. С. 120–129.
- [5]. Bethe H.A., Salpeter E.E. Quantum mechanics of one- and two-electron atoms. Berlin: Springer-Verlag, 1957. 375 p.
- [6]. Ralchenko Y. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83, № 10. P. 1–4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ, ПОДВЕРГАЮЩЕЙСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ МОЩНЫХ ПОТОКОВ ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ, МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПИРОМЕТРИИ

^{1,2}Лиджигорьяев С.Д., ^{1,3}Бурмистров Д.А., ¹Гаврилов В.В., ^{1,2}Позняк И.М.,
^{1,2}Пушина А.В., ^{1,2}Топорков Д.А.

¹ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия

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

³НИУ "МЭИ", г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.240

Успешная реализация проекта ИТЭР в значительной степени зависит от правильного выбора обращенных к плазме материалов первой стенки вакуумной камеры токамака. Для обоснования этого выбора необходимы экспериментальные данные о поведении материалов под действием интенсивных плазменных потоков, в частности, о температуре на их поверхности [1]. В докладе представлены результаты исследования динамики температуры на поверхности вольфрамовой мишени под действием мощных плазменных потоков методом спектральной пирометрии. Помимо этого, показаны результаты исследования влияния газовой завесы перед поверхностью мишени на динамику температуры.

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 ≤ 2 Тл. Сверхзвуковая газовая струя азота/неона направлялась вдоль поверхности вольфрамовой мишени плоским соплом Лавала [2]. Максимальная плотность в газовой струе достигала 10^{17} см⁻³ при толщине струи ≈ 5 см и ширине ≈ 15 см. Вольфрамовая мишень размером 120 мм \times 140 мм располагалась на расстоянии 40 мм от оси газовой струи.

Для определения динамики температуры на поверхности мишени был разработан инфракрасный пирометр. Представлено его устройство, схема калибровки, а также схема проведения экспериментов. Были определены зависимости температуры поверхности мишени от времени, а также проведена оценка значения коэффициента излучения вольфрама в зависимости от длины волны. Показано, что использование газовой завесы значительно снижает нагрев поверхности вольфрамовой мишени. При этом с повышением плотности используемого газа снижается максимально достигаемая температура на поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках научного проекта РФФИ № 20-21-00153.

Литература

- [1]. Климов Н.С., Подковыров В.Л., Житлухин А.М., Архипов Н.И., Сафронов В.М., Барсук В.А., Позняк И.М., Loarte A., Merola M., Linke J. Воздействие интенсивных импульсных потоков плазмы на защитные материалы внутрикамерных компонентов термоядерного реактора // Ядерная физика и инжиниринг. 2010. Т. 1. № 3. С. 210-219.
- [2]. Gavrilov V.V., Zhitlukhin A.M., Kochnev D.M., Kostyushin V.A., Lidzhigoriaev S.D., Poznyak I.M., Toporkov D.A., Pikuz S.A., Ryazantsev S.N., Skobelev I.Y. Shielding of the tungsten target exposed to the high-energy hydrogen plasma flow by gas injection // 47th eps conference on plasma physics, eps 2021 pp. 972-975.

ВЛИЯНИЕ ДОПУСКОВ СИСТЕМЫ КОЛЛИМАТОРНЫХ КАНАЛОВ НА РАБОТУ ДИАГНОСТИКИ ВНК ИТЭР

Пучкин С.Ю., Немцев Г.Е., Родионов Р.Н., Юхнов Н.П., Хафизов Р.Р.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.241

Вертикальная нейтронная камера (ВНК) ИТЭР – система, предназначенная для измерения профиля нейтронного источника. ВНК состоит из двух веерообразных коллимирующих структур: верхней и нижней, расположенных в разных портах вакуумной камеры ИТЭР. Верхняя ВНК устанавливается в порт-плаг верхнего диагностического порта №18. Она имеет шесть измерительных каналов, оснащенных коллиматорами для линий наблюдения. Нижняя ВНК устанавливается в несущую конструкцию диагностического рэка, расположенного внутри нижнего порта №14. Нижняя ВНК также имеет шесть измерительных каналов, но только пять из них имеют коллиматоры для линий наблюдения, в то время как шестой канал («слепой») предназначен для счета фоновых нейтронов.

Была разработана геометрическая модель в САПР, состоящая из нижней ВНК, частей диверторной кассеты и бланкета для оценки прохождения нейтронного потока оптическим методом. Коллиматоры нижней ВНК проходят через бланкет, диверторную кассету токамака и собственно через детекторный модуль ВНК, установленный в диагностическом рэке. Все эти компоненты имеют независимое крепление к вакуумной камере ИТЭР. Также были построены линии наблюдения для каждого измерительного канала нижней ВНК.

В общем случае, источником ошибок являются погрешности, возникающие в процессе изготовления коллиматорных каналов внутри компонентов, погрешности их относительной установки и деформации коллиматорных каналов под воздействием механических нагрузок, возникающих в процессе работы токамака. Ожидается, что возможные относительные смещения указанных компонентов повлияют на коллимирующие свойства каналов ВНК и, следовательно, на точность восстановления профиля нейтронного источника.

Для оценки влияния взаимного расположения частей коллиматорных каналов на нейтронный поток в области детекторов нижней ВНК были использованы оптический метод и расчет интенсивности сигналов от детекторов ВНК с помощью радиационного транспорта.

Коллиматорная часть диверторной кассеты была изменена в ходе исследования механических и тепловых перемещений, возникающих при работе токамака: был увеличен диаметр коллиматорных каналов, а также смещены их оси с целью компенсации несоосности.

В ходе расчета оптическим методом определялось процентное соотношение площадей пропускания нейтронного потока при различных положениях нижней ВНК. Дополнительно был проведен расчет нейтронного транспорта для оценки сигналов от детекторов нижней ВНК при различных смещениях коллиматорных каналов. Расчет проводился методом Монте-Карло с учетом реальной геометрии коллиматоров ВНК и окружающих конструкций.

Проведенный анализ показал, что наибольшие потери интенсивности сигнала (до 30%) приходятся на измерительный канал, находящийся ближе всего к диверторной кассете. В то же время, измерение положения коллиматорных каналов после установки всех компонентов внутри вакуумной камеры, а также учет данных, полученных с помощью «слепого» детекторного блока нижней ВНК, позволит внести необходимые поправки в алгоритм восстановления профиля нейтронного источника.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА ХЛОРИДА ЛАНТАНА С ЦЕЛЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ В НЕЙТРОННОЙ ДИАГНОСТИКЕ ПЛАЗМЫ

^{1,2}Панкратенко А.В., ^{1,2}Кормилицын Т.М., ³Шевелев А.Е., ³Хилькевич Е.М.,
³Ильясова М.В., ¹Джурик А.С., ^{1,2}Кашук Ю.А.

¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, a.pankratenko@iterrf.ru

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

³Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.242

В работе представлены результаты исследования функции отклика нового сцинтилляционного спектрометра быстрых нейтронов на основе кристалла $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$. Предложенный в работе [1] метод регистрации нейтронов в области энергий 2÷5 МэВ с помощью этого детектора имеет значительный потенциал для современных установок УТС, работающих с дейтериевой плазмой. Регистрация быстрых нейтронов основана на использовании продуктов реакции $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S}$.

Функции отклика детектора с кристаллом размера $\text{Ø}25.4 \times 25.4$ мм были исследованы в двух экспериментах: в поле излучения DD нейтронного генератора ИНГ-07Д, а также в экспериментальной кампании на циклотроне ФТИ им. А.Ф. Иоффе. В экспериментах на циклотроне моноэнергетические нейтроны образуются в результате ядерной реакции $^9\text{Be}(\alpha,n)^{12}\text{C}$ при облучении бериллиевой мишени альфа-частицами разных энергий. В обоих экспериментах оцифровка сигнала детектора производилась быстрым АЦП с частотой дискретизации 500 МГц и разрядностью 14 бит. С помощью цифрового метода разделения сигналов по форме импульса выделены нейтронные компоненты сигнала.

Анализ экспериментальных результатов и результатов моделирования отклика детектора с помощью ПО GEANT4 [2] позволили оценить ρ/β -отношение для данного кристалла, оценить чувствительность и энергетическое разрешение спектрометра при регистрации ДД нейтронов. Проведен анализ аппаратурных спектров при регистрации быстрых нейтронов и идентифицированы наблюдаемые ядерные реакции. Энергетическое разрешение при регистрации быстрых нейтронов в области энергий 2÷5 МэВ составляет 7%; коэффициент $\rho/\beta \sim 0,8$.

Исследована возможность использования детектора в качестве монитора потока быстрых нейтронов в экспериментах с ДД плазмой. Полученные результаты указывают на перспективность использования детектора $\text{LaCl}_3(\text{Ce})$ для спектрометрии быстрых нейтронов в диапазоне энергий DD-нейтронов, образующихся в экспериментах с дейтериевой плазмой при интенсивном дополнительном нагреве с образованием энергичных ионов.

Работа выполнена в рамках реализации Рабочего соглашения №1 (ITER ref. IO/21/СТ/4300002685) между Международной организацией 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]. Allison J. et al., Recent developments in GEANT4, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 835, pp. 186–225, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.nima.2016.06.125.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СБОРКЕ ОПОРЫ ВНУТРЕННЕГО БЛАНКЕТА РЕАКТОРА ИТЭР ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ

^{1,2}Никулин Б.И., ¹Поддубный И.И., ¹Свириденко М.Н., ¹Данилов И.В., ³Путрик А.Б.

¹АО «НИКИЭТ», Москва, Россия

²НИУ «МЭИ», Москва, Россия

³ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.243

Защитный бланкет реактора ИТЭР состоит из 440 модулей бланкета (МБ), каждый из которых механически закреплен на вакуумной камере (ВК) с помощью четырех сборок гибких опор, главным элементом которых является гибкий картридж. Для обеспечения электрической изоляции опоры от ВК используется оксид алюминия, наносимый на коническую поверхность гайки и плоскую поверхность втулки.

Конструкционные материалы компонентов опоры имеют различные коэффициенты термического расширения, что приводит к возникновению термоупругих напряжений и уменьшению усилия затяга болта. При срывах плазмы в МБ индуцируются знакопеременные электромагнитные силы, что может привести к раскрытию стыка на интерфейсе «коническая втулка-картридж» и при циклическом режиме работы реактора ИТЭР к разрушению изоляции с последующим протеканием тока.

Данная работа посвящена анализу полей температур в сборке гибкой опоры в нормальном и аварийном режимах. Расчеты выполнены в среде ANSYS Mechanical APDL.

Целью теплового расчета является нахождение температурных полей в режиме Inductive I, представляющего собой последовательность режимов горения плазмы и режимов паузы. Для решения задачи используются нестационарное уравнение теплопроводности с учетом внутреннего энерговыделения, граничные (интерфейс на границе с ВК – 100 °С, на границе с модулем бланкета – 130 °С) и начальные условия (для всех компонентов опоры – 100 °С), условия сопряжения на поверхностях деталей сборки опоры. Максимальная температура в картридже достигает 156 °С, поле температуры в опоре линейно спадает от МБ к ВК.

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) проводился при следующих шагах нагружения: затяг болта 600 кН при 20 °С, равномерный разогрев до 100 °С, приложение температурных полей, соответствующих режимам паузы и импульса, поперечное смещение МБ на 1.6 мм и разворот на 0.085°, осевая растягивающая сила 600 кН. Последние 3 шага обусловлены действиями электромагнитных сил при срывах плазмы при токе величиной 137 кА. Расчет НДС основывается на совместном решении уравнений Дюгамеля-Неймана, сплошности, соотношений Коши вместе с граничными условиями [2].

В режиме Inductive I усилие затяга центрального болта опоры падает до 496 кН, что приводит к раскрытию стыка при совместном действии электромагнитной силы 600 кН и комбинации смещения МБ и разворота. Раскрытие стыка может привести к разрушению электроизоляции и аварийному режиму работы бланкета, когда ток пойдет через опору.

Целью электрического расчета опоры является определение поля джоулева тепловыделения. Рассчитанное энерговыделение накладывается на опору в нестационарном тепловом расчете в течение 300 мс, где за начальное температурное поле принимается поле в конце режима горения. Максимальная температура в картридже возрастает более чем в 6 раз и достигает 966 °С. Остывание до рабочей температуры опоры происходит за 4100 с.

Такие высокие температуры сопровождаются значительными термическими напряжениями, которые могут привести к потере несущей способности картриджа, что говорит о необходимости предотвращения раскрытия стыка. Тем не менее в режиме Inductive I сборка опоры и отдельные ее компоненты удовлетворяют критериям статической и усталостной прочности SDC-IC.

БЫСТРЫЙ РАСЧЕТ СИНТЕТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВИДЕОКАМЕР ИТЭР С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРПОЛИРУЕМЫХ МАТРИЦ ПЕРЕНОСА ЛУЧЕЙ

¹Неверов В.С., ²Хуснутдинов Р.И., ³Полевой А.Р., ³Имбо Ф., ³Шнайдер М.,
³Де Бок М.

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия, neverov_vs@nrcki.ru,

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия,

³ITER Organization, Cadarache, France

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.244

Предложен способ быстрого расчёта синтетических изображений для видеокамер ИТЭР, оснащённых оптическими фильтрами в видимом диапазоне длин волн. В получаемых изображениях учтено отражение излучения от металлической первой стенки вакуумной камеры. Для генерации изображений используются заранее рассчитанные с помощью трассировки лучей монохроматические матрицы переноса лучей [1], содержащие коэффициенты трансформации сигнала от индивидуальных источников единичной светимости (ячеек трёхмерной пространственной сетки) к пикселям ПЗС матрицы видеокамеры. Для решения проблемы хранения в базе данных ИТЭР матриц переноса лучей, размер которых может достигать сотен гигабайт, а также для эффективной работы с ними в оперативной памяти одного узла вычислительного кластера, было предложено разделять матрицы на две составляющие, первая из которых учитывает только прямой сигнал, то есть излучение без отражений, а вторая — только отражённое излучение. Первая составляющая рассчитывается для мелкой пространственной сетки источников и хранится в разреженном виде, так как содержит в основном нули. Вторая составляющая рассчитывается только для выделенных ячеек пространственной сетки, служащих узлами для её последующей интерполяции на любую точку пространства (похожий способ, но для диагностики потока нейтронов был предложен в [2]). Узлы интерполяции выбираются по заданному алгоритму, учитывающему, что матрица переноса отражённого излучения является резкой функцией пространственной координаты вблизи наблюдаемых участков первой стенки, а также на границах зон затенения, расположенных преимущественно в диверторе. Получаемые таким способом матрицы переноса могут быть использованы с любым пространственным распределением излучения плазмы и занимают в десятки раз меньше места по сравнению с неоптимизированным способом хранения.

Синтетические изображения рассчитываются с помощью свёртки пространственных профилей светимости плазмы с матрицами переноса лучей, при этом для расчёта неотражённого сигнала профиль светимости интерполируется на ячейки сетки матрицы переноса неотражённого излучения, а для расчёта отражённого сигнала матрица переноса отражённого излучения интерполируется на ячейки сетки профиля светимости. Сравнение предложенного способа расчёта с расчётом трассировкой лучей для заданного пространственного профиля светимости показало идентичность изображений, получаемых обоими способами, при этом свёртка профиля светимости с интерполируемыми матрицами переноса лучей выполняется в сотни раз быстрее трассировки лучей.

Поддержка вышеописанного способа быстрого расчёта изображений для видеокамер ИТЭР была добавлена в систему IMAS (Integrated Modelling & Analysis Suite) [3].

Литература

- [1]. S. Kajita, E. Veshchev, R. Barnsley, M. Walsh, *Contrib. Plasma Phys.*, 2016, 56, 837.
- [2]. A.O. Kovalev, A.R. Polevoi, E.I. Polunovskiy, L. Bertalot, Yu.A. Kashchuk, D.V. Portnov, A. Loarte, M. Loughlin, S. D. Pinches, *J. Fusion Energy*, 2020, 39, 40.
- [3]. F. Imbeaux, S.D. Pinches, J.B. Lister, Y. Buravand, T. Casper et al, *Nucl. Fusion*, 2015, 55 123006.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И СБОРА ДАННЫХ ДИАГНОСТИКИ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ДЛЯ ИТЭР

Миронов М.И., Афанасьев В.И., Мельник А.Д., Наволоцкий А.С., Несеневич В.Г.,
Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В., Шмитов Р.Ю.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.245

Диагностика по потокам атомов изотопов водорода, испускаемых плазмой [1], входит в качестве обязательной в состав диагностического комплекса ITER [2], ее основной задачей является измерение изотопного соотношения термоядерного топлива nD/nT в центре и на периферии плазмы. Другая важная задача этой диагностики – измерение функций распределения ионов водорода в плазме в кэВ и МэВ диапазонах энергии.

В настоящее время диагностика находится на стадии подготовки к защите технического проекта, важной частью которого является система управления и сбора данных. В представленной работе описаны результаты разработки этой системы в рамках упомянутого технического проекта.

В работе дано описание общей архитектуры используемого оборудования. Приведены результаты разработки и испытания специальной электроники - блоков предусилителей и согласования сигналов, поступающих с детекторов анализаторов атомов перезарядки, а также блока управления калибровочным источником ионов гелия. Представлены результаты компоновки и конструирования шкафов с аппаратурой.

В ходе разработки системы создана микропрограмма предварительной обработки оцифрованных сигналов с детекторов и отлажен механизм ее взаимодействия с сетевыми каналами обмена данных ИТЭР. Отработан механизм управления аппаратурой с помощью медленных контроллеров.

Кроме того в работе приведено описание общих алгоритмов управления и сбора данных, а также концепции управляющего программного обеспечения. Дано описание комплекта сопроводительной документации, который должен быть предоставлен для защиты технического проекта.

Литература

- [1]. Afanasyev V.A., Chernyshev F.V., Kislyakov A.I., Kozlovski S.S., Lyublin B.V., Mironov M.I., Melnik A.D., Nesenevich V.G., Petrov M.P. and Petrov S.Ya. 2010. Neutral Particle analysis on ITER: present status and prospects. Nucl. Instr. and Meth. A 621 456-467.
- [2]. ITER Physics Basis. Chapter 7, Nucl. Fusion 47 (2007) S337–S384.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

^{1,2}Алябьев И.А., ^{1,2}Цыбенко Ю.В., ^{1,2}Бирюлин Е.З., ^{1,2}Позняк И.М., ^{1,2}Новоселова З.И.,
^{1,2}Федулаев Е.Д., ³Путрик А.Б.

¹МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия, aliabev.ia@phystech.edu

²ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк Россия,

³ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.246

Защитные покрытия дивертора и первой стенки ИТЭР будут подвергаться интенсивному плазменно-тепловому воздействию в процессе работы реактора. Экстремальное воздействие на облицовочные материалы будет достигаться во время переходных процессов – срывов шнура и периферийных локальных неустойчивостей (ELM). Фактор теплового воздействия при ELM-событиях составит 15–300 МДж/м²с^{0.5}, а при срывах – 90–2000 МДж/м²с^{0.5}. При этом пороги плавления материалов дивертора и первой стенки – вольфрама и бериллия – составляют 50 МДж/м²с^{0.5} и 28 МДж/м²с^{0.5} [1]. Эрозия облицовочных покрытий за счёт перемещения расплава повлияет на ресурс реактора и требует изучения. В проведённых ранее на установке КСПУ-Т экспериментах показано, что разрушение покрытий будет происходить преимущественно за счёт перемещения расплавленного поверхностного слоя [2]. Ввиду сложности этого явления нет полного понимания происходящих физических процессов, поэтому требуется развитие численных моделей и сравнение результатов расчета с экспериментом.

В данной работе представлена расчетная модель, описывающая поведение металла под действием мощного плазменного потока. Модель основана на системе сильно связанных уравнений теплопроводности и гидродинамики. Чтобы затормозить движение материала в твёрдой фазе, применен метод эквивалентной вязкости и введена демпфирующая сила. Свойства материала в модели являются температурно-зависимыми. Для описания теплоемкости в фазовых переходах применен подход эквивалентной энтальпии. В модели учтено испарение материала. Со стороны плазмы на материал действуют два внешних фактора: градиент давления и сила трения. При расчете движения расплава учитывается наличие внешнего магнитного поля.

С помощью данной модели получены значения скорости и перемещения расплава при различных значениях мощности плазменного воздействия. Рассмотрено влияние распределения давления и плотности мощности плазменного потока на итоговый профиль поверхности. Показано, что перемещение расплава нельзя объяснить только лишь наличием градиента давления плазмы по поверхности мишени, что подтверждает выводы работы [2]. Проведено моделирование движения расплава при наличии внешнего магнитного поля. Показано, что включение в модель дополнительной силы трения плазмы позволяет добиться лучшего совпадения результатов моделирования с результатами эксперимента. Результаты расчетов подтверждают образование кольцевой волновой структуры на поверхности мишени, что было обнаружено экспериментально [2]. Показано, что данная особенность связана с периодическим натеканием расплава на уже остывший участок поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках договора № 17706413348220000170/35-22/01 от 28 апреля 2022 года.

Литература

- [1]. Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F. et al. A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status. // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – V.438. – P.S48-S56.
- [2]. Позняк И.М., Климов Н.С., Подковыров В.Л. и др.– ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, 2012, Т.35, №4, С.23-33.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА В ПРОТОТИПЕ ИНЖЕКТОРА ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ НЕЙТРАЛОВ

Сотников О.З., Бельченко Ю.И., Санин А.Л., Иванов А.А., Горбовский А.И.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия
e-mail: O.Z.Sotnikov@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.247

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, основанный на ускорении и нейтрализации пучка отрицательных ионов водорода [1].

В разрабатываемом инжекторе ИЯФ пучок отрицательных ионов, формируемый в высокочастотном поверхностно-плазменном источнике ионов, транспортируется через вакуумную секцию с отклоняющими магнитами на вход одноапертурного ускорителя, в котором осуществляется доускорение пучка до полной энергии 0,4 – 0,5 МэВ. Для конверсии ускоренных отрицательных ионов предполагается использовать высокоэффективную плазменную мишень [2].

В докладе описываются результаты экспериментов по формированию пучка с током до 1.5 А и по его транспортировке через ЛЕВТ на вход широкоапертурного ускорителя, а также результаты экспериментов по ускорению пучка до энергии 340 кэВ [3]. При диаметре входной апертуры \varnothing 260 мм восьми-зазорного ускорителя ускорено и проведено к калориметру 60 % тока пучка, полученного в источнике, и до 90% тока пучка, проведенного на вход ускорителя. Дальнейшее увеличение эффективности прохождения пучка через ЛЕВТ и его ускорения предполагается получить за счет повышения энергии пучка, выходящего из источника, и точного прицеливания пучка на ось ускорителя.

Приводятся зависимости характеристик пучка от напряжений на электродах ионно-оптической системы источника, исследована эффективность транспортировки и ускорения пучка при различных вакуумных условиях.

Работы выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (FWGM-2022-0020).

Литература

- [1]. 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.
- [2]. Емелев И.С., Иванов А.А., Исследование конверсионной плазменной мишени с мультипольным магнитным полем, Физика плазмы, 2020, **46**, 1.
- [3]. Sotnikov O., Ivanov A., Belchenko Yu., Gorbovsky A., Deichuli P., Dranichnikov A., Emelev I., Kolmogorov V., Kondakov A., Sanin A. and Shikhovtsev I., Development of high-voltage negative ion based neutral beam injector for fusion devices, Nuclear Fusion, 2021, **61**, 116017

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ ГАЗА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ УВЕЛИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ МК-200 X8 ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИТЭР

Бирюлин Е.З., Цыбенко В.Ю., Позняк И.М., Алябьев И.А.,
Новоселова З.И., Федулаев Е.Д.

ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия, teufida@gmail.com
МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия, biriulin.ez@phystech.edu

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.248

Во время работы ИТЭР ожидается интенсивное плазменное и тепловое воздействие на защитные покрытия вакуумной камеры токамака-реактора. При переходных плазменных процессах (ELM-ы и срывы) интенсивность тепловых потоков на стенку будет многократно превышать пороги плавления вольфрама и бериллия, что повлечет их интенсивную эрозию. Для улучшения конструкции защитных покрытий вакуумной камеры реактора и разработки методов их защиты от воздействия со стороны плазмы необходимы исследования механизмов эрозии материалов под действием интенсивных потоков плазмы. Условия, ожидаемые во время переходных плазменных процессов в ИТЭР, наиболее полно воспроизводятся в лабораториях на установках с плазменными ускорителями.

Для расширения возможностей экспериментального моделирования переходных процессов в термоядерном реакторе необходимо дальнейшее развитие техники плазменных ускорителей. Улучшения должны быть направлены на повышение энергоэффективности, мощности, ресурса, увеличение эффективности использования плазмообразующего газа, уменьшение количества примесей в плазме. В ГНЦ РФ ТРИНИТИ (Москва, Троицк) создаётся плазменный ускоритель нового поколения МК-200 X8. Для инжекции рабочего газа в межэлектродный зазор ускорителя разработана специальная система газонапуска. Газ впрыскивается в рабочий объем с помощью 8 быстродействующих клапанов в направлении от внешнего (анода) к внутреннему (катоде) электроду. Это позволяет создать компактное газовое распределение с повышенной плотностью у катода. Ожидается, что такое распределение позволит стабилизировать неустойчивость плазмы, обусловленную неравномерностью ее разгона по сечению межэлектродного зазора [1], а также уменьшит дисперсию скоростей в плазменном сгустке на выходе ускорителя.

Цель данной работы – исследование системы газонапуска плазменного ускорителя МК-200 X8. Для этого проведены газодинамические расчёты методом контрольных объемов и выполнены экспериментальные измерения параметров системы. В силу азимутальной симметрии задачи в расчетной модели рассматривался сегмент геометрии с углом раствора 45° . Уравнения газодинамики решались на подвижной сетке, что позволило учесть движение штока клапана.

Для измерения характеристик новой системы инжекции газа использовались датчики давления. Неравномерность напуска по азимутальной координате измерялась с помощью 8ми датчиков давления РСВ Piezotronics. Для измерения распределения давления газа по длине центрального электрода разработана диагностическая система на основе пьезорезистивных датчиков Keller PAA-8 L. По результатам измерений удалось определить характеристики газового потока: скорость, плотность, число Маха, а также – оценить неоднородность газового распределения в межэлектродном зазоре. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными подтвердило достоверность численной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках договора ГК № Н.4к.241.09.22.1074 от 28.04.2022г.

Литература

- [1]. F.D. Witherspoon, A. Case, S.J. Messer, R. Bomgardner II, M.W. Phillips, S. Brockington, and R. Elton, Rev. Sci. Instrum. **80**, 083506 (2009).

ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ И КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА В МОДЕЛИ ВЗРЫВА НАНОФРАГМЕНТОВ ПОВЕРХНОСТИ

Цвентух М.М.

*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия,
mmtsv@lebedev.ru*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.249

Плазма вакуумной дуги формируется последовательностью электрических взрывов участков поверхности при протекании эмиссионного тока большой плотности. Аналогично процессу кипения, из материала катода образуются импульсно-периодические всплески эмиссионного тока и плазменные сгустки. Несмотря на существенно нестационарный и неоднородный характер процесса, некоторые свойства плазмы остаются примерно постоянными и изменяющимися для различных элементов. Так скорость ионов плазмы, летящей от катода, составляет примерно 5-20 км/с, а их средний заряд от +1 до +3.

Нами были предложены модели, связывающие критическое состояние вещества и параметры плазмы [1-3]. Была построена модель электрического взрыва наноразмерного перешейка жидкометаллической струи в условиях катодной плазмы вакуумной дуги. Двухтемпературная модель позволила описать величину среднего заряда ионов как $Z_{av} \approx 1 + T_{cr}/eV$, и импульс плазмы, отнесенный к протекающему заряду, как $\mu \sim 5 (M_i/M_p)^{1/2}$ г см/(с Кл), где M_i/M_p — отношение масс ионов и протонов. Получено согласие с известными (табличными) экспериментально измеренными величинами.

На основании результатов измерений среднего заряда и кинетической энергии ионов плазмы вакуумной дуги в рамках нашей модели была оценена критическая температура и cohesive energy для сплавов Nb-Al [4-5]. Применение полученных величин критической температуры в эмпирическом “cohesive energy rule” позволило описать экспериментально измеренные значения катодного падения потенциала и воспроизвести наблюдаемое V-образное отклонение от линейной зависимости. Полученные результаты позволяют оценивать критическую температуру и энергию связи вещества из параметров плазмы вакуумной дуги. Снижение энергии связи может быть связано со структурой рельефа поверхности, а именно наличием дефектов, размером более 1 нм. С этим же связано снижение среднего заряда ионов плазмы вакуумной дуги, горящей на слоях нановолокон вольфрама – W fuzz.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 22-12-00274.

Литература

- [1]. G.A. Mesyats and M.M. Tsventoukh, 2015 IEEE Trans. Plasma Sci. **43** 3320
- [2]. M.M. Tsventoukh 2018 Phys Plasmas **25** 053504
- [3]. M.M. Tsventoukh 2021 Phys. Plasmas **28** 024501
- [4]. Siegfried Zöhrer et al 2020 Plasma Sources Sci. Technol. **29** 025022
- [5]. M M Tsventoukh 2022 J. Phys. D: Appl. Phys. **55** 355204

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕЛИЯ ПОВЫШЕННОЙ ЭНЕРГИИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОЛЬФРАМА МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

^{1,2}Кулагин В.В., ¹Цвентух М.М.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия, mmtsv@lebedev.ru,

²НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, vvkulagin@mephi.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.250

В настоящее время вольфрам рассматривается в качестве одного из основных материалов обращенных к плазме элементов (ОПЭ) будущих термоядерных установок типа ИТЭР. В процессе эксплуатации реактора, работающего на DT-смеси, вольфрам будет подвержен мощным тепловым нагрузкам, а также бомбардировке нейтронами и ионами плазмы, одним из компонентов которой будет гелий. Облучение вольфрама гелием на начальном этапе инициирует образование кластеров/пузырей захваченного газа, а после приводит к формированию наноструктурированной морфологии поверхности по типу пуха [1].

Рост вольфрамового пуха ведет к изменению теплофизических свойств ОПЭ (например, снижению теплопроводности [2]), а также повышает вероятность зажигания униполярных дуг [3] и эрозии поверхности [4], что является крайне нежелательным эффектом из-за риска попадания тяжелой примеси в горячую плазму. Отдельный интерес представляет образование вольфрамового пуха при повышенной разности потенциалов между плазмой и ОПЭ – переходный режим рост-распыление нановолокон, когда возможно спонтанное инициирование взрывоэмиссионных импульсов на наноструктурированной поверхности. На данный момент эволюция нановолокон вольфрама достаточно подробно изучена в случае облучения поверхности вольфрама гелием низкой энергии (20 – 100 эВ) [5], однако детальное описание процессов формирования нанопуха в переходном режиме рост-распыление требует дополнительных исследований как первых этапов, при которых происходит кластеризация гелия, так и поздних фаз развития морфологии поверхности.

В рамках данной работы были получены первые результаты моделирования начальной стадии облучения поверхности вольфрама (доза $F \sim 10^{19} - 10^{20} \text{ м}^{-2}$) атомами гелия повышенной энергии. Моделирование проводилось для поверхности вольфрама (100) при условиях, характерных для переходного режима рост-распыление нановолокон: температура поверхности $T = 1000 \text{ К}$, начальная энергия приходящих атомов гелия $E = 100 - 500 \text{ эВ}$. На основе результатов моделирования был проведен анализ динамики захвата гелия, образования и развития гелиевых кластеров/пузырей в объеме вольфрама. В ходе анализа были определены профили энерговыделения внедренных атомов, а также распределения кластеров/пузырей гелия по глубине и размеру в зависимости от дозы и начальной энергии атомов. Результаты были получены методом молекулярной динамики в программном пакете LAMMPS [6].

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 22-12-00274. Моделирование проводилось при использовании ресурсов высокопроизводительного вычислительного центра НИЯУ МИФИ.

Литература

- [1]. M.J. Baldwin, R.P. Doerner, Nucl. Fusion, 2008, 48, 035001.
- [2]. S. Kajita, T. Yagi, K. Kobayashi, M. Tokitani et al., Results Phys., 2016, 6, 877-878.
- [3]. S. Kajita, Noiri Y., Ohno N., Phys. Scr., 2015, 90, 095604.
- [4]. S.A. Barendolts, D. Hwangbo, S. Kajita et al., Nucl. Fusion, 2020, 64, 044001.
- [5]. J.A.R. Wright, Tungsten, 2022, 5, 184-193.
- [6]. S. Plimpton, J. Comput. Phys., 1995, 117, 1-19.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБЛУЧЕНИЯ ВОЛЬФРАМА ИОНАМИ ГЕЛИЯ ИЗ ПЛАЗМЫ ВЧИ-РАЗРЯДА НА ГЕОМЕТРИЮ ФОРМИРУЮЩИХСЯ НАНОСТРУКТУР

^{1,2}Кукушкина М.С., ²Казиев А.В., ^{1,2,3}Колодко Д.В., ²Харьков М.М., ^{1,2}Рыкунов Г.И.,
¹Цвентух М.М.

¹Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия, ritakuk10@rambler.ru, mmtsv@lebedev.ru

²НИЯУ «МИФИ», Г. Москва, Россия

³Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, фрязинский филиал, г. Фрязино, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.251

Модификация рельефа поверхности под воздействием плазменных потоков имеет определяющее значение как для первой стенки термоядерных установок, так и для широкой области технологических приложений [1]. Явление наноструктурирования поверхностных слоев [2] проявляется не только в качестве нового фундаментального свойства взаимодействия плазмы с поверхностью, но и приводит к более легкому инициированию самостоятельных электрических разрядов на первой стенке термоядерных установок [3].

Для более глубокого понимания процесса формирования дуговых разрядов между плазмой и стенкой необходимо рассматривать механизмы возникновения взрывоэмиссионных ячеек катодного пятна на наноструктурированных вольфрамовых поверхностях (вольфрамовый пух или «W fuzz»), формирующихся в условиях первой стенки термоядерных установок [4, 5, 6].

Эксперименты по облучению вольфрама ионами гелия проводились на установке «Белла». Для генерации плазмы высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда использовалась плоская катушка, размещенная непосредственно в вакуумном объеме. Рабочая частота источника ВЧ-мощности 13.56 МГц. Для поддержания образцов при одинаковой температуре во время эксперимента использовался держатель с управляемым нагревом. Облучение производилось в диапазоне температур образцов от 1000 до 1500 К, при потенциале смещения на них от –150 В до –500 В.

Определены параметры разряда и величины тока и напряжения смещения, характерные для пробоев на структурированной поверхности вольфрама. Изучена динамика изменения структуры поверхности методом оптической регистрации излучения образца. Изучено влияние температуры образца во время обработки и энергии налетающих ионов на структуру поверхности. Влияние плотности тока на структуру поверхности изучалось путем изменения мощности разряда с подстройкой температуры образцов до фиксированного значения при поддержании их при одинаковом напряжении смещения.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта 22-12-00274.

Литература

- [1]. Yuriy I. Mamontov et al 2022, IEEE Trans. Plasma Sci. **50**(9) 2720
- [2]. Kajita et al 2016, Scientific reports **6** 30380
- [3]. Kajita et al 2018, Proc. 28th ISDEIV IEEE Greifswald, Germany, Sep 23-28, 2018, Invited talk
- [4]. M.M. Tsventoukh al , Phys. Plasmas **25** 053504
- [5]. M.M. Tsventoukh 2021 , Phys. Plasmas **28** 024501
- [6]. Yu.A. Zemskov et al 2021, J. Phys.: Conf. Ser. **2064** 012004

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЮМИНИЕВОГО ПРИПОЯ СТЕМЕТ®1502 ДЛЯ ПАЙКИ ПАКЕТНЫХ ПЬЕЗОСИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

¹Гурова Ю.А., ¹Бачурина Д.М., ¹Севрюков О.Н., ²Бабинов Н.А., ²Ходунов И.А.,
²Панкратьев П.А.

¹НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия, YAGurova@mephi.ru

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.252

В настоящее время актуальной проблемой является создание эффективных и надежных приводов движения, способных работать в экстремальных условиях эксплуатации – повышенные температуры, высокий вакуум и т.д. В связи с этим ведутся исследования и разработки исполнительных устройств нового типа, в том числе пьезоэлектрических.

Пьезосиловые элементы планируется использовать, в частности, для приведения в движение внутривакуумных компонентов диагностики томсоновского рассеяния (ДТР) международного термоядерного реактора ИТЭР. Условия работы ДТР характеризуются высокими радиационными нагрузками и температурой при прогреве, вибрацией и значительными перегрузками при возможных аварийных событиях [1]. В силу этого к эксплуатируемым в реакторе соединениям конструктивных элементов, в том числе и неразъемным, предъявляются весьма жесткие требования.

В данной работе исследовали возможность применения высокотемпературной пайки пьезосиловых элементов быстрозакаленным припоем на основе алюминия. Были спаяны столбики из пьезокерамических дисков ПКВ-460 и ТСВС-2 толщиной 1 мм с медным покрытием 3, 6, 9 мкм и электрическими выводами из медной фольги толщиной 50 и 100 мкм. Пайку проводили с аморфным ленточным припоем СТЕМЕТ®1502 толщиной 35 и 70 мкм

(Al–29,5Ge–3,9Si мас.%), $T_s = 425$ °C $T_I = 520$ °C при температуре 600 °C и выдержке в течении 10 минут при максимальной температуре [2].

Положительными характеристиками быстрозакаленных припоев являются высокая химическая и фазовая однородность, достигаемые при закалке металлических расплавов со скоростями 10^4 – 10^6 К/с за счет фиксации в твердом состоянии жидкоподобной аморфной структуры в состоянии пересыщенного твердого раствора или формирования нанокристаллической структуры.

Методом ЭДС-анализа на растровом электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP изучены микроструктуры паяных соединений и получены карты распределения химических элементов в паяном шве.

Отработан режим поляризации для пьезостолбика из 5 дисков ПКВ-460, на столбиках из 5 и 10 дисков ТСВС-2 опробован режим, взятый из литературных источников.

Показана возможность получения механически прочного соединения из пьезокерамик ПКВ-460 и ТСВС-2 с омеднением и фольгой из меди припоем СТЕМЕТ®1502.

Литература

- [1]. Mukhin E. et al. Hardware solutions for ITER divertor Thomson scattering // Fus. Eng. Design, 2017. Vol. 123. P. 686–689.
- [2]. Sevryukov O.N., Suchkov A.N., Guseva E.V. Brazing of modern engineering materials with SТЕМЕТ® amorphous brazing filler metals. “Ore and Metals” Publishing house, 2015. Vol. 2015, № 1. P. 45–49

СТЕМЕТ® – зарегистрированный товарный знак компании МИФИ-АМЕТО

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕРМОЯДЕРНОЙ МОЩНОСТИ ТОКАМАКА ИТЭР

Ковалев А.О., Родионов Р.Н., Воробьев В.А., Портнов Д.В., Кашук Ю.А.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, A.Kovalev@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.253

Эта работа посвящена анализу производительности радиометров термоядерных нейтронов ИТЭР: Диверторного монитора нейтронного потока (ДМНП), Монитора нейтронного потока (МНП) и Микрокамер деления (МКД). Средства диагностики будут измерять полный выход нейтронов и термоядерную мощность плазмы ИТЭР в широком диапазоне величин, 7 порядков. Системы могут быть абсолютно откалиброваны с очень хорошей точностью (до 10%) с использованием стандартизированных источников нейтронов (генераторов нейтронов и/или изотопных источников).

Плазма как источник нейтронов представляет собой пространственно распределенный объемный объект с изменяющимися во времени параметрами, такими как геометрия плазмы, положение магнитной оси и распределение нейтронов источника в полоидальном профиле плазмы.

Полная погрешность измерений представляет собой комбинацию двух факторов: статистической и систематической погрешности. Статистическая погрешность может быть минимизирована путем оптимизации массы чувствительного материала детекторов. Однако источники и возможный уровень систематической погрешности должны быть хорошо изучены на стадии проектирования.

Мы исследовали влияние выделенных параметров плазмы на систематическую погрешность измерений диагностик ДМНП, МНП и МКД. Для моделирования скорости реакции деления урана детекторов нейтронных диагностик в различные моменты времени был реализован подход с использованием функций Грина. В модель измерений были включены диапазоны линейных зависимостей, чувствительность детекторов к ДД или ДТ нейтронам источника, концепция стратегии калибровки со стандартным распределением нейтронов, текущую конструкцию систем. Статистическая погрешность была оценена методом средневзвешенного значения. Источниками систематической погрешности являются стратегия калибровки и принятые допущения, когда диагностические приборы в качестве счетчиков не могут различать сигналы, вызванные ДД и ДТ нейтронами источника. Такой эффект и его влияние на измерения был показан на примере сценариев ДД плазмы ИТЭР. В работе также приведены результаты исследования влияния эволюции параметров плазмы на систематическую погрешность измерений мониторов. Были рассмотрены различные методы оценки и компенсации систематической погрешности.

Усовершенствованные алгоритмы измерений и интеграция нейтронных диагностик в единую измерительную схему помогут уменьшить систематическую погрешность и достичь наилучшей возможной точности измерения параметров плазмы ИТЭР.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.22.1123 от 14 февраля 2022 г. «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году».

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО РАЗРАБОТКЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЮ И ПОСТАВКЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ИТЭР

Еникеев Р.Ш., Манзук М.В., Сапожников К.С., Серебров Р.А., Алексеев Д.И.,
Губанова Н.А.

АО НИИЭФА, г. Санкт-Петербург, Россия, enikeev@sintez.niefa.spb.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.254

Одним из важнейших направлений деятельности АО «НИИЭФА» является выполнение работ по пакету межправительственных соглашений о поставках высокотехнологичной продукции в обеспечение натурального вклада Российской Федерации в проект ИТЭР в части разработки, исследования, изготовления и поставки оборудования систем электропитания сверхпроводниковых катушек магнитной системы, включая коммутационную аппаратуру, сильноточные и высоковольтные шинопроводы, энергопоглощающие резисторы, системы управления и диагностики, а также цифровые комплексы для измерения токов и напряжений.

Наиболее ответственной частью соглашения о поставке является уникальная коммутационная аппаратура, обеспечивающая как оперативные переключения токов, необходимые для создания вихревого электрического поля, инициирующего плазменный разряд, так и быстрый вывод энергии, запасенной в сверхпроводниковых катушках, в случае перехода сверхпроводника в резистивное состояние. АО «НИИЭФА» должно изготовить и поставить в ИТЭР в общей сложности более 200 коммутационных аппаратов различных типов, включая аппараты, использующие для переключения энергию сжатого газа и индукционно-динамический привод, аппараты, использующие энергию детонации взрывчатых веществ, а также коммутационные устройства на основе различных полупроводниковых ключей.

Кроме того, в объем поставки входит 5.3 километра сильноточных алюминиевых шинопроводов, общим весом свыше 900 тонн вместе с опорными конструкциями и компенсаторами тепловых расширений, энергопоглощающие резисторы суммарным весом 1336 тонн, а также свыше 50 километров низкоиндуктивных коаксиальных кабелей. Изготовление подавляющей части оборудования в рамках соглашения о поставке ведется силами опытного завода АО «НИИЭФА».

В период с 2014 по 2020 гг. АО «НИИЭФА» успешно провело защиты рабочих проектов по всем компонентам систем электропитания, кроме оборудования, важного для обеспечения радиационной безопасности ИТЭР, что позволило перейти к стадии изготовления и успешно выполнять обязательства Российской Федерации по поставке оборудования для монтажа на площадку сооружения ИТЭР. Первая отгрузка оборудования состоялась в конце 2015 года.

По состоянию на конец 2022 года, АО «НИИЭФА» отправило в ИТЭР, в общей сложности, 182 трейлера с оборудованием систем электропитания суммарным весом 1812 тонн, в том числе 49 трейлеров в 2022 г. Это позволило завершить работы по монтажу всего оборудования в зданиях АС/ДС преобразователей, смонтировать шинопроводы в здании диагностики на уровне В2, включая шины, проходящие через разделительный барьер со зданием токамака. Кроме того, АО «НИИЭФА» поставило значительную часть коммутационного оборудования для уровня В2 здания диагностики, монтаж которого начнется в ближайшее время.

Вместе с тем, специалистами АО «НИИЭФА» ведется активная работа по проведению квалификационных испытаний оборудования системы электропитания катушек тороидального поля (важного для обеспечения радиационной безопасности ИТЭР) в части устойчивости к воздействиям постоянного магнитного поля, экстремальных значений факторов окружающей среды и ускорений, возникающих при землетрясениях.

Опыт, полученный коллективом АО «НИИЭФА» в процессе разработки оборудования, проведения многофакторных испытаний, подготовки и организации производства представляет интерес и может быть полезен сотрудникам других предприятий, работающим по направлению проектирования и изготовления оборудования для ИТЭР.

ПРОТОТИП МОДУЛЯ ДИВЕРТОРНОГО МОНИТОРА НЕЙТРОННОГО ПОТОКА ИТЭР

¹Гавриленко Д.Е., ^{1,4}Бурдаков А.В., ¹Иванцовский М.В., ²Кашук Ю.А.,
²Обудовский С.Ю., ²Степанов С. Б., ²Кормилицын Т. М. ¹Стешов А.Г.,
¹Шиянков С.В., ^{1,3,4}Шошин А.А.

¹Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

³Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

⁴Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.255

В рамках работы над прототипом диагностической системы ДМНП в ИЯФ СО РАН был полностью отработан производственный цикл изготовления и тестирования диагностики. В соответствии с требованиями ОИ ИТЭР, особое внимание было уделено разработке процедур специальных производственных процессов и методик неразрушающего контроля качества выполнения производственных операций.

По завершении производства в ИЯФ СО РАН был проведен цикл приёмочных испытаний, включающий:

Контроль геометрических размеров модуля ДМНП;

Контроль герметичности модуля ДМНП;

- Виброиспытания модуля ДМНП (механические испытания);
- Контроль вакуумного газоотделения модуля ДМНП.



Рисунок 1 – Прототип модуля ДМНП на вибростенде

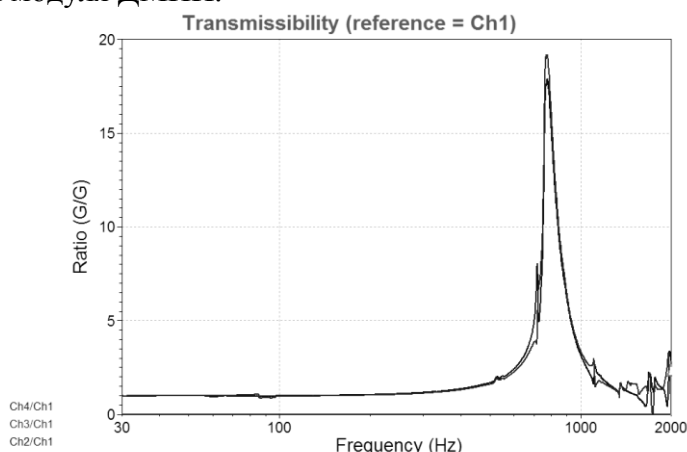


Рисунок 2 – Собственные резонансы прототипа модуля ДМНП

В результате проведения вакуумных испытаний прототипа ДМНП не было выявлено течей пробного газа (гелий). Таким образом, внутренние объемы изделия полностью герметичны и обеспечивают отсутствие утечек рабочих сред в вакуумную камеру установки ИТЭР. По результатам проведения механических испытаний прототипа ДМНП не было выявлено механических разрушений конструкции прототипа.

Результаты, полученные при проведении приемочных испытаний, подтвердили правильность выбранных инженерно-технических решений. На основе полученных данных была скорректирована конструкторская и технологическая документация проекта.

ПОДГОТОВКА ФИНАЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ ВЕРХНИХ ПОРТОВ 02, 07, 08 ИТЭР

¹Афанасенко Р.С., ⁴Бурдаков А.В., ²Буслаков И.В., ¹Высоких Ю.Г., Гавриленко Д.Е.,
⁴Грищенко А.М., Иванцовский М.В., ¹Кравцов Д.Э., Листопад А.А., ²Логинов И.Н.,
²Модестов В.С., ¹Портнов Д.В., ¹Родионов Р.Н., Рыжанков И.С., Селезнев П.А.,
Серемин В.В., ¹Сорокина Н.В., Суляев Ю.С., Шабунин Е.В., ²Шагниева О.Б., Шиянков
С.В., ^{3,4}Шошин А.А.

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

*¹ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, e-mail:
d.kravtsov@iterrf.ru*

*²Санкт-Петербургский государственный политехнический университет имени Петра
Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vmodestov@spbstu.ru*

*³Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия, e-mail:
a.a.shoshin@inp.nsk.su*

*⁴Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия,
e-mail: a.v.burdaakov@inp.nsk.su*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.256

Целью работы является разработка финальных проектов устройств для размещения диагностического и вспомогательного оборудования в верхних портах № 02 и № 08, а также подготовка к изготовлению устройств для размещения диагностического и вспомогательного оборудования в верхнем порту № 07 токамака ИТЭР. Диагностические порт-плаги являются составляющими строящегося крупнейшего в мире термоядерного реактора, аналогов которого не существует, следовательно, они станут уникальной разработкой, впервые создаваемой для жестких эксплуатационных условий.

В ходе прошедшего периода были выполнены следующие работы:

- Доработаны трехмерные модели порт-плагов, опорных рам в околопортовом пространстве и опорных рам в порт-камере для верхних портов № 02 и № 08 до уровня финального проекта;
- Согласованы интерфейсы между интегрируемыми диагностиками и устройствами для их размещения в верхних портах № 02 и № 08 после доработки их конструкций;
- Подготовлены документы к проведению защиты финальных проектов ВП № 02 и ВП № 08 в Организации ИТЭР;
- Проведена защита финального проекта ВП № 07, для чего был подготовлен комплект соответствующей технической документации и проведены инженерные расчеты доработанных конструкций систем верхнего порта № 07 с учетом замечаний защиты предварительного проекта;
- Изготовлены стандартные заготовки из стали для ДЗМ верхних порт-плагов №№ 02, 07 и 08;
- Изготовлены компоненты системы нейтронной защиты из карбида бора верхних порт-плагов №№ 02, 07 и 08;
- Подготовлены документация и производство к проведению Защиты готовности к производству в Организации ИТЭР верхнего порта № 07;
- Изготовлены кантовательные механизмы для сборки и обслуживания ДЗМ и порт-плагов на сборочной площадке ИЯФ СО РАН.

Полученные в ходе выполнения проекта результаты могут быть использованы при конструировании других порт-плагов ИТЭР, а также для больших экспериментальных термоядерных установок типа токамак. Результаты проводимых по проекту работ способствуют решению сложнейшей научно-технической задачи – созданию диагностических портов, работающих в сложных условиях уникальной установки ИТЭР.

СТАТУС РАЗРАБОТКИ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА ИТЭР

^{1,2}Мухин Е.Е., ¹Толстяков С.Ю., ¹Баженов А.Н., ¹Бочаров И.В., ¹Букреев И.М.,
¹Варшавчик Л.А., ¹Дохтаренко Д.В., ^{1,2}Дмитриев А.М., ^{1,2,3}Елец Д.И., ¹Ермаков Н.В.,
¹Жильцов Н.С., ¹Курские Г.С., ¹Коваль А.Н., ¹Люллин З.Г., ¹Марчий Г.В.,
¹Медведев О.С., ¹Николаенко К.О., ^{1,4}Орешко И.В., ¹Панкратьев П.А.,
^{1,2}Раздобарин А.Г., ^{1,4}Резанов Д.А., ¹Самсонов Д.С., ¹Сениченков В.А., ¹Соловей В.А.,
^{1,2}Снигирев Л.А., ¹Старовойтов Е.А., ¹Терещенко И.Б., ¹Ткаченко Е.Е.,
^{4,5}Чернаков П.В., ¹Чернаков А.П., ⁶Мокеев А.Н.

¹ФТИ им Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия,

²СПбГУ, физический факультет, г. Санкт-Петербург, Россия

³НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

⁴СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия

⁵ЗАО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург, Россия

⁶ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.257

Измерение параметров электронного компонента плазмы в диверторе преследует две основные цели: мониторинг режима работы дивертора, в том числе степень контакта плазмы с диверторными пластинами, и интерпретация спектроскопических измерений примеси в диверторе. Диапазон и точность измерения T_e 1 – 200 эВ с точностью 20% и n_e 10^{19} – 10^{22} м⁻³ с точностью 20% в диверторе ИТЭР вытекают из основных задач, стоящих перед диагностикой, и базируются на результатах моделирования режимов работы дивертора. Допустимое снижение точности при измерении температур $\sim 0,3$ эВ является отражением трудности измерения узких спектральных контуров вблизи мощной паразитной засветки на длине волны лазера, а также является разумным в том смысле, что одна из наиболее важных задач ДТР будет заключаться в обеспечении экспериментального подтверждения того, что в окрестности диверторной мишени возникает сильная рекомбинация. Поскольку скорость рекомбинации возрастает быстрее в области с T_e ниже 0,5 эВ по сравнению с интервалом 0,5–1,0 эВ, для валидации моделей достаточно того, чтобы диагностики обеспечивали измерение, которое может приблизительно различать эти области. Комбинированная лазерная диагностика ДТР и ЛИФ должна измерять пространственное распределение набора электронных, ионных и атомных параметров, который поможет лучше понять физику отрыва плазмы от диверторных пластин путем оценки скоростей реакции электронов, включая скорости ионизации, рекомбинации и интенсивности излучения, которые играют важную роль в охлаждении и рекомбинации потока плазмы, а также скоростей ион-нейтральных столкновений. Текущий статус диагностики ЛИФ включает ответственность за: (а) измерение n_{HeI} с использованием для оценки эффективности удаления гелиевой золы и (б) измерение ионной температуры T_i HeII. Измерение n_e по временной форме сигнала флуоресценции HeI измеренного ЛИФ предполагается использовать в качестве дополнительного метода абсолютной калибровки системы сбора и детектирования ДТР. Калибровку спектрального пропускания предполагается делать по одновременному измерению сигналов томсоновского рассеяния на нескольких длинах волн.

Доклад подготовлен как отчет о работе для Организации ИТЭР (контракт Росатома № 0 Н.4а.241.19.22.) и поддержан ФТИ им Иоффе (государственное задание РФ 0034–2019–0001).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ НА ВНУТРИВАКУУМНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ ИТЭР

Люллин З.Г., Бабинов Н.А., Бочарников В.А., Варшавчик Л.А., Когаков С.И.,
Старовойтов Е.А., Мухин Е.Е.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.258

В процессе работы реактора ИТЭР, для осуществления контроля режима работы и получения научной информации, будут широко использоваться оптические диагностики. Из-за значительной удаленности исследуемой плазмы от границы вакуума эти диагностики будут использовать внутривакуумные зеркала, которые будут подвержены воздействию потоков частиц, поступающих из плазмы ИТЭР. Данные потоки в основном состоят из частиц дейтерия и бериллия. Потоки высокоэнергичных атомов дейтерия могут приводить к эрозии поверхности зеркал, а потоки бериллия - к осаждению загрязняющих плёнок на поверхности зеркал. В процессе работы было проведено численное моделирование распыления поверхности первого зеркала оптической диагностики 55.C4 и последующего транспорта загрязнений в геометрии зеркала с защитным кожухом. Моделирование процессов позволяет сделать предварительные выводы об основных тенденциях деградации диагностической оптики. В качестве входных данных использованы параметры потоков частиц, опубликованные в статье 2021 года, в которой обсуждалась разработка системы очистки диагностических зеркал ВЧ-разрядом [1, 2]. Для моделирования процесса распыления поверхности и последующего транспорта частиц был использован код KITE [3]. Данный код позволяет проводить трехмерный расчет потоков частиц и их взаимодействие с поверхностью методом Монте-Карло, в случае, когда процессы проходят в разреженном газе с низкой степенью ионизации. Оптическая диагностика будет расположена в диверторной части ИТЭР. Расчеты проводились как в случае, когда магнитного поля нет и задан только поток частиц на поверхность первого зеркала, так и в случае, когда есть сильное магнитное поле и заряженные частицы падают как на поверхность зеркала, так и на поверхность кожуха напротив зеркала. Очевидна разница в том, что в присутствии магнитного поля кожух напротив зеркала активно распыляется, в то время как без магнитного поля происходит небольшое запыление этой области. Таким образом, в результате выполнения работ проведено численное моделирование процесса распыления и пересадения бериллия в процессе чистки узла первого оптического элемента. Выполнен анализ эффективности удаления бериллиевых осадков с первого оптического элемента диагностики ДТР в условиях наличия и отсутствия сильного магнитного поля. В результате проведенного моделирования показаны профили распыления, осаждения и эффективного распыления (чистки) поверхности зеркала и окружающих конструкций в случаях без и в присутствии магнитного поля ИТЭР. Сделаны выводы о том, что в текущей конструкции первого зеркала системы сбора рассеянного излучения скорость распыления бериллия превышает скорость напыления на всей поверхности зеркала.

Доклад подготовлен как отчет о работе для Организации ИТЭР (контракт Росатома № 0 Н.4а.241.19.22.) и поддержан ФТИ им Иоффе (государственное задание РФ 0034–2019–0001).

Литература

- [1]. Brooks J.N., Allain J.P. (2008). Particle deposition and optical response of ITER motional Stark effect diagnostic first mirrors. *Nuclear Fusion*, 48(4), 045003. doi:10.1088/0029-5515/48/4/045003.
- [2]. Shigin P. et al. RF discharge mirror cleaning system development for ITER diagnostics // *Fusion Engineering and Design*. – 2021. – Т. 164. – С. 112162.
- [3]. 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.

КРУПНОГАБАРИТНЫЕ СОБИРАЮЩИЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТОМСОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В ДИВЕРТОРЕ ИТЭР

¹Терещенко И.Б., ¹Самсонов Д.С., ¹Мухин Е.Е., ¹Марчий Г.В., ²Губаль А.Р.,
²Михайловский В.Ю., ³Капустин Ю.В., ¹Коваль А.Н., ¹Толстяков С.Ю.,
¹Снигирев Л.А., ⁴Комаревцев И.М., ⁵Маринин Г.В., ⁵Терентьев Д.В.,
⁶Городецкий А.Е., ⁶Залавутдинов Р.Х., ⁶Маркин А.В., ⁶Буховец В.Л., ⁴Модестов В.С.,
⁴Кириенко И.Д., ⁴Буслаков И.В., ⁷Чернаков П.В., ⁸Мокеев А.Н

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

²Институт химии СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

³НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия

⁴СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия

⁵Русские Технологии, г. Санкт-Петербург, Россия

⁶ИФХЭ РАН, г. Москва, Россия

⁷АО «Спектрал-Тех», г. Санкт-Петербург, Россия

⁸ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.259

Собирающие системы оптических диагностик ИТЭР должны обеспечить долговременную оптическую стабильность в условиях значительных эксплуатационных, радиационных, тепловых и прочих нагрузок. Такие системы содержат значительное количество зеркал, что предъявляет высокие требования к коэффициенту отражения каждого зеркала [1]. Одной из возможных причин деградации оптической поверхности зеркал является аварийный выброс пара. В случае такой аварии все элементы вакуумного объема ИТЭР продолжительное время находятся под воздействием высокой влажности более 90% и температур более 240°C.

Наиболее подходящим материалом с точки зрения коэффициента отражения в видимой и ближней ИК области является Ag. Известно, что на Ag необходимо формировать защитное покрытие, поскольку оно подвержено коррозии при воздействии ионов H^+ и OH^- , присутствующих в водяном паре [2]. В качестве типа защиты отражающего слоя Ag выбран барьерный – формирование тонкого многослойного диэлектрического покрытия, полной толщиной не более 30 нм, что значительно меньше длин волн из рабочего диапазона и потому не подвержено влиянию явления интерференции. Проведенные эксперименты показали, что увеличение количества интерфейсов в защитном покрытии уменьшает падение отражения после экспозиции в паре и при 7 слоях оно практически отсутствует. Это можно объяснить тем, что наличие большего числа интерфейсов приводит к замедлению протекания коррозии.

Помимо оптического покрытия на отражающую способность зеркал оказывает влияние качество подготовки поверхности перед напылением. Поскольку абразивное полирование SS 316L(N)-IG приводит к образованию нарушенного слоя глубиной порядка 0.3 мкм, а также ухудшению качества поверхности на краях, то наиболее перспективным методом полирования является магнито-реологическая полировка (МРП), где эти проблемы отсутствуют.

В качестве оценки качества полирования, с точки зрения использования данного зеркала в системе сбора излучения, применен математический аппарат, в основе которого лежит так называемая двулучевая функция отражательной способности (ДФОС).

Доклад подготовлен как отчет о работе для Организации ИТЭР (контракт Росатома № 0 Н.4а.241.19.22.) и поддержан ФТИ им Иоффе (государственное задание РФ 0034–2019–0001).

Литература

- [1]. Samsonov D.S. et al. // Nuclear Fusion. 62, 2022. no. 8 p. 086014
- [2]. Folgner K.A. et al. // Applied Optics. 59. 2020. no. 5. A187

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЧ-РАЗРЯДА ДЛЯ ЧИСТКИ ПЕРВЫХ ЗЕРКАЛ ОПТИЧЕСКИХ ДИАГНОСТИК ИТЭР МЕТОДОМ ЧАСТИЦ-В-ЯЧЕЙКАХ

¹Варшавчик Л.А., ¹Когаков С.И., ¹Люллин З.Г., ¹Старовойтов Е.А., ^{1,2}Мухин Е.Е.

¹ФТИ им Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия,

²СПбГУ, физический факультет, г. Санкт-Петербург, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.260

Оптические элементы внутривакуумных диагностик ИТЭР будут подвержены загрязнению распыленными материалами первой стенки и других технических конструкций, что может привести к потере работоспособности диагностик. Для предотвращения запыления диагностических зеркал предполагается их чистка между разрядами ИТЭР потоками ионов благородных газов (гелия) в емкостном ВЧ разряде, в котором одним из электродов является сама очищаемая поверхность [1]. Численное моделирование такого ВЧ разряда в геометрии узла первого зеркала позволит оптимизировать систему чистки.

Моделирование ВЧ разряда в объеме узла первого зеркала диагностики ИТЭР является сложной задачей, в первую очередь из-за необходимости проведения полностью трехмерных расчетов и использования нерегулярной расчетной сетки для корректного описания границ. Помимо этого, важным требованием является выполнение условия неразрывности тока на электродах, что приводит к нестандартной постановке задачи расчета локальных электрических полей в объеме из-за необходимости учета тока смещения. Для моделирования был выбран метод частиц-в-ячейках.

Для реализации моделирования ВЧ разряда в описанных условиях проводится разработка соответствующих модулей в дополнение к уже существующему Монте-Карло коду КИТе [2], созданному в нашей лаборатории. КИТе позволяет моделировать транспорт нейтральных частиц и ионов в сложных 3D геометриях с учетом столкновений с атомами фонового газа (имеющих собственную тепловую скорость), а также столкновений с поверхностями окружающих конструкций, с возможностью включения внешних электрического и магнитного полей.

Задача моделирования ВЧ разряда на базе существующего задела кода КИТе состоит из следующих блоков: 1) ввод в код электронов и связанных с ними неупругих реакций; 2) создание математической модели и реализация расчета локальных электрических полей на основе распределения объемного заряда; 3) решение уравнения электрической цепи, в которой канал разряда является ее элементом с сосредоточенными параметрами. В настоящий момент разработка данных основных этапов завершена и проводится отладка и тестирование кода на простых моделях.

После завершения этапа тестирования будут проводиться расчеты в геометриях узла первого зеркала диагностик ИТЭР. Данный подход позволит уменьшить время на разработку конструкций диагностик и найти оптимальные работоспособные решения.

Доклад подготовлен как отчет о работе для Организации ИТЭР (контракт Росатома № 0 Н.4а.241.19.22.), поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС» и работами ФТИ им Иоффе в рамках государственного задания РФ 0034–2019–0001.

Литература

- [1]. Shigin P. et al. RF discharge mirror cleaning system development for ITER diagnostics // Fusion Engineering and Design. – 2021. – Т. 164. – С. 112162.
- [2]. Varshavchik L. et al. Three-dimensional simulation of neutral transport in gases and weakly ionized plasmas (2021) Plasma Physics and Controlled Fusion, 63 (2), art. no. 025005

ПРОГРЕСС В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ПОРТА 11 ИТЭР

²Кравцов Д.Э., ^{1,5}Бурдаков А.В., ³Буслаков И.В., ¹Шарафеева С.Р., ¹Селезнев П.А.,
¹Рыжанков И.С., ¹Иванцовский М.В., ³Кириенко И.Д., ¹Гавриленко Д.Е.,
³Лобачев А.М., ³Логоинов И.Н., ¹Шабунин Е.В., ³Модестов В.С., ¹Норышев Е.А.,
³Пожилов А.А., ¹Суляев Ю.С., ³Шагниев О.Б., ¹Шиянков С.В., ^{1,4,5}Шошин А.А.

¹ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия, e-mail: a.a.listopad@inp.nsk.su

²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, e-mail:
e.alexandrov@iterrf.ru

³СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия, e-mail: vmodestov@spbstu.ru

⁴НГУ, г. Новосибирск, Россия, e-mail: a.a.shoshin@inp.nsk.su

⁵НГТУ, г. Новосибирск, Россия, e-mail: a.v.burdakov@inp.nsk.su

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.261

За прошедший год был выполнен очередной этап изготовления поставочных компонентов экваториального порта (ЭП) № 11 токамака ИТЭР. В частности, выполнено глубокое сверление каналов охлаждения в корпусе диагностического защитного модуля (ДЗМ) №2 в соответствии с разработанными в ИЯФ технологиями и методами контроля. Проведённые инженерные расчёты подтверждают заложенные в техническом задании параметры температурных полей сборки ДЗМ, а также их механическую прочность для наиболее тяжёлых сценариев работы ИТЭР.

На экспериментальном производстве ИЯФ проведена международная аттестация процедуры ручной сварки типичных для производства компонентов порт-плага ИТЭР, а также аттестация сварщиков в соответствии с требованиями серии EN ISO 15614. Освоена специализированная установка для роботизированной сварки, специалисты ИЯФ с её помощью успешно выполнили типичные для поставочных изделий ИТЭР сварные швы. Установка подготовлена к процедуре квалификации и аттестации.

На интеграционной площадке ИЯФ для окончательной сборки поставочных изделий ИТЭР был установлен опытный образец подсистемы ультразвукового контроля ДЗМ для перемещения датчика с системой автоматической подачи контактной жидкости. Данное устройство предназначено для автоматизации позиционирования на поверхности ДЗМ сканирующей головки для ультразвукового контроля сварных швов.

Продолжается изготовление компонентов нейтронной защиты с использованием керамических блоков из спечённого карбида бора. Производство керамики должно соответствовать утвержденной Организацией ИТЭР спецификации ITER_D_457ТВН и чертежам ITER_D_X2GWTZ. Вакуумные и прочностные испытания керамических блоков подтверждают возможность их использования внутри вакуумной камеры ИТЭР.

В докладе обсуждается подготовка производственных мощностей ИЯФ СО РАН к изготовлению и сборке оборудования для размещения диагностических систем в соответствии с правилами и требованиями французского кода RCC-MR 2007. В частности, идёт процесс квалификации специальных производственных процессов, используемых в процессе изготовления вакуумных изделий для ИТЭР, классифицируемых как часть объекта ядерной энергетики.

СТАТУС I&C СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ВЕРТИКАЛЬНАЯ НЕЙТРОННАЯ КАМЕРА

Гужев Д.И., Нагорный Н.В., Немцев Г.Е., Нестеренко В.М., Миронова Е.Ю.,
Мионов А.Ю., Портоне С.С.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, D.Guzhev@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICSPAF.2023.50.2023.1.1.262

В рамках российского вклада в проект ИТЭР Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР» разрабатывает диагностическую систему Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК). Данная система предназначена для определения характеристик нейтронов плазмы, полученной как в результате D-D реакций, так и в результате D-T. Диагностика позволит оценить плотность мощности термоядерного синтеза, плотности α -источника, профиля излучательной способности нейтронов и α -источника, профиль температуры ионов, мощность термоядерного синтеза и другие параметры.

Данная диагностика состоит из двух подсистем – нижняя и верхняя. Всего будет использовано 12 детекторных модулей, каждый из которых состоит из двух камер деления и двух алмазных детекторов. Основной задачей системы сбора данных этой диагностики будет являться обработка данных от этих датчиков.

В настоящее время для диагностики ВНК разработан макет системы сбора данных, который был успешно протестирован. Макет включал в себя алмазный детектор, предусилитель, оптический передатчик и приемник, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), модуль FlexRIO с встроенной программируемой логической интегральной схемой. На последнем модуле реализован блок обработки сигналов, поступающих на вход АЦП.

Было также разработано программное обеспечение верхнего уровня. К нему относятся экраны операторов в среде Control System Studio и высокоуровневые драйверы устройств. Эти драйверы позволяют организовать взаимодействие с блоком обработки сигналов, реализовать машину состояний, осуществить запись сырых данных при помощи интерфейса специализированной сети архивации.

Также в рамках подготовки к защите проекта диагностической системы (Final Design Review) доработаны аппаратная и программная архитектуры, которые были отражены в проекте специализированной среды разработки Enterprise Architect.

Полученные результаты будут использованы при защите финального проекта диагностики в МО ИТЭР.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году».

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

¹Науменко Н.Н., ²Тугаринов С.Н., ²Красильников А.В., ³Крупин В.А., ²Кузьмин Н.В.,
³Нурғалиев М.Р., ²Серов В.В., ²Серов С.В.

¹ЗАО «Солар», г. Минск, Республика Беларусь

²ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

³НИЦ Курчатowskiй Институт, г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.263

В работе описан разработанный и созданный комплекс диагностической аппаратуры для спектроскопической диагностики плазмы с термоядерными параметрами. В состав этого комплекса аппаратуры входят: спектрометр-полихроматор высокого разрешения (СПВР), разработанный для активной спектроскопической диагностики плазмы и обеспечивающий работу одновременно в трех спектральных диапазонах 468 ± 5 нм, 529 ± 5 нм и 656 ± 6 нм [1], светосильный сканирующий спектрометр высокого разрешения для видимого и ближнего ИК диапазонов, а также система для прецизионного дистанционного позиционирования оптических элементов. Изначально весь этот комплекс диагностической аппаратуры создавался для активной спектроскопической диагностики в рамках проекта ИТЭР. Активная спектроскопия позволяет измерять такие важнейшие параметры плазмы, как профили ионной температуры, скорости тороидального и полоидального вращения, а также концентрацию легких примесей. Испытания созданного комплекса диагностической аппаратуры, проведенные как в лабораторных условиях, так и в реальных экспериментах на установке токамак Т-10, показали выдающиеся характеристики этой аппаратуры.

Созданный комплекс диагностической аппаратуры предполагается использовать в рамках Российской Национальной программы на вступающей в строй установке Т-15МД и на проектируемой установке TRT.

В работе представлены результаты лабораторных исследований характеристик созданного комплекса диагностической аппаратуры, а также результаты исследований в области физики плазмы, проведенных на установке Т-10 с использованием разработанной диагностической аппаратуры [2,3].

Несмотря на то, что изначально описанный комплекс диагностической аппаратуры создавался для активной спектроскопической диагностики, созданная аппаратура может быть использована для широкого круга задач прикладной спектроскопии, как в области физики плазмы, так и в исследовании свойств любых других излучающих объектов.

Литература

- [1]. Тугаринов С.Н., Белокопытов А.А., Кулаков Д.М. и др. // ПТЭ. 2016. № 1. с. 102-107.
- [2]. Ключников Л.А., Крупин В.А., Коробов К.В. и др. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2016. т. 39, вып. 1. с. 95 – 104.
- [3]. Klyuchnikov L.A., Krupin V.A., Nurgaliev M.R. et al. // Review of Scientific Instruments 87, 053506 (2016).

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗОК НА ПОВРЕЖДЕНИЕ БЕРИЛЛИЯ

¹Базалеев Е.В., ¹Куприянов И.Б., ²Подковыров В.Л., ²Федулаев Е.Д., ³Васенин С.М.

¹*Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А.А. Бочвара, г. Москва, Россия*

²*ГНЦ РФ ТРИНИТИ, г. Москва, округ Троицк, Россия*

³*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.264

Панели первой стенки главной камеры ИТЭР будут полностью облицованы бериллием. Основными причинами выбора бериллия в качестве материала облицовки первой стенки ИТЭР являются его низкий атомный номер, высокие характеристики поглощения кислорода, а также высокая теплопроводность. Во время горения плазмы в ИТЭР на бериллий, помимо воздействия циклических тепловых нагрузок (нормальных событий), будут также воздействовать высокие переходные тепловые нагрузки, такие как ELM (краевая локальная мода), срывы плазмы, VDE (вертикальное смещение плазмы) и т.д. (нестационарные события). Эти переходные импульсные нагрузки вызывают быстрый нагрев поверхности бериллия и могут привести к значительным изменениям в поверхностных и приповерхностных областях, таких как потеря материала, плавление, растрескивание, испарение и образование бериллиевой пыли, а также удержание изотопов водорода как в облицовке, так и в пыли. В экспериментах по моделированию поведения бериллия в ИТЭР необходимо принимать во внимание также и магнитное поле, воздействующее на материал при облучении плазменными потоками.

В данной статье представлены результаты экспериментов, выполненных в АО ВНИИНМ на установке КСПУ-Ве, по исследованию повреждения поверхности образцов теплозащитной облицовки из бериллия при облучении импульсными потоками дейтериевой плазмы, имитирующими воздействия ЭЛМ-событий плазмы в ИТЭР. Установка КСПУ-Ве представляет собой одностадийный коаксиальный квазистационарный плазменный ускоритель. Она способна обеспечить плазменные (водородные или дейтериевые) и радиационные тепловые нагрузки на поверхности мишени, имитирующие ELM, срывы плазмы и смягченные срывы, ожидаемые в ИТЭР. Макеты из бериллия специальной конструкции были испытаны в потоках дейтериевой плазмы (6 см в диаметре) с длительностью импульса 0,3 мс при тепловой нагрузке 0,6 МДж/м² до 20 выстрелов. Угол между потоком плазмы и поверхностью макета составлял 45° и 90°. Индукция магнитного поля (В) у поверхности макетов составляла 0,6 Тл. Во всех экспериментах поток плазмы двигался вдоль магнитного поля. В экспериментах исследовались две марки бериллия, допущенные к использованию в ИТЭР: ТГП-56ПС (РФ, АО ВНИИНМ) и S-65С (США, Materion Brush). Представлены данные по влиянию магнитного поля 0,6 Тл на эрозию и поверхностное повреждение бериллия при тепловой нагрузке 0,6 МДж/м². Полученные экспериментальные данные используются для проверки соответствующих числовых моделей и для оценки времени жизни бериллиевой облицовки.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ И ЗАХВАТА ДЕЙТЕРИЯ В ВОЛЬФРАМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ELM-ПОДОБНЫМИ ИМПУЛЬСНЫМИ ПОТОКАМИ ДЕЙТЕРИЕВОЙ ПЛАЗМЫ С ПРИМЕСЯМИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ

^{1,2}Сергеечев А.А., ²Огородникова О.В., ^{1,2}Гуторов К.М., ²В.С. Ефимов, ²Н.С. Сергеев, ¹Подковыров В.Л., ¹Кутуков А.К., ¹Панин С.Е.

¹АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, округ Троицк, Россия,

e-mail: sergeechev@triniti.ru

²НИЯУ «МИФИ», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.265

На будущих термоядерных установках для смягчения импульсных тепловых нагрузок, возникающих вследствие переходных процессов в плазме (ELM-события, срывы) на облицовочные материалы, планируется использовать метод, основанный на инжекции в плазму некоторого количества инертного газа (неон, аргон, криптон) [1]. На установках PISCES, PSI и др. было показано, что наличие таких примесей может влиять как на процессы модификации и эрозии защитных покрытий, так и на захват дейтерия (D) в них [2-4].

В работе представлены результаты исследования модификации поверхности вольфрама и захвата дейтерия в нем после воздействия импульсными потоками плазмы. Образцы материалов были выполнены из вольфрамового сплава В-МП. Часть вольфрамовых образцов отличалась исходным наличием на поверхности He-индуцированных наноструктур (вольфрамовый «пух»). В качестве плазмообразующих газов выступали дейтерий и смеси из дейтерия с добавками гелия, аргона и неона. Облучение образцов материалов импульсными потоками плазмы производилось на квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе (КСПУ-Т) [5]. Выбранные экспериментальные параметры отражали условия ELM-событий, ожидаемых в ИТЭР [6]: плотность тепловой энергии, поглощаемая поверхностью вольфрама, составляла $0,7 \text{ МДж/м}^2$ при длительности импульса равной 1 мс (температура нагрева поверхности лежала ниже порога плавления вольфрама). Количество импульсов варьировалось в интервале от 1 до 10.

Добавление примесей в плазму незначительно влияло на характер модификации поверхности вольфрама. Исследование захвата D в вольфраме методом термодесорбционной спектроскопии показало, что накопление D растет по мере увеличения атомарной массы примеси – при облучении плазмой с примесью Ar наблюдается максимальный захват.

Воздействие плазмой, содержащей примесь He и Ne, на вольфрам с наличием «пуха» привело к плавлению наноструктур. В результате исходные нано-волокна агломерировали в более толстые волокна. Подобный эффект наблюдался ранее при облучении D плазмой без примесей [7]. Захват D при этом был меньше по сравнению с результатами, полученными на вольфраме без наличия наноструктур. В результате воздействия плазмой с добавкой Ar наличия волокон «пуха» не наблюдается, на поверхности присутствуют остаточные сферические наноструктуры. В данном случае количество захваченного D становится приближенно равным значениям, полученным при облучении вольфрама без «пуха» чисто D плазмой.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 20-12-00203.

Литература

- [1]. Lehnen M. et al., J. Nucl. Mater, 2015, 463, 39-48.
- [2]. Ishida M. et al., J. Nucl. Mater, 2015, 463, 1062-1065.
- [3]. Rasinski M. et al., Nucl Mater. Energy, 2017, 12, 302-306.
- [4]. Kreter A. et al., Nucl. fusion, 2019, 59, 8, 086029.
- [5]. Коваленко Д.В. и др., ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2014, В.4, С.39-48.
- [6]. Pitts R.A. et al., Nucl. Mater. Energy, 2019, 20, 100696
- [7]. Ogorodnikova, O.V. et al., J. Nucl. Mater., 2019, 515, 150–159.

КОЛЛИМАТОР АНАЛИЗАТОРА АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ИТЭР

¹Таскаев А.С., ¹Иванцовский М.В., ¹Бурдаков А.В., ¹Шиянков С.В., ¹Рыжанков И.С.,
¹Гавриленко Д.Е., ¹Серёмин В.В., ²Петров С.Я., ²Афанасьев В.И., ²Наволоцкий А.С.

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

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

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.266

Коллиматор диагностической системы «Анализаторы атомов перезарядки» располагается в экваториальном порту №11 в центральном диагностическом защитном модуле. Коллиматор предназначен для уменьшения нейтронного потока в околопортовое пространство и снижения активационной дозы в околопортовом пространстве. Патрубок приваривается непосредственно на гермоплиту портовой заглушки и обеспечивает вакуумно-плотное соединение камеры токамака с трубопроводом, который соединяет установку с анализаторами, установленными в портовой камере за биозащитой.

Коллиматор состоит из пяти секций. Основой каждой секции является блок коллиматора нейтронов, который изготавливается электроэрозионным способом из нержавеющей стали AISI 316LN-IG и представляет собой монолитную конструкцию. На одну из боковых сторон болтовым соединением на блок коллиматора каждой секции закрепляется кожух нейтронной защиты. Другая боковая сторона блоков служит для их крепления в другой половине кожуха, устанавливаемого заранее в диагностическом защитном модуле.

ИЯФ СО РАН совместно с субподрядчиком изготовил все пять секций коллиматора с кожухом нейтронной защиты, которые будут поставляться на площадку ИТЭР в составе диагностического защитного модуля №2 экваториального порта №11.

МАКЕТ ДЕТЕКТОРНОГО УЗЛА ВЕРХНЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ НЕЙТРОННОЙ КАМЕРЫ С УРАНОМ ДЛЯ ИТЭР

¹Таскаев А.С., ¹Иванцовский М.В., ¹Бурдаков А.В., ¹Шиянков С.В., ¹Рыжанков И.С.,
¹Гавриленко Д.Е., ¹Серёмин В.В., ²Немцев Г.Е.

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

²*ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия*

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.267

Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК) для установки ИТЭР будет состоять из двух частей, в каждой из которых будет располагаться по шесть детекторных узлов, объединенных в герметичные диагностические модули, снабжённые системой сервисного вакуума и системой водяного охлаждения. Верхняя ВНК будет установлена в верхний порт (ВП) №18 и должна являться составной частью ДЗМ этого порта, нижняя ВНК устанавливается в нижний порт (НП) №14.

В данном докладе демонстрируются макеты детекторных узлов, изготовленных в ИЯФ СО РАН. В 2022 году ИЯФ СО РАН принял от ИТЭР-Центра блок детектирования быстрых нейтронов (БДБН) - закрытый радионуклидный источник Камера КНТ 34-2 ВШЛК.418221.057 на основе U-238. Данный источник размещён внутри герметичного кожуха и заварен. Для проведения подобных операций с ЗРИ, таких как сварка, были специально обучены 4 человека как персонал категории «А» согласно НРБ-99/2009 СанПиН 2.6.1.2523-09.

СТАТУС РАБОТ ПО ПРОЕКТУ 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., ¹Листопад А.А., ⁵Лобачев А.М., ⁵Логинов И.Н.,
⁵Модестов В.С., ¹Рыжанков И.С., ¹Селезнев П.А., ¹Серемин В.В., 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, Новосибирск, РФ, e-mail:
m.v.ivantsivsky@inp.nsk.su

²Частное учреждение ГК «РосАтом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, РФ, e-mail:
d.kravtsov@iterrf.ru

³Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, РФ, e-mail:
a.v.burdakov@inp.nsk.su

⁴Новосибирский государственный университет, Новосибирск, РФ, e-mail:
a.a.shoshin@inp.nsk.su

⁵Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, РФ, e-mail: vmodestov@spbstu.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.268

Институт ядерной физики 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 (внутри вакуумная часть).

За прошедший год были существенные продвижения по каждому из направлений. Для экваториального диагностического порта №11 закончена защита финального проекта. Для верхних диагностических портов №№ 02, 07, 08 были закончены защиты предварительных проектов, для верхнего порта №07 проведено заседание по защите финального проекта внутривакуумной части. Для экваториального порта №11 были произведены кирпичи карбида бора в полном объеме необходимом для поставки порта в ИТЭР. Начато производство диагностических защитных модулей.

По вертикальной нейтронной камере идут работы по подготовки финального проекта верхней камеры к защите в 2023 году. Для диверторного монитора нейтронного потока изготовлен и испытан прототип, подготовлена конструкторская документация для изготовления первоплазменной части монитора. Для анализатора атомов перезарядки были изготовлены элементы нейтронной защиты для блоков коллиматоров.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОЙ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИТЭР

Павлова Г.С., Серов С.В., Тугаринов С.Н.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.269

Активная спектроскопическая диагностика (АС) используется на большинстве современных токамаков и будет применяться на установке ИТЭР для измерения концентрации, температуры и скорости ионов горячей плазмы [1, 2]. В горячей плазме изотопы водорода и легкие примеси полностью ионизованы и не излучают линейчатый спектр, поэтому применение пассивной спектроскопии ограничено внешними областями плазмы, где присутствуют атомы. В случае активной спектроскопии высокоэнергетический пучок атомов (например, атомов Н) инжектируется в плазму, и его частицы действуют как доноры электронов для ионов плазмы. Благодаря реакции перезарядки ионов плазмы на атомах пучка возникают водородоподобные ионы в возбужденном состоянии, которые излучают свет при переходе полученного электрона на более низкие энергетические уровни. Обработка спектров, получаемых с помощью АС, усложняется из-за наличия различных эффектов (таких как, например, эффект гало), вызывающих изменение профиля активной спектральной линии, из-за чего появляется дополнительная погрешность при определении параметров плазмы.

Работа посвящена моделированию влияния эффекта гало на точность измерений АС на установке ИТЭР. Моделирование проводилось для нескольких сценариев работы токамака с помощью двух кодов – Simulation of Spectra (SOS) [3] и FIDASIM [4]. Оба кода позволяют рассчитывать все компоненты спектров диагностики, но при этом используют разные методы и модели. Было проведено сравнение результатов моделирования, в ходе которого обнаружены и объяснены существенные различия в интенсивности смоделированных спектральных линий. Был рассчитан вклад эффекта гало в интенсивность линии активной перезарядки, и по результатам расчётов был сделан вывод, что влиянием эффекта гало в условиях токамака ИТЭР нельзя пренебречь. Также по результатам моделирования были оценены погрешности, вносимые эффектом гало в измерение параметров плазмы.

Литература

- [1]. Тугаринов С.Н. и др. Физика плазмы, 2004, т. 30, №2, стр. 147-154.
- [2]. Серов С.В., Тугаринов С.Н., von Hellermann M. ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2018, т. 41, вып. 2, стр. 89-94.
- [3]. von Hellermann M. et al. Atoms, 2019, v. 7, №1.
- [4]. Geiger B. et al. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2020, v. 62, №10.

ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИГНАЛОВ НЕЙТРОННЫХ ДИАГНОСТИК УСТАНОВКИ ИТЭР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GPU

Николаев А.И., Джурик А.С., Воробьев В.А., Нагорный Н.В., Гужев Д.И.,
Миронов А.Ю., Нестеренко В.М.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, a.nikolaev@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.270

Во время разработки цифровых модулей обработки сигналов нейтронных диагностик необходимо проверять правильность работы алгоритмов обработки. Для этих целей можно использовать имитатор сигналов, характерных для конкретной диагностики. Имитаторы представляют собой программно-аппаратные комплексы, способные генерировать и воспроизводить сигналы, аналогичные сигналам нейтронных детекторов.

На текущий момент имеется возможность генерировать файлы сигналов с загрузками до 10^8 имп/с. При генерации в режиме «реального времени» максимально-возможная загрузка ограничивается 10^6 имп/с., т.к. при больших загрузках время воспроизведения сегмента сигнала меньше времени генерации и записи в память ЦАП следующего сегмента.

Для возможности генерации сигналов в «реальном времени» необходимо уменьшить время генерации данных. Для этого предлагается генерировать сигнал, используя более производительные устройства, чем CPU [1, 2].

Основная особенность систем, построенных на FPGA – это сложность расчёта распределения импульсов по времени. Т.к. FPGA – синхронная цифровая система, чтобы сгенерировать пуассоновское распределение, необходимо использовать дополнительные расчёты, и при этом получается распределение, приближённое к пуассоновскому [2]. Чтобы обойти этот недостаток, было предложено для генерации данных использовать GPU.

В данном докладе рассматривается концепция имитатора сигналов нейтронных диагностик, аппаратно-программного комплекса для генерации сигнала в файл или в реальном времени. Для уменьшения времени генерации данных предлагается использовать графический процессор Nvidia с технологией CUDA (Compute Unified Device Architecture). Использование CUDA позволяет задействовать многоядерную архитектуру графического процессора, что значительно ускоряет проводимые расчёты, по сравнению с расчётами на CPU. Использование CUDA позволяет реализовать быструю передачу данных с видеокарты в память AWG (Arbitrary Waveform Generator) для последующего воспроизведения.

Данная конфигурация имитатора может быть реализована в различных вариантах:

- GPU расположен в корпусе ПК. При этом ЦАП может находиться так же в корпусе ПК или быть в составе шасси удаленного ввода вывода.
- Использование GPU на плате формата CompactPCI. В данном варианте ЦАП находится на той же шине CompactPCI.

Работа выполнена в рамках государственного контракта между Частным учреждением «ИТЭР-Центр» и Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» № Н.4а.241.19.22.1123 от 14 февраля 2022 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году».

Литература

- [1]. Testing device for neutron flux monitoring equipment, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, I.V. Alyaev, V.A. Fedorov, N.A. Selyaev, Yu.A. Paryshkin, S0168-9002(20)30698-7
- [2]. FPGA-BASED RANDOM PULSE GENERATOR FOR EMULATION OF A NEUTRON DETECTOR SYSTEM IN A NUCLEAR REACTOR, Instrumentación & Control, Franco N. Ferrucci, Claudio A. Verrastro, Gloria E. Ríos, Daniel S. Estryk

СТАТУС РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ И УПРАВЛЕНИЯ ДИАГНОСТИКИ АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ИТЭР

Нестеренко В.М., Нагорный Н.В., Гужев Д.И., Миронов А.Ю., Николаев А.И.,
Серов С.В., Миронова Е.Ю., Портоне С.С.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.271

Диагностическая система Активная Спектроскопия (АС) позволит измерять большое количество важных физических величин на установке ИТЭР путем спектрального анализа формы плазмы, а полученные параметры являются основополагающими для управления удержанием плазмы и проведения физических исследований.

Рассматриваемая диагностическая система находится на финальной стадии проектирования и проходит подготовку к защите финального технического проекта (Final Design Review). К проектам финальной стадии диагностических систем предъявляется ряд требований, направленных на получение полной детализации всех технических аспектов измерительной системы диагностики и проектируемых вспомогательных систем. В число проектируемых вспомогательных систем входят: управление нагревательным рукавом световода в агрессивной среде межсекционной области установки (Interspace), управление затворами первых зеркал для обеспечения их защиты от воздействия плазмы, позиционирование торца световода с оптической системой для получения необходимого для проведения измерений пространственного разрешения, очистка поверхности первых зеркал от примесных продуктов горения плазмы, калибровка оптической системы и спектрального оборудования. Наличие большого количества вспомогательных систем оказывает прямое влияние на сложность проекта системы сбора данных и управления, ее аппаратную архитектуру, а также на определение рабочих режимов, состояний системы и интерфейсов управления.

В настоящей работе представлены удовлетворяющие требованиям ИТЭР решения, которые послужат основой финального проекта, среди них: высокоуровневая и детализированная аппаратная архитектура, состав программного обеспечения систем управления и сбора данных, конфигурация шкафов управления, детализированное описание режимов работы диагностики, процедур управления и обслуживания техническим персоналом в соответствии с предъявляемыми организацией требованиями.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году».

Литература

- [1]. Simrock S. Control system for ITER diagnostics, heating and current drive. // Fusion Engineering and Design. 2016. 112. P. 724-730.

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ VITA ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

^{1,2}Таскаев С.Ю., ^{1,2}Бикчурина М.И., ^{1,2}Быков Т.А., ³Бямбацэрэн Э., ^{1,2}Верховод Г.Д.,
^{2,4}Ибрагим И.С., ^{1,2}Касатов Д.А., ^{1,2}Колесников Я.А., ^{1,2}Коновалова В.Д.,
^{1,2}Кормушаков Т.Ю., ^{1,2}Кошкарёв А.М., ^{1,2}Кузнецов А.С., ^{1,2}Остринов Г.М.,
^{1,2}Савинов С.С., ^{1,3}Сингатулина Н.Ш., ^{1,2}Соколова Е.О., ^{1,2}Сорокин И.Н.,
^{1,2}Сычева Т.В., ^{1,2}Щудло И.М.

¹Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

⁴Тартусский университет, г. Тартус, Сирийская Арабская Республика

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.272

В Институте ядерной физики СО РАН разработан источник нейтронов VITA, состоящий из электростатического тандемного ускорителя заряженных частиц оригинальной конструкции (ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией), тонкой литиевой мишени и системы формирования пучка нейтронов. На установке получают мощные потоки нейтронов в широком диапазоне энергий: от холодных до быстрых.

В основном установку используют для развития бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) [1]. Созданный источник нейтронов рассматривается одним из самых привлекательных для размещения в онкологических клиниках. Так, в клинике Сямыня (Китай), оснащенной таким источником нейтронов, приступили к лечению больных с 2022 г. В настоящее время источники нейтронов изготавливают для Центра адронной терапии в области онкологии в Павии (Италия) и для НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина в Москве.

Установка использована для изучения радиационного блистеринга металлов при имплантации протонов [2, 3], для радиационного тестирования образцов карбида бора и стали для ИТЭР [4-6], для изучения зависимости прозрачности оптического кабеля от флюенса быстрых нейтронов до величину $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, для измерения сечения ядерной реакции ${}^7\text{Li}(p,\alpha)\alpha$ [7] и пр. Текущие исследования сосредоточены на измерении сечения ${}^{11}\text{B}(p,\alpha)\alpha$ реакции для безнейтронной термоядерной энергетики и на разработке компактного источника быстрых нейтронов для терапии быстрыми нейтронами и радиационного тестирования материалов.

В докладе приводится описание источника нейтронов VITA, представляются и обсуждаются результаты проведенных исследований, декларируются планы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-30005).

Литература

- [1]. Taskaev S. et al. *Biology*, 2021, v. 10, 350.
- [2]. Badrutdinov A. et al. *Metals*, 2017, v. 7, 558.
- [3]. Bykov T. et al. *NIM B*, 2020, v. 481, p. 62-81.
- [4]. Shoshin A. et al. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, v. 48, p. 1474-1478.
- [5]. Shoshin A. et al. *Fusion Engineering and Design*, 2021, v. 168, 112426.
- [6]. Shoshin A. et al. *Fusion Engineering and Design*, 2022, v. 78, 113114.
- [7]. Taskaev S. et al. *NIM B*, 2022, v. 525, p. 55-61.

СТАТУС СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИТЭР

Семенов И.Б., Голачев В.М., Ларионов А.С., Лазарева С.Г., Миронова Е.Ю.,
Миронов А.Ю., Нагорный Н.В., Портоне С.С., Семенов О.И., Гужев Д.И.,
Николаев А.И.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, i.semenov@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.273

Система управления установкой ИТЭР - CODAC (Control, Data Acquisition and Communication) разделена два уровня управления - на центральный супервайзер, за создание которого отвечает Международная Организация ИТЭР и нижний локальный уровень управления, за который отвечают Национальные Агентства. Супервайзер включает в себя центральное ядро системы управления (CODAC Core System), систему ядерной безопасности, систему блокировок и защит, систему управления плазмой и центральное вычислительное ядро, обеспечивающее работу установки в реальном времени. На нижнем уровне находятся более 170 технологических и диагностических подсистем установки. CODAC использует SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) EPICS, построенную на идеологии сервер-клиент и в настоящее время базирующуюся на компьютерных сетях с пропускной способностью 10-40 Гбит/сек.

В докладе дан обзор состояния дел на март 2023 года по системе управления верхнего уровня, а также по системам сбора данных и управления технологических и диагностических систем ответственности Российской Федерации (Divertor Neutron Flux Monitors, Divertor Thomson Scattering, Neutral Particle Analyzer, CXRS Based On DNB (Edge), Vertical Neutron Camera, High Field Side Reflectometry, Port Plug Test Facility, EC RF Gyrotrons, Remote Participation Center). На конференции состояние дел по данным системам будет подробно доложено в докладах авторами, непосредственно отвечающими за эти направления.

Также рассмотрены проблемы, которые решались по мере создания систем управления в 2022 году. В частности, вопросы, связанные с интеграцией технологических и диагностических систем в центральную систему управления на стадиях приемосдаточных испытаний на предприятиях изготовителях, на площадке ИТЭР, во время запуска установки и работа во время получения первой плазмы, проблемы электромагнитной и радиационной совместимости. Отдельно рассмотрены вопросы интеграции и управления диагностическими комплексами установки в режиме удаленного доступа в рамках созданного в Проектном центре ИТЭР «Центра удаленного участия».

Доклад представляет интерес для физиков и инженеров, работающих в области управляемого термоядерного синтеза.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году».

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ УПРАВЛЕНИЯ ЗНАНИЯМИ В ПРОЕКТЕ ИТЭР ДЛЯ УТС ИССЛЕДОВАНИЙ В РФ

¹Семенов Е.В., ²Шевелева С.С., ¹Портоне С.С., ¹Красильников А.В., ²Маас А.,
¹Петров А.А., ¹Березенцева А.А., ¹Асташов А.Н., ¹Смирнов П.В., ¹Каклюгина Н.А.,
¹Семенов И.Б.

¹ ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, E.Semenov@iterrf.ru

²ITER Organization, St. Paul Lez Durance, France

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.274

Инициатива по управлению знаниями в рамках проекта ИТЭР стартовала в декабре 2020 года. Одной из ключевых задач этой деятельности является поддержка сохранения знаний на различных этапах создания установки ИТЭР. Рабочей группой по управлению знаниями был разработан план сохранения критически важных знаний в Проекте ИТЭР на 2021–2022 годы. Целью этой деятельности является выявление и сохранение знаний в рамках Проекта и вклада его партнеров. В соответствии с планом сохранения критически важных знаний Российское домашнее агентство (РФ-ДА) подготовило специальную программу сохранения знаний.

Российское домашнее агентство провело классификацию критически важных знаний об уникальных компонентах и технологиях, созданных специально для проекта ИТЭР. Помимо этого, был проведен анализ практик и подходов международной организации ИТЭР в области управления знаниями, связанными с применением систем распределенного проектирования и подготовкой конструкторской документации. Для работ по сохранению критически важных знаний РФ-ДА определило группу экспертов для конкретного уникального компонента и провело интервью с некоторыми из этих них. Информация подготавливалась в рамках информационной платформы взаимодействия ИТЭР на основе шаблона, созданного в соответствии с планом сохранения критически важных знаний ИТЭР. Эта информация включает в себя описание уникального компонента, ссылки на техническую документацию в базах данных ИТЭР, информацию об исследователях и интервью с некоторыми из них, ссылки на публикации и материалы конференций и др.

Работа проведена в соответствии с Соглашением “Экспертиза управления знаниями”, No C93TD01FR от 4 января 2022. Мнения и точка зрения, представленные в данном докладе, не обязательно отражают позицию Организации ИТЭР.

СТАТУС ПРОЕКТИРОВАНИЯ УДАЛЕННОЙ ПУЛЬТОВОЙ ИТЭР

Семенов О.И., Ларионов А.С., Миронова Е.Ю., Нагорный Н.В.,
Портоне С.С., Потапов А.М., Семенов И.Б., Сорокин Д.Е.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия, o.semenov@iterrf.ru

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.275

ИТЭР – один из самых сложных и амбициозных энергетических проектов, который реализуется при участии семи равноправных партнеров и более тридцати стран-участниц. Соглашение о строительстве и использовании реактора ИТЭР предусматривает доступ к результатам экспериментов для всех участников проекта. В связи с этим в систему сбора данных установки закладывается возможность удаленного доступа и дистанционной обработки научных данных, как после (оффлайн), так и в процессе (онлайн) проведения эксперимента. Российская Федерация, как один из участников проекта, принимает в этой работе активное участие. На текущий момент три участника проекта (Россия, Япония, США) уже подключены на постоянной основе к развернутой системе сбора технологических данных, еще два участника (Европейский союз и Республика Корея) работают над этим.

«Проектный Центр ИТЭР» совместно с Международной Организацией (МО) ИТЭР регулярно продолжают работы по отработке технологий и принципов взаимодействия между площадкой ИТЭР и другими участниками проекта. В работе были исследованы процессы передачи данных и вопросы информационной безопасности при подключении к внутренним сетям МО ИТЭР. В рамках исследования процесса передачи данных было проведено тестирование связи с МО ИТЭР на оборудовании, идентичном установленному в МО ИТЭР. В результате данного тестирования была подтверждена готовность центра удаленного участия к полноценной работе. Кроме того, были протестированы различные инструменты для удаленного участия, планируемые к использованию в рамках проекта ИТЭР. Протестирована механика совместного использования экранов операторов, просмотра архивных данных и т. д. Протестированы различные решения для стриминга потокового видео в рамках закрытых сетей ИТЭР: как с со стороны ИТЭР, так и с стороны домашнего агентства.

Центр удаленного участия в РФ, расположенный на площадке «Проектного Центра ИТЭР» (г. Троицк), является наиболее продвинутым в плане доступной функциональности. Он обеспечивает прямое подключение к технологическим данным площадки ИТЭР.

В результате работ формируется дорожная карта для участия в экспериментальной программе всех партнеров проекта в будущем. Сформулированы общие для всех участников требования подключению подобных центров. Результаты и технологии, полученные в рамках этих работ, могут быть применены для реализации проекта по созданию аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства УТС исследований в Российской Федерации.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году» и рабочему соглашению Ю/21/ТА /4500000169 с Международной Организацией ИТЭР.

СТАТУС РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА ПО СОЗДАНИЮ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА УТС ИССЛЕДОВАНИЙ - FUSIONSPACE.RU (АИП ИКП)

Портоне С.С., Семенов О.И., Нагорный Н.В., Миронов А.Ю., Ларионов А.С.,
Ежова З.В., Семенов Е.В., Миронова Е.Ю., Семенов И.Б., Григорян Л.А.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.276

Крупнейший в мире токамак ИТЭР будет оснащен более чем 180 технологическими и диагностическими подсистемами, ежедневно генерирующими массивный поток данных. По предварительным оценкам, его объём достигнет 2,2 ПБ в день. Данные, получаемые от реактора, будут иметь критически важное значение для развития управляемого термоядерного синтеза, позволят оценить эффективность выбранных технологических решений и определить вектор развития новых термоядерных технологий.

В силу того, что Российская Федерация является полноправной страной-участницей международного проекта ИТЭР, результаты научной деятельности проекта будут доступны российским учёным. В связи с этим возникла необходимость в создании технологической базы, способной обеспечить возможность совместного участия в территориально-распределённых экспериментах, а также хранение и обработку данных такого объёма. Такой технологической базой для интеграции совместных исследований в области УТС стала аппаратно-инфраструктурная платформа информационно-коммуникационного пространства (АИП ИКП, FusionSpace.RU). Совместное использование FusionSpace.RU позволяет осуществлять процессы планирования, проведения научного эксперимента, централизованного хранения научных данных, их анализа и визуализации, а также использования специализированных сервисов информационного взаимодействия между участниками пространства.

В докладе представлен статус работ по разработке и созданию FusionSpace.RU. В рамках работ 2021 года сформулирован функционал платформы, разработан технический проект и создана тестовая площадка FusionSpace.RU, включающая 9 центров дистанционного участия (комплексы коллективного удалённого участия в экспериментах, оборудованные рабочими местами, предоставляющими возможность локальной работы с научными данными), 6 совместных лабораторий (программно-аппаратная инфраструктура сбора и обмена научными данными, обеспечивающая интерфейс с установкой или стендом — источником научных данных) и центральный узел (совокупность серверной и сетевой инфраструктуры, обеспечивающую функционирование платформы).

В 2022 году основной задачей стало испытание и создание на основе разработанной рабочей документации опытного образца центрального узла, отвечающего сформулированным ранее требованиям, а также разработка программного обеспечения в рамках текущего этапа: научно-технический анализ существующих программных средств для работы с данными на установках УТС и создание базового функционала портала информационного обмена FusionSpace.RU.

В 2023-2024 году запланированы работы по испытанию и созданию опытных образцов остальных узлов FusionSpace.RU – центров дистанционного участия и совместных лабораторий. Не менее важен следующий этап разработки программного обеспечения для информационного взаимодействия между узлами, а также для обеспечения анализа и отображения экспериментальных данных. Реализуемые аппаратные и программные решения должны не только обеспечивать возможность интеграции отечественных термоядерных исследований, но и предоставлять возможность работы с результатами научной деятельности ИТЭР. Это станет возможным благодаря внедрению форматов и структур данных, совместимых с IMAS, применению специализированных математических пакетов и кодов и других зарекомендовавших себя в международной практике подходов, успешно применяемых в проекте ИТЭР.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 31.08.2022 №Н.4ф.241.09.22.1129 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в Российской Федерации. Этап 2022 года».

ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АСУ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УСТАНОВКИ ИТЭР ОТ СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДО ЗАВОДСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Миронов. А.Ю., Нагорный Н.В., Нестеренко В.М., Гужев Д.И., Николаев А.И.,
Семенов И.Б., Поргоне С.С.

ЧУ ГК Росатом «Проектный центр ИТЭР», г. Москва, Россия

DOI: 10.34854/ICRAF.2023.50.2023.1.1.277

Все автоматизированные системы управления для установки ИТЭР проходят несколько стадий проектирования. Первая стадия — это разработка и защита концептуального дизайна АСУ (CDR). Далее концептуальный дизайн прорабатывается и превращается в предварительный, поэтому вторая стадия — это разработка и защита предварительного дизайна АСУ(PDR). После успешной защиты PDR начинается стадия финального дизайна (FDR). На стадии FDR дизайн АСУ финализируются и замораживается архитектура системы. По итогам защиты FDR, заказчиком выдаются замечания, которые необходимо устранить для финализации документации по системе на этапе производства MRR. MRR - это этап, когда вся документация по системе подготовлена и зафиксирована и можно переходить к изготовлению и пусконаладке АСУ на объекте. Финальная стадия заводских испытаний (FAT) проходит после длительной пусконаладки и различных тестов АСУ сначала с симулятором, а потом и с боевой системой. FAT проходит с непосредственным присутствием заказчика и после его успешного прохождения, система готовится к отправке в ИТЭР.

В данной работе представлен опыт проектирования АСУ для технологической системы, установки ИТЭР со стадии проектирования до проведения пусконаладочных работ с выходом на заводские приемочные испытания.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123 «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2022 году».

СПИСОК АВТОРОВ

G	
Gryaznevich M.	57
H	
Heuraux S.	65
A	
Абдуллин И.Ш.	240, 248, 253
Абдуллина Г.И.	77, 90, 95, 113
Абрамов И.С.	203
Абросимов С.А.	154, 155
Акунец А.А.	146, 149
Александров В.В.	159, 160, 161, 162
Александров Е.С.	289
Александрова И.В.	145
Алексеев Д.И.	277, 284, 285, 292, 293, 310
Алтухов А.Б.	80, 119
Алябьев И.А.	302, 304
Амиров В.Х.	127
Амиров Р.Х.	229, 254
Аммосов Я.М.	128
Ананьев С. С.	68, 107, 108, 109, 195
Анашкин И.О.	55
Андреев В. В.	190
Андреев В.Ф.	67, 79
Андреев Н.Е.	50, 165
Андреев Е.Н.	294
Анисимов Д.А.	129
Анненков В.В.	217
Анпилов А.М.	263
Антонов П.А.	110
Ануфриев Е.А.	62
Апфельбаум Е.М.	171
Аржанников А.В.	49, 250, 251
Аристова Н.А.	228
Артемьев К.В.	259, 260
Асеев А.С.	67
Аскинази Л.Г.	77, 78, 90, 94, 113
Асташов А.Н.	330
Атлуханов М.Г.	250, 251
Афанасенко Р.С.	312
Афанасьев В.И.	301, 322
Афанасьев В.П.	245, 246

Ахмеров Е.П.	161
Ахметов Т.Д.	127
Б	
Бабинов Н.А.	308, 314
Багдасаров Г.А.	243
Багрянский П.А.	45, 123, 124, 140
Бадьянова Л.В.	261
Баженов А.Н.	313
Базалеев Е.В.	320
Байбаков Г.С.	269
Байдак В.А.	265
Байдин И.С.	220
Бак П.А.	245
Бакланов В.В.	134
Бакуркина Е.С.	147
Бакшт Е.Х.	167
Балаченков И.М.	44, 45, 82, 85, 111, 116, 117, 118
Баркалов Е.Е.	64, 237
Баркалов К.Е.	64
Баронова Е.О.	152, 153
Баско М.М.	159
Баткин В.И.	63, 73
Батукаев Т.С.	184
Батырбеков Э.Г.	134
Батырев Д.Ю.	119
Бахарев Н.Н.	44, 45, 82, 83, 84, 91, 111, 117, 118
Бачурина Д.М.	282, 308
Бездетный К.С.	162
Беклемишев А.Д.	63, 100, 138
Белов В.П.	127
Белов И.А.	166
Белокуров А.А.	77, 78, 90, 95, 113
Белоусов С.В.	129
Бельков С.А.	166
Бельченко Ю.И.	278, 303
Бережецкая Н.К.	259, 263
Березенцева А.А.	330
Бикчурина М.И.	328
Билера И.В.	184
Бирюлин Е.З.	302, 304
Блинников С.И.	53
Бобров С.В.	280
Богданов А. М	61, 141

Богданов Р.И.	282
Бойков Д.С.	211
Болотов Я.К.	220
Болховитинов Е.А.	154, 155
Бондаренко Д.А.	266
Бондаренко С.В.	166
Бондарчук Э.Н.	45, 55
Борецких Д.В.	147
Борзосекон В.Д.	258, 263
Борисенко Н.Г.	146, 149
Боровицкая И.В.	236
Борщеговский А.А.	105, 112
Боханов А.Ф.	174, 192
Бочарников В.А.	314
Бочаров И.В.	313
Бочкарев С.Г.	156
Брагин Е.Ю.	176, 187, 186, 188
Браницкий А.В.	159, 162
Брантов А.В.	156
Бруль А.В.	127
Будаев В.П.	81, 129, 205, 230
Букреев И.М.	313
Буланов Д.Н.	51
Бунин Е.А.	181, 182, 183, 186
Бурдаков А.В.	126, 311, 312, 317, 322, 323, 324
Бурмистров Д.А.	241, 242, 244, 296
Буслаков И.В.	312, 315, 317
Бутусов Е.В.	151
Буховец В.Л.	315
Быков Т.А.	328
Быченков В.Ю.	156
Бычков В.Л.	264, 265, 266
Бямбацэрэн Э.	328

В

Вавилин К.В.	266
Варфоломеев В.И.	44, 45, 82, 83, 84, 85, 117, 118
Варшавчик Л.А.	313, 314, 316
Васенин С.М.	320
Васильев В.А.	275, 281, 286, 288
Васильева О.Б.	180
Васильков Д.Г.	106

Василяк Л.М.	48
Васина Я.А.	110
Ваулин Д.Н.	264, 265
Вафин И.Ю.	106, 136
Вахрушев Р.В..	127
Вергунова Г.А.	166
Вертелецкий Н.В.	102
Вертков А.В.	110
Верховод Г.Д.	328
Вершков В.А.	133
Веселовзоров А.Н.	176, 237
Викторов М.Е.	202
Вихрев В.В.	153, 158
Владимиров И.А.	133
Власов А.Ю.	289
Вовченко Е.Д.	249
Воинцев В.А.	278
Волчок Е.П.	217
Воробьев В.А.	274, 309, 326
Воробьев С.О.	251
Воронин А.В.	45, 82, 85, 86
Воронин А.В.	210
Воронин А.Ю.	166
Воронова А.А.	45
Воронова Е.В.	257, 261
Вуколов К.Ю.	294
Выбин С.С.	47, 174, 192
Высоких Ю.Г.	312
Высоцкий В.С.	223

Г

Гавриленко Д.Е.	311, 312, 317, 322, 323, 324
Гаврилов В.В.	241, 242, 244, 296
Гаврилова Д.А.	180
Гаврилова М.А.	180
Гаврисенко Д.Ю.	278
Гайдар А.И.	236
Гаранин С.Ф.	148, 166, 238
Гасилов В.А.	243
Герваш А.А.	275, 276, 280, 281,
Гинзбург В.Н.	51
Глазунов Д.А.	280, 281
Глазырин С.И.	53
Глинов А.П.	231
Глинский В.В.	217

Гожев Д.А.	156
Голачев В.М.	329
Головин А.П.	231
Головкин С.Ю.	166
Голубев М.С.	177, 179
Голубев С.В.	47
Горбовский А.И.	127, 278, 303
Горбунов А.В.	55, 101
Горбунов Н.А.	216
Городецкий А.Е.	315
Гороховский Р.Г.	73
Горшков А.В.	101
Горяинов В.А.	45
Горяинов В.Ю.	82, 85, 86
Горячкин П.А.	264
Господчиков Е.Д.	71, 103, 104, 142, 200, 203
Грабовский Е.В.	159, 160, 161, 162, 176
Гребенщиков С.Е.	106, 136
Григорьев А.Н.	251
Григорян Л.А.	332
Грицук А.Н.	159, 160, 161, 162
Гришина И.А.	136, 137
Грищенко А.М.	312, 324
Громов А.Б.	279, 291
Громов А.И.	146, 149
Губаль А.Р.	315
Губанова А.И.	129
Губанова Н.А.	285, 292, 310
Губкин М.К.	129
Гудкова В.В.	258, 263
Гужев Д.И.	318, 326, 327, 329
Гурова Ю.А.	308
Гурченко А.Д.	80, 119
Гурьева Т.М.	276, 283, 286
Гусаков Е.З.	65, 80, 119, 120, 121
Гусев В.К.	44, 45, 78, 82, 83, 84, 85, 111, 117, 118
Гусейн-заде Н.Г.	261
Гуськов С.Ю.	151, 166
Гуторов К.М.	321

Д

Давыденко В.И.	127
----------------	-----

Давыдов А.М.	259, 260
Данилов А.В.	67
Данилов И.В.	299
Двинин С.А.	266, 267, 268
Де Бок М.	300
Дейчули Н.П.	127
Дейчули П.П.	127
Дембовский Д.В.	147
Демура А.В.	295
Демченко Н.Н.	166
Деркач В.Н.	166
Джигайло Н.Т.	110
Джурик А.С.	110, 274, 298, 326
Дзиева Е.С.	177, 178, 179
Диас Михайлова Д.Е.	187, 256
Длугач Е.Д.	654 114, 115
Дмитриев А.М.	313
Дмитриев Е.О.	166
Днестровский Ю.Н.	67, 98, 106
Додин А.В.	150
Докука В.Н.	131, 135
Долинский В.Ю.	148
Дорофеев А.А.	222
Дорошенко И.А.	233
Дохтаренко Д.В.	313
Драбинский М.А.	66, 99, 128, 130,
Дрозд А.С.	187
Дудник Ю.Д.	180
Дьяченко В.В.	45, 80, 83, 85, 120

Е

Евдокимов О.И.	129
Ежова З.В.	332
Елец Д.И.	313
Елисеев Л.Г.	66, 99, 106, 128
Еникеев Р.Ш.	287, 290, 310
Ерёмин В.А..	64
Ерискин А.А.	234, 235
Ермаков Н.В.	313
Ершов И.П.	253
Есипов Л.А.	80, 119
Ефимов В.С.	321
Ефимов Г.О.	283
Ефременко Д.С.	245
Ефремов Н.И.	175

Ж

Жарков М.Ю.	110
Жарова А.А.	241, 242
Желтухин В.С.	208, 215, 240, 248, 253
Жилин Е.Г.	45
Жильцов В.А.	186, 187
Жильцов Н.С.	45, 82, 83, 84, 85, 87, 91, 116, 117, 118, 313
Житлухин А.М.	241, 242, 244
Жубр Н.А.	77, 90, 95, 113
Жуков В.И.	182

З

Забродский В.В.	44
Задириев И.И.	266
Заклецкий З.А.	261
Залавутдинов Р.Х.	315
Земцов И.В.	55
Зецер Ю.И.	201
Зиганшин А.Ф.	227
Змиевская Г.И.	255
Змитренко Н.В.	166, 167
Знаменская И.А.	233
Зорин А.В.	110
Зотов И.В.	102
Зубарев П.В.	122, 123

И

Ибрагим И.С.	328
Иваненко С.В.	122, 123
Иванов А.А.	127, 303
Иванов Б.В.	68, 107, 109
Иванов В.А.	41, 222
Иванов И.А.	63, 93, 94, 100, 125
Иванов И.Е.	262
Иванов О.П.	155
Иванов П.П.	229, 254
Иванов Р.С.	124
Иванова А.А.	227
Иванова И.П.	228
Иванова Н.А.	109
Иванцовский М.В.	311, 312, 317, 322, 323, 324
Игонькина Г.Б.	135
Идеал Р.	71

Изотов И.В.	47, 174, 192, 200, 202
Ильичев И.В.	150
Ильясова М.В.	44, 45, 84, 111, 298
Имбо Ф.	300
Инжеваткина А.А.	74, 93, 94, 100
Иосилевский И.Л.	191
Исаев А.А.	249

К

Кавин А.А.	45, 91
Кавыршин Д.И.	129, 183, 205
Казаков Е.Д.	210, 211, 252
Казеев М.Н.	176, 186
Казиев А.В.	307
Каклюгина Н.А.	330
Калинин П.В.	125, 126, 250, 251
Камин Д.В.	186, 188, 189, 237
Камолова Т.И.	222
Кантор М.Ю.	119
Капитонов В.А.	127
Капралов В.Г.	141
Капустин Ю.В.	315
Карасев В.Ю.	177, 178, 179
Карлыханов Н.Г.	147
Карнозова Е.А.	233
Карпишин М.В.	277, 284, 293
Карпов А.В.	129, 205
Карташов И.Н.	256
Карфидов Д.М.	182
Касатов А.А.	214
Касатов Д.А.	328
Касьянова Н.В.	98
Качкин А.Г.	135
Кашапов Л.Н.	160
Кашапов Н.Ф.	160
Кашапов Р.Н.	196
Кащук Ю.А.	54, 274, 298, 309, 311
Квасков В.С.	129
Квашнин А.Н.	122, 123
Кириенко И.Д.	315, 317
Кирий Н.П.	221
Кирнева Н.А.	55

Киселев Д.А.	275, 288
Киселев Е.О.	44, 45, 78, 82, 84, 85, 90, 91, 116, 117, 118
Киселёва Е.М.	47, 174, 192, 202
Китаев Б.А.	289
Кичик М.Г.	115
Климович С.М.	218, 219
Князев А.В.	257
Кобелева Л.И.	236
Ковалев А.О.	309
Коваленко Ю.В.	123
Ковалишин А.А.	55
Коваль А.Н.	82, 313, 315
Когаков С.И.	314, 316
Кодирзода З.А.	267
Козлов В.Ф.	176, 186
Козлов П.В.	231
Козловский К.И.	249
Колесник М.С.	275
Колесников Е.Ю.	139
Колесников Я.А.	328
Колесниченко К.С.	124
Колмогоров В.В.	127
Кологривов А.А.	154, 155
Колодко Д.В.	307
Колокольцев В.Н.	234, 235, 236
Комаревцев И.М.	315
Кондаков А.А.	125, 278
Коновалов А.Н.	45, 80, 120
Коновалов С.В.	54
Коновалова В.Д.	328
Константинов С.Е.	138
Константинов В.М.	324
Кончекоев Е.М.	258, 263
Коньжев М.Е.	222
Коньков А.А.	45, 111, 129, 205
Коренев П.С.	45, 111
Корепанов П.А.	45
Корешева Е.Р.	145
Коржиманов А.В.	51
Кормилицын Т.М.	274, 298, 311
Кормушаков Т.Ю.	328
Корнев В.А.	44, 77, 84, 90, 95, 113
Корнеева М.А.	268
Коробейникова О.А.	124, 140

Коробко Д. Д.	61
Королев Ю.А.	283
Коршунов О.В.	183
Косарев И.Б.	201
Костюков И.Ю.	51, 247
Костюченко С.В.	48
Кочетков А.А.	51
Кочин В.А.	55
Кошкарев А.М.	328
Кравец Е.М.	238
Кравцов Д.Э.	312, 317, 324
Кравченко А.Г.	166
Кралькина Е.А.	266
Красильников А.В.	52, 54, 319, 330
Крауз В.И.	150
Крашевская Г.В.	184
Кривошеев А.Н.	141
Кривошеев С.И.	293
Крикунов С.В.	45, 82, 95, 113
Крохалев О.Д.	66, 99
Крупин В.А.	55, 319
Крыжановский А.К.	120, 121
Крылов И.Р.	179
Крылов М.К.	175
Крюков Ю.Л.	289
Кувшинов И.Р.	146
Кудрявцев Н.Н.	48
Кузнецов А.С.	328
Кузнецов В.Е.	180, 276, 286
Кузнецов И.И.	51
Кузнецова Л.К.	42
Кузьмин А.А.	51
Кузьмин И.В.	166
Кузьмин Н.В.	319
Куклин К.Н.	63, 73, 250
Кукушкин А.Б.	42, 43, 89, 96, 97
Кукушкин А.С.	108
Кукушкина М.С.	307
Кулагин В.В.	306
Куличенко А.А.	97
Куприенко Д.В.	119
Куприянов И.Б.	320
Куриленков Ю.К.	220
Куркучекоев В.В.	63
Курские Г.С.	44, 45, 78, 82, 83, 84, 85, 87, 91, 116, 117, 118, 313

Кутеев Б.В.	68, 107
Кутузов Д.С.	186
Кутуков А.К.	269, 321
Кучугов П.А.	151, 166

Л

Лабусов А.Н.	273
Лавренюк П.И.	55
Лазарев В.Б.	110
Лазарев Е.Н.	215
Лазарева С.Г.	329
Ламзин С.А.	150
Лапин А.В.	286
Ларионов А.С.	329, 331, 332
Лаухин Я.Н.	175
Лашкул С.И.	80, 118
Лебедев С.В.	77, 90, 95, 113
Лебедев Ю.А.	184, 204
Левашова М.Г.	96
Левин И.В.	55
Леонтьев Д.С.	295
Летунов А.А.	257
Летунов А.Ю.	295
Лешов Н.В.	110
Лиджигоряев С.Д.	241, 242, 244, 296
Лизунов А. А.	76
Лисица В.С.	42, 43, 96, 296
Лисовой П.Д.	132
Листопад А.А.	312, 324
Литвак А.Г.	51
Литвинова Д.И.	113
Литуновский Н.В.	286
Лобанов К.М.	45, 91
Лобанова Л.Г.	245, 246
Лобачев А.М.	317, 324
Лобок М.Г.	156
Логачев П.В.	251
Логвиненко В.П.	257
Логинов И.Н.	312, 317, 324
Ложкарев В.В.	51
Лосева Т.В.	201
Лотоцкий А.П.	175
Лубяко Л.В.	71
Лукаш В.Э.	75
Лукашевский М.В.	129
Лукин В.В.	175
Лутченко А.В.	55

Лыков В.А.	147
Лысенко С.Е.	106, 128
Люллин З.Г.	313, 314, 316
Лянзберг Д.В.	283
Ляо Ю.	227
Ляхов А.Н.	201

М

Маас А.	330
Мазаев С.Н.	286, 288
Мазуль И.В.	276, 286
Майоров С.А.	179
Макаров М.А.	250
Макарова А.Д.	279, 291
Максимов В.В.	70
Малахов Д.В.	260, 261
Мамбеткеримов Д.С.	280, 281
Манзук М.В.	277, 284, 285, 292, 293, 310
Маринин Г.В.	315
Маринин С.Ю.	266
Маркин А.В.	315
Мартынова И.А.	191
Мартьянов М.А.	51
Марчий Г.В.	313, 315
Маслаков И.Д.	125
Матвеев А.И.	197
Маханьков А.Н.	273, 276, 286, 288
Маханьков Н.А.	286
Медведев М.А.	150
Медведев М.В.	289, 291
Медведев О.С.	313
Мезрин А.М.	236
Мейстер А.К.	72
Мельник А.Д.	44, 45, 83, 95, 113, 117, 301
Мельников А.В.	66, 98, 99, 106, 128
Мельников Н.А.	125, 126
Меншарапов Р.М.	109
Мещеряков А.И.	106, 136, 137
Минаев В.Б.	44, 45, 82, 83, 84, 85, 87, 91, 111, 116, 117, 118
Минашин П.В.	89
Мингалеев А.Р.	164
Минеев А.Б.	45, 55, 91

Мирнов С.В.	110, 131
Миронов А.Ю.	318, 326, 327, 329, 332, 333
Миронов И.А.	273
Миронов М.И.	44, 301
Миронов С.Ю.	51
Миронова Е.Ю.	318, 327, 329, 331, 332
Мирошников И.В.	44, 45, 82, 83, 84, 85, 91, 117, 118
Митрофанов К.Н.	159, 160, 161, 162
Михайлов М.И.	92
Михайловский В.Ю.	315
Модестов В.С.	312, 315, 317, 324
Модяев А.Л.	55
Моисеев Д.В.	122
Мокеев А.Н.	313, 315
Мордвинцев И.М.	146
Морхова Е.А.	157
Моряков И.В.	263
Мурахтин С.В.	124, 140
Мурсенкова И.В.	221227
Мустафин Н.А.	55
Мухин Е.Е.	82, 313, 314, 315, 316
Мухин И.Б.	51
Мюсова А.Е.	166
Мялтон В.В.	150

Н

Наволоцкий А. С.	301, 322
Нагорный Н.В.	318, 326, 327, 329, 331, 332, 333
Науменко Н.Н.	319
Науменко П.Р.	66
Наумова И.К.	206, 207
Неверов В.С.	300
Некрасов И.К.	240, 248
Немцев Г.Е.	297, 318, 323
Неруш Е.Н.	247
Несеневич В. Г.	83, 301
Нестеренко В.М.	318, 326, 327, 333
Неудачин С.В.	105
Нечаев Н.Е.	289
Никифоров Д.А.	251

Николаев А.В.	55
Николаев А.И.	274, 326, 327, 329, 333
Николаенко К.О.	313
Николашин А.А.	175
Никонов А.М.	266
Никулин Б.И.	299
Никулин В.Я.	234, 235, 236
Никулина А.М.	129
Новиков В.Н.	112
Новиков Л.А.	177, 178, 179
Новицкий А.А.	190
Новоселова З.И.	302, 304
Новохацкий А.Н.	45, 82, 85, 91
Норман Г.Э.	56
Норышев Е.А.	317
Ноткин Г.Е.	56
Нургалиев М.Р.	108, 319

О

Обудовский С.Ю.	311
Огинов А.В.	164, 220
Огородникова О.В.	321
Огурский А.Ю.	280
Окс Е.М.	239
Окунев А.А.	276, 286
Окунева Е.В.	281
Олейник Г.М.	159, 160, 161, 162
Ольховик Д.А.	134
Ольховская О.Г.	211
Орешко И.В.	313
Орешонок В.В.	127
Орлов М.Ю.	210, 252
Орловский И.И.	294
Остреинов Г.М.	238
Отрощенко В.Г.	110

П

Павлик Т.И.	258
Павлов В.Н.	112
Павлов С.И.	177, 178, 179
Павлова Г.С.	325
Панарин В.А.	173
Панасенков А.А.	64
Панин С.Е.	269, 321
Панкратенко А.В.	298
Панкратьев П.А.	308, 313

Панов В.С.	273
Панфилов Д.Г.	175
Паркевич Е.В.	218, 219, 220
Пастухов А.В.	146, 149
Патров М.И.	45, 82, 111, 117, 118
Пашаев А.Д.	193, 194
Перваков К.С.	146, 149
Петров А.В.	45, 78, 85, 87, 116
Петров А.А.	330
Петров М.П.	301
Петров С.Я.	301, 322
Петров Ю.В.	44, 45, 78, 82, 83, 84, 85, 87, 91, 111, 116, 117, 118
Пикуз С.А.	163, 164, 244
Пименов И.С.	55, 105, 112, 132
Пинженин Е.И.	70
Пискарев И.М.	228
Пискарев П.Ю.	275, 276, 280, 281, 283, 286
Поддубный И.И.	299
Подковыров В.Л.	320, 321
Пожилов А.А.	317
Позняк И.М.	296, 302, 304
Поклад Ю.В.	201
Полевой А.Р.	300
Полозова П.А.	63
Полосаткин С.В.	73, 125, 126
Поляков А.В.	47, 174, 192, 202
Пономаренко А.М.	44, 45, 78, 85, 87, 116
Попков Д.Е.	290
Попов А.Ю.	80
Попов В.А.	214
Попов Н.С.	282
Попов С.С.	250, 251
Портнов Д.В.	309, 312
Портоне С.С.	318, 324, 329, 330, 331, 333
Поступаев В.В.	63, 73, 93, 125, 126
Потапов А.М.	331
Потапов В.Н.	155
Пришвицын А.С.	110
Пузырев В.Н.	146

Пурьга Е.А.	122, 123
Пустовитов В.Д.	69, 88
Путрик А.Б.	299, 302
Пучкин С.Ю.	297
Пушина А.В.	244, 296

Р

Разволяева Д.А.	258, 263
Раздобарин А.Г.	313
Разин С.В.	47
Разуменко Д.В.	77, 90, 95, 113
Ращенко В.В.	127
Резанов Д.А.	313
Ригин А.В.	185
Ровенских А.Ф.	63, 73, 250
Рогачев В.Г.	166
Рогозин К.А.	129, 205
Родин И.Ю.	276
Родионов А.А.	220
Родионов Н.Б.	159
Родионов Р.Н.	297, 309, 312
Родионова В.П.	159
Рой И.Н.	55, 112, 132
Романников А.Н.	55
Романова В.М.	164
Рошаль А.Г.	277, 284, 292, 293
Руденко С.	233
Рузанов В.В.	280
Рукавишников А.Н.	166
Рупасов А.А.	146, 154, 155
Рыжаков Д.В.	81
Рыжанков И. С.	312, 317, 322, 323, 324
Рыкованов Г.Н.	147
Рыкунов Г.И.	307
Рябов В.А.	220
Рязанцев С.Н.	244

С

Саакян А.Т.	146
Савенко Н.О.	243
Савин В.Ю.	88
Савинов С.С.	328
Саврухин П.В.	132
Сагитова Ф.Р.	240, 248
Сайтов И.М.	56
Сайфутдинов А.И.	198, 199
Сайфутдинова А.А.	199

Самсонов Д.С.	313, 315
Самцов Д.А.	250, 251
Сандалов Е.С.	250, 251
Санин А.Л.	303
Сапожников К.С.	287, 290, 310
Саранча Г.А.	66
Сафронов А.А.	180
Сахаров Н.В.	44, 45, 82, 83, 84, 85, 87, 91, 111, 116, 117, 118
Свириденко М.Н.	299
Свирский Э.Б.	237
Сдвиженский П.А.	96
Севрюков О.Н.	308
Селезнев П.А.	312, 317, 324
Семенов А.И.	277, 284, 293
Семёнов А.С.	79
Семенов И.Б.	329, 330, 331, 332, 333
Семенов Е.В.	330, 332
Семенов О.И.	329, 331, 332
Сениченков В.А.	313
Сергеев А.М.	51
Сергеев В.Ю.	61, 62
Сергеев В.Ю.	101
Сергеев Д.С.	187
Сергеев Н.С.	321
Сергеечев А.А.	269, 321
Серебров Р.А.	279, 289, 291, 310
Серебряков М.А.	247
Серёмин В. В.	312, 322, 323, 324
Серов В.В.	319
Серов С.В.	319, 325, 327
Серяков А.Г.	175
Силин П.В.	236
Сингатулина Н.Ш.	328
Синицкий С.Л.	250, 251
Синицына К.А.	283
Синкевич О.А.	267
Синяков М.В.	109
Сироткин Н.А.	181, 206, 207
Скалыга В.А.	47, 174, 192, 202
Скобелев И.Ю.	244
Сковородин Д.И.	73, 125, 126
Скопинцев Д.А.	131

Скрекель О.М.	44, 45, 82, 84, 111, 117, 118
Смазнова Х.Т.	218, 219
Смирнов А.И.	77, 90, 95, 113
Смирнов П.В.	330
Смирнова А.Р.	211, 252
Снигирев Л.А.	313, 315
Соколов М.М.	55, 135
Соколов Л.В.	147
Соколова А.И.	285, 292
Соколова Е.О.	328
Солдаткина Е.И.	72, 140
Соленый А.А.	277, 284, 293
Солихов Д. К.	267
Соловей В.А.	82, 313
Соловьев А.А.	51
Соломатина Е.Ю.	166
Соломахин А.Е.	45, 71, 123
Солоха В.В.	45, 82, 83, 84, 85, 91, 123
Сорокин А.В.	127
Сорокин Д.А.	173
Сорокин Д.Е.	331
Сорокин И.Н.	328
Сорокина А.Р.	199
Сорокина Н.В.	312, 324
Сороковых Д.Е.	265
Сотников О.З.	278, 303
Спицын А.В.	186, 195
Старовойтов Е.А.	313, 314, 316
Стародубцев К.В.	166
Стародубцев М.В.	51
Стародубцев П.В.	166
Старостенко Д.А.	251
Старцев Г.А.	160
Степанов В.Д.	250
Степанов Н.О.	195
Степанов С.Б.	311
Степахин В.Д.	261
Шешов А.Г.	311
Стрелков П.С.	256
Стрижаков М.Г.	188, 189, 210, 252
Строкин Н.А.	185
Ступишин Н.В.	127
Стучебрюхов И.А.	154, 155

Субботин Г.Ф.	133
Судников А.В.	74, 93, 94, 100
Суляев Ю.С.	312, 317, 324
Сунчугашев К.А.	210, 252
Сухов А.Е.	186, 187, 188, 189
Сучков А.Н.	282
Сушков А.В.	55
Сычева Т.В.	328
Сычугов Д.Ю.	106

Т

Тажибаева И.Л.	134
Танчук В.Н.	45
Тарасенко В.Ф.	173
Таскаев А. С.	322, 323, 324, 328
Татаринов А.В.	204
Таюрский А.А.	212
Телех В.Д.	193, 194
Тельнова А.Ю.	44, 45, 82, 83, 84, 85, 91, 117, 118
Тепикин В.И.	132
Теплова Н.В.	120, 121
Терентьев Д.В.	315
Терентьев Т.Н.	208
Терещенко Е.Р.	285, 292
Терещенко И.Б.	313, 315
Тиликин И.Н.	164
Тимофеев И. В.	217
Тимохин В.М.	61, 62, 101
Титов А.Ю.	204
Титов В.А.	206, 207
Ткаченко Е.Е.	45, 82, 83, 84, 85, 91, 118, 313
Ткаченко С.И.	211
Токарев В.А.	44, 45, 82, 85, 117, 118
Толбухин Д.В.	218, 219
Толкачев М.С.	74, 93, 100
Толпегина Ю.И.	101
Толстяков С.Ю.	45, 78, 82, 84, 85, 313, 315
Топорков Д.А.	241, 242, 244, 296
Третинников П.В.	65
Трошин Г.А.	120, 121
Тугаринов С.Н.	313
Тукачинский А.С.	77, 90, 95, 113

Туркин А.В.	232
Тюхменева Е.А.	44, 45, 82, 83, 84, 85, 91, 117, 118

У

Уласевич Д.Л.	75
Умаров И. Р	165
Урвачев Е.М.	53, 201
Устюжанин В.О.	74, 93, 94, 100

Ф

Фатеев В.Н.	109
Федорович С.Д.	129, 205, 230
Федулаев Е.Д.	302, 304, 320
Филимонова Е.А.	229, 254
Филиппов С.В.	82
Финашин Р.А.	278
Франк А.Г.	213
Фридман Б.Э.	279, 289, 291
Фролов А.Ю.	153, 157, 159
Фролов И.Н.	159

Х

Хабанов О.Ф.	66, 128
Хавин В.Э.	120, 121
Хазанов Е.А.	51
Хайрутдинов Р.Р.	75, 131, 135
Хайрутдинов Э.Н.	55, 135, 187
Ханаева Р.А.	92
Харлачев Д.Е.	221, 257
Харрасов А.М.	150
Харчев Н.К.	66, 106, 128
Харченко В.В.	284
Харьков М.М.	307
Хафизов Р.Р.	297
Хвостенко А.П.	55
Хвостенко П.П.	55
Хилькевич Е.М.	44, 45, 84, 111, 298
Хильченко А.Д.	122, 123
Хильченко В.А.	122
Химченко Л.Н.	52
Хирьянов Т.Ф.	220
Хирьянова А.И.	218, 219, 220
Хлюстова А.В.	181, 206, 207
Ходунов И.А.	308
Холопов М.А.	125
Храменков А.В.	132
Христо М.С	100

Хромов Н.А.	44, 45, 82, 85, 91, 117, 118
Хусаинов Т.А.	71, 103
Хуснутдинов Р.И.	300

Ц

Цвентух М.М.	305, 306, 307
Цыбенко В.Ю.	304
Цыбенко Ю.В.	302

Ч

Чан Куанг В.	129, 205
Чебакова В.Ю.	196, 215
Чектыбаев Б.Ж.	134
Черкасов А.А.	239
Черкасов С.В.	106
Черкез Д.И.	195
Чернаков А.П.	313
Чернаков П.В.	313, 315
Черников В.А.	264, 265
Черноштанов И.С.	74, 93
Чернышев Ф. В.	44, 45, 83, 95, 113, 117, 301
Черняков В.Е.	147
Чилин М.С.	129, 230
Чиннов В.Ф.	183
Чирков А.Ю.	157, 158
Чугров И.А.	166
Чудеснов А.И.	55
Чудновский А.Н.	55
Чукашев Н.В.	69

Ш

Шабунин Е.В.	312, 317, 324
Шавелкина М.Б.	229, 254
Шагниев О.Б.	312, 317
Чувакин П.А.	142
Шайкин А.А.	51
Шайкин И.А.	51
Шалаева А.И.	291
Шалашов А.Г.	71, 103, 104, 200, 203
Шандриков М.В.	239
Шапотковский Н.В.	112
Шарафеева С.Р.	317, 324
Шаров И.А.	62
Шаров О.О.	166
Шевелев А.Е.	44, 45, 84, 111, 298
Шевелева С.С.	330
Шелегеда И.А.	130

Шелковенко Т.А.	154, 163, 164
Шелухин Д.А.	133
Шемахин А.Ю.	208, 209
Шергин Д.А.	77
Шестаков Е.А.	132
Шиканов А.Е.	243
Ширяев В.Н.	180
Шиховцев И.В.	45, 46, 125, 127, 278
Шишкова Т.А.	68
Шиянков С. В.	311, 312, 317, 322, 323, 324
Шкандыбина В.В.	109
Шленский М.Н.	114
Шлойдо А.И.	232
Шмигельский Е. А.	76
Шмитов Р.Ю.	301
Шнайдер М.	300
Шошин А.А.	311, 312, 317, 324
Шпаков К.В.	220
Шпатаковская Г.В.	172
Шувалова Л.К.	90
Шульга В.И.	246
Шулятьев К.Д.	45, 82, 83, 84, 123
Шуровский Д.О.	186
Шурыгин В.А.	96
Шушлебін А.Н.	147

Щ

Щёголев П.Б.	44, 45, 82, 83, 84, 85, 87, 91, 117, 118
Щербак А.Н.	110
Щудло И.М	328

Э

Эпштейн И.Л.	198
Эркинбеков Ш.К.	167

Ю

Юхимчук А.А.	107
Юхнов Н.П.	297

Я

Яковлев Д.В.	71, 72, 76, 124, 140
Яковлев И.В.	51
Яльинская Н.Д.	101
Янченков С. В.	186
Яхин Р.А.	166
Яшин А.Ю.	44, 45, 78, 82, 85, 87, 116

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 16.03.2023
Печать офсетная.
Бумага офсетная 65г/м²
Тираж 500 экз.
Заказ № 109