

УДК 533.9

Обзор современного состояния исследований в области физики плазмы и управляемому термоядерному синтезу в России в 2013 г.

И.А. Гришина, В.А. Иванов, Л.М. Коврижных

Дан обзор наиболее интересных результатов, представленных на ежегодной XLI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся с 10 по 14 февраля 2014 года в городе Звенигороде Московской области. Проведен анализ главных направлений исследований в области физики плазмы и ее приложений в России.

PACS: 52.55.—s, 52.25.—b

Ключевые слова: плазма, конференция, физика, термоядерный синтез, доклады.

Введение

XLI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде Московской области с 10 по 14 февраля 2014 года [1, 2].

Финансовую поддержку конференции оказали Российский фонд фундаментальных исследований, Российская академия наук, ЗАО «Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН» и Проектный центр ИТЭР.

Организаторами прошедшей XLI конференции являлись Научный совет по физике плазмы Российской академии наук, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Научный совет РАН по комплексной проблеме «Физика низкотемпературной плазмы», Объединенный институт высоких температур РАН, Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

Научное представительство

На конференции было представлено 311 научных докладов из 77 российских и 27 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее количество авторов докладов составило более 900 человек.

Гришина Ирина Анатольевна, ст. научный сотрудник.
Иванов Вячеслав Алексеевич, заведующий отделом.
Коврижных Лев Михайлович, гл. научный сотрудник.
Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН.
Россия, 119991, ул. Вавилова, 38.
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 25 мая 2014 г.

© Гришина И.А., Иванов В.А., Коврижных Л.М., 2014

Список российских научных центров, представивших доклады (число докладов указано цифрами), следующий.

1. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва — 47
2. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва — 38
3. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва — 34
4. Объединенный институт высоких температур РАН, Москва — 33
5. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва — 20
6. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва — 18
7. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Московская обл. — 15
8. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск — 14
9. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург — 14
10. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва — 14
11. Частное учреждение Госкорпорации Росатом «Проектный центр ИТЭР», Москва — 12
12. Российский университет дружбы народов, Москва — 9
13. Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный, Московская обл. — 9
14. Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, Москва — 7
15. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск — 6
16. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров — 6

17. ФГУП Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург — 5
18. Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань — 5
19. Дагестанский государственный университет, Махачкала — 5
20. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, Москва — 5
21. ФГУП «Центр Келдыша», Москва — 5
22. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург — 5
23. Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва — 5
24. Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт, Москва — 5
25. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск — 4
26. Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва — 4
27. Научно-исследовательский и конструкторский институт электротехники им. Н.А. Доллежала, Москва — 4
28. Национальный исследовательский ядерный университет Московский инженерно-физический институт, Москва — 3
29. Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново — 3
30. ГОУ «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», Санкт-Петербург — 3
31. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород — 3
32. Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань — 3
33. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург — 3
34. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура, Россия — 3
35. Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия — 3
36. Московский Радиотехнический институт РАН, Москва, Россия — 3
37. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск — 2
38. Институт динамики геосфер РАН, Москва — 2
39. Институт термодинамики и кинетики химических процессов, Иваново — 2
40. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург — 2
41. ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары — 2
42. ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва — 2
43. ОАО «Криогенмаш», Московская обл., Балашиха — 2
44. Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Иркутск — 2
45. 12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны, Сергиев-Посад, Россия — 2
46. Институт Астрономии РАН, Москва, Россия — 2
47. Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново — 1
48. ФГУП Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королев — 1
49. Научный центр волоконных исследований Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва — 1
50. Московский авиационный институт (государственный технический университет), Москва — 1
51. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск — 1
52. Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН, Черноголовка — 1
53. Научно-исследовательский институт механики, МГУ, Москва — 1
54. Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск — 1
55. Всероссийский научно-исследовательский институт химической технологии, Москва — 1
56. ЗАО Производственная компания «Лаборатория импульсной техники», Москва, Россия — 1
57. Нижегородская государственная медицинская академия, Нижний Новгород — 1
58. Вычислительный Центр им. А.А. Дородницына РАН, Москва, Россия — 1
59. Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия — 1
60. Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия — 1
61. Институт электронных управляющих машин им. И. С. Брука, Москва, Россия — 1
62. Институт спектроскопии РАН, Административный округ Троицк, Москва, Россия — 1
63. Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Москва, Россия — 1
64. Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, России — 1

65. Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина, РАН, Москва, Россия — 1
 66. Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия — 1
 67. Красноярский государственный педагогический университет им. В.П. Астафьева, Красноярск, Россия — 1
 68. «Красная Звезда», Москва, Россия — 1
 69. Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия — 1
 70. Московский государственный университет технологий и управления, Москва, Россия — 1
 71. НИИ прикладной химии, Сергиев Посад, Россия — 1
 72. Самарский государственный аэрокосмический университет имени Королева, Самара, Россия — 1
 73. Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, Обнинск, Россия — 1
 74. Центр энергоэффективности ИНТЕР РАО ЕЭС, Москва, Россия — 1
 75. Чеченский государственный университет, Грозный, Россия — 1
 76. Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия — 1
 77. Казанский национальный исследовательский университет им. Кирова — 1
- Участниками конференции, представившими доклады из стран дальнего и ближнего зарубежья, являются следующие научные организации.
1. ITER Organization, Cadarache, France — 3
 2. Cornell University, Ithaca, New York, USA — 2
 3. Princeton University, Princeton, USA — 2
 4. Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь — 1
 5. Институт тепло — и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь — 1
 6. Институт физики плазмы, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, Украина — 1
 7. Laboratory for Plasma Physics — ERM/KMS, Association EURATOM — BELGIAN STATE, Brussels, Belgium — 1
 8. CCFE-EURATOM Fusion Association, Culham, United Kingdom — 1
 9. Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан — 1
 10. Forshungszentrum Jülich, Germany — 1
 11. Ecole Polytechnique, Palaiseau Cedex, France — 1
 12. Faculty of Physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia — 1
 13. General Atomics, San Diego, California, USA — 1
 14. Institute of Physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia — 1
 15. FOM Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, Association EURATOM-FOM, Nieuwegein, Netherlands — 1
 16. JET, European Fusion Development Agreement, Culham Science Centre, Abingdon, Oxfordshire, United Kingdom — 1
 17. Karlstad University, Karlstad, Sweden — 1
 18. Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, Garching, Germany — 1
 19. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association, Greifswald, Germany — 1
 20. Centre for Atom Optics and Ultrafast Spectroscopy, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia — 1
 21. Université Pierre et Marie Curie, Paris, France — 1
 22. Université Paris-Sud 11, Orsay, France — 1
 23. Филиал «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр республики Казахстан», Курчатов, Казахстан — 1
 24. Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, Николаев, Украина — 1
 25. Средневосточный технический университет, Анкара, Турция — 1
 26. Таджикский национальный университет, Душанбе, Таджикистан — 1
 27. Forshungszentrum Jülich, EURATOM Association, Jülich, Germany — 1
- На конференции были заслушаны доклады по пяти важнейшим направлениям физики плазмы:
1. Магнитное удержание высокотемпературной плазмы.
 2. Инерциальный термоядерный синтез.
 3. Физические процессы в низкотемпературной плазме.
 4. Физические основы плазменных и лучевых технологий.
 5. Проект ИТЭР: шаг в энергетику будущего.
- На конференции состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 18 обзорных докладов о результатах отечественных и мировых исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям. Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 75 устных и 236 стендовых докладов.

Пленарные заседания и обзорные доклады

Обзорные доклады, которые были представлены на пленарных заседаниях конференции, по существу, подводили итоги работ, выполненных за последний год в области физики высокотемпературной плазмы, управляемого термоядерного синтеза, низкотемпературной плазмы, а также прикладных работ по плазменным и лучевым технологиям. Были также представлены доклады по смежным с физикой плазмы проблемам.

Открыл конференцию доклад **Дж. Онгена** «*Последние результаты и тенденции развития термоядерных исследований в Европе*» (Королевская военная академия Бельгии, Брюссель). В докладе были подведены итоги проводившихся в течение трех лет экспериментов на токамаке JET по моделированию рабочих режимов ITER. Тестировались первая стенка и дивертор (ПСД), изготовленные из бериллия и вольфрама. Оказалось, что эксплуатация JET в этих условиях имеет свои особенности.

(i) Использование новых материалов ПСД привело к уменьшению излучения на периферии и в диверторе, и в результате нагрузка на ПСД значительно увеличилась, как в стационарной фазе разряда, так и во время переходных процессов. А это требует рассмотрения радиационных сценариев.

(ii) В противоположность углероду, который подвергается сублимации при тепловой перегрузке, металлические компоненты ПСД расплавляются.

(iii) ПСД с металлическим и углеродным покрытием по-разному удерживают водород.

(iv) Перенос вольфрама за счет столкновений проходит совершенно иначе, чем столкновительный перенос ионов Ве и С с низким Z , что ведет к накоплению вольфрама в центре плазмы. Положительным результатом использования Ве является очень низкий эффективный заряд плазмы Z (содержание С и О уменьшилось, по крайней мере, в 10 раз), что позволяет проводить эксперименты на JET в течение одного года без дополнительной подготовки поверхности камеры.

Докладчик также ознакомил участников конференции с современным состоянием работ на стеллараторе W7-X, ввод которого в эксплуатацию намечен в 2014 году с первой плазмой в 2015 году. Обсуждались также работы в рамках международного проекта по созданию установки для облучения материалов, необходимых для термоядерного синтеза (IFMIF).

В докладе **В.Б. Минаева** «*Задачи и статус проекта сферического токамака Глобус 2М*», со-

авторами которого являются представители научных коллективов Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН и НИИЭФА, были подведены итоги работы сферического токамака Глобус-М. На этой установке к настоящему моменту достигнуты основные параметры плазмы, запланированные в середине 90-х годов при ее строительстве. Среди наиболее значимых результатов были отмечены получение режимов с высокой плотностью (более 10^{20} м^{-3}), сильный нагрев ионов с помощью нейтральной инжекции, успешное применение на сферическом токамаке ВЧ-нагрева на частотах ИЦР, а также безындукционный старт тока с помощью нижнегибридных волн. Кроме того, были представлены планы модернизации этого токамака, отвечающие новым задачам, стоящим сегодня перед установкой. При проектировании в качестве базовых сценариев разряда были выбраны два режима: «В-тах» с максимальным полем и током, в котором длительность разряда ($\sim 0,3$ с) ограничена допустимой температурой в обмотке тороидального поля, и «t-тах» со сниженным до 0,7 Тл магнитным полем и длительностью разряда (0,6 с), ограниченной запасом вольт-секундной емкости полоидальных обмоток и током, поддерживаемым безындукционным путем. Основными задачами, решаемыми на установке Глобус-М2, будут отработка сценариев с низкой столкновительностью, исследования сильно анизотропной плазмы с высоким давлением быстрых частиц и развитие методов дополнительного нагрева и безындукционной генерации тока/

Доклад **Б.В. Кутеева** (НИЦ Курчатовский институт) «*Коррекция дорожной карты Российской термоядерной стратегии*» был посвящен изменениям в стратегии овладения энергией термоядерного синтеза, нацеленной на создание промышленной термоядерной электростанции (ПТЭ) в России к 2050 году и разработанной под эгидой ГК «Росатом» в 2007 году. Стратегия базируется на реализации управляемого термоядерного синтеза в установках типа токамак с магнитным удержанием дейтерий-третиевой плазмы. Она предполагает использование знаний о физике горячей плазмы и технологиях, полученных в рамках проекта ИТЭР. Демонстрационный шаг между ИТЭР и ПТЭ планировался в рамках национального проекта опытной термоядерной электростанции (ОТЭ), либо в рамках международного проекта ДЕМО.

Более четкое понимание временных масштабов проекта ИТЭР и начавшаяся деятельность ряда стран по разработке проектов ДЕМО потребовали коррекции дорожной карты Российской термоядерной стратегии, которая обсуждалась

в докладе. Была проведена переоценка уровня реализуемости и эффективности гибридных систем «синтез-деление» на пути к ПТЭ. Было отмечено, что до получения ИТЭР первых данных о физике горячей плазмы проектирование ДЕМО является рискованным.

Ядерно-физические аспекты УТС и ядерные технологии синтеза являются критическими на пути к ДЕМО-ОТЭ и ПТЭ. Данные проблемы могут быть решены в рамках программы развития гибридных технологий «синтез-деление» и создания пилотного опытно-промышленного гибридного реактора (ОПГР) к 2030. Основными продуктами его работы будут переработка долгоживущих ядерных нуклидов, в первую очередь, минорных актинидов, производство электроэнергии и ядерного топлива.

В докладе **А.В. Красильникова** (Проектный центр ИТЭР) «Современное состояние проекта ИТЭР» были представлены достижения в создании первого экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, в общем, и изготовлении систем, за которые отвечает Россия, в частности. Показано, что Россия не только выполняет свои обязательства, но и по техническим параметрам некоторых создаваемых систем опережает аналогичные системы, создаваемые остальными партнерами. В текущем году продолжались регулярные поставки сверхпроводников для создания катушек тороидального и полоидального магнитного поля, началась работа по изготовлению верхних патрубков вакуумной камеры. Завершен большой объем НИОКР перед подписанием Соглашения о поставке первой стенки ИТЭР. Были заключены несколько Соглашений о поставках порт-плагов и диагностик. В ИТЭР был защищен проект создания модуля универсального 12-рядного АЦП с частотой дискретизации 500 МГц систем сбора данных для «быстрых» диагностик ИТЭР.

Также обсуждались проблемы, возникшие в ходе сооружения ИТЭР — изменения технических решений некоторых систем, сдвиги графиков работ, требования к управлению проектом, финансовые проблемы. Особое внимание было уделено кадровым проблемам. Отмечалось, что необходимо финансировать обучение большего количества молодых специалистов для последующей работы в проекте ИТЭР. В настоящий момент Россия не выбирает имеющуюся у нее в рамках проекта квоту в 9% по персоналу.

В.В. Вихревым (НИЦ КИ) в пленарном докладе «Генерация и анизотропия нейтронного излучения в Z-пинчах» были обобщены имеющиеся результаты исследований проблемы ширины

спектра и анизотропии таких нейтронов. По мнению автора, отсутствие ясности в этом вопросе не позволяло считать прямое получение высокотемпературной плазмы в Z-пинчах более простым и перспективным методом зажигания самоподдерживающейся ТЯ-реакции, оставляя Z-пинчам в проблеме УТС лишь роль источника греющего рентгеновского излучения. Ранее (на XXXVIII конференции) автором было показано, что, в отличие от комбинации «ускорительного» (т.е. пучком быстрых ионов, взаимодействующих с холодной плазмой) и «термоядерного» механизмов генерации нейтронов, учет экспериментально наблюдаемого немаксвелловского (степенного с показателем 2,5–4) высокоэнергетического (выше 10 кэВ) хвоста в распределении дейтронов плазмы, возникающего при более быстром — по сравнению с нагревом электронов — нагреве ионов, позволяет согласовать расчетные спектры с экспериментальными. Анизотропное ускорение ионов идет, в основном, не в электрическом поле электронов, а за счет развития МГД-неустойчивости в перетяжке (токовой частью силы Лоренца). Ион-ионные столкновения не успевают за характерное время τ_{ii} полностью максвеллизировать такие распределения. В магнитном поле Z-пинча быстрые ионы, двигаясь без столкновений, отклоняются к катоду, и эта анизотропия воспроизводится уже в спектрах рождающихся нейтронов, что наблюдалось на ряде установок (включая С-300 и Ангара-5-1). Автор особо подчеркнул, что классический критерий Лоусона записан для плазмы, время удержания которой больше времени τ_{ii} , т.е. является достаточным, но не необходимым для Z-пинча, где возможно инициирование самоподдерживающейся ТЯ-реакции немаксвелловской плазмой. Хорошим индикатором близости к зажиганию может быть нейтронный выход на единицу длины пинча, рассматривавшийся в ряде публикаций. По приведенным автором оценкам, близости к зажиганию волны ТЯ-горения вдоль пинча можно достичь при токе ~30 МА, что находится на уровне создающихся установок, включая «Байкал» (ток 50 МА). По мнению автора, важным преимуществом получения ТЯ-плазмы прямо в Z-пинче является компактность системы, при этом в радиальном направлении плазма удерживается магнитным полем, а в осевом — за счет инерции.

Обсуждению комбинированных систем, сочетающих инерциальное и магнитное удержание ТЯ-плазмы, был посвящен доклад «Теоретические и экспериментальные исследования магнитно-инерциального термоядерного синтеза» (МИТС), представленный **С.В. Рыжковым**

(МГТУ им. Баумана). Специальное внимание автор уделит обзору работ по системам МИТС с лазерным драйвером и плазменными струями и возможным направлениям использования таких конфигураций. Отмечено, что основные экспериментальные данные последнего времени получены на американских и японских установках, при этом заметная часть исследований (например, PND Experiment в США) проводятся в частных компаниях при частичном государственном финансировании. Возросший интерес к МИТС связан, прежде всего, с возможностью снизить требования к лазерному драйверу, при этом некоторые системы — например, в конфигурации «сферомак» — компактны (вплоть до настольного масштаба), а развитие данного направления может оказаться очень быстрым, так как необходимые научные исследования (включая физику горения плазмы) не требуют многомиллиардных затрат на новые установки. В целом, рассмотрение систем МИТС с лазерными драйверами и плазменными лайнерами начато не так давно, но, по мнению автора, надо иметь в виду, что успех в лабораториях может дать мощный стимул для расширения работы над технологиями, необходимыми для производства энергии. Имеющиеся же в России системы МАГО (ВНИИЭФ) и МОЛ (ТРИНИТИ) являются взрывомагнитными генераторами (ВМГ) большой мощности, а исследования российских коллективов, в основном, ограничиваются теоретическими и расчетными работами: например, в НИИЯФ МГУ, ИПМ (код MARPLE 3D), ВНИИЭФ (код FLUX-3D). В докладе отмечены эксперименты на рочестерской установке OMEGA EP (40 пучков, 16 кДж лазера, МИТС с лазерным драйвером), где были получены магнитные поля (МП) до 8000 Тл при затравочном 8 Тл. В экспериментах с замагниченной цилиндрической мишенью продемонстрировано увеличение ионной температуры на 15%, а нейтронного потока — на 30%. В 2011 г. были запущены Plasma Jet Accelerator (HyperV) и PLX (LANL), где плазменные струи, разогнанные до 50 км/с (планируется до 200), сжимают предварительно сформированную — например, столкновением двух сферомаков — мишень (следует, правда, заметить, что в схемах с обжатием плазменным лайнером остается много вопросов). В США же активно развивается концепция MagLIF (Sandia), согласно которой короткий 6 кДж лазерный импульс разогревает горючее непосредственно перед стагнацией цилиндрического лайнера-контейнера. МП были задействованы в 2012–13 гг. в экспериментах на японской лазерной установке GEKKO-XII, а для NIF в 2013 г. были проведены 2D-расчеты

непрямого сжатия мишени при вводе в хольраум затравочного (от 20 до 100 Тл) МП. Отмечено, что в такой конфигурации можно ожидать увеличения температуры и нейтронного выхода благодаря подавлению теплопроводности и образованию магнитного «зеркала» для α -частиц.

В пленарном докладе **В.Б. Розанова** (ФИАН) «Инерциальный синтез: наука и приложения — результаты и состояние проблемы по материалам IFSA-2013» был дан обзор результатов, представленных на главной для данной тематики Международной конференции по инерциальному синтезу, состоявшейся в 2013 г. в Японии. Основное внимание в докладе было уделено проблеме центрального зажигания и результатам, полученным уже после официального завершения в США программы National Ignition Campaign (NIC) на крупнейшей в мире лазерной установке NIF с энергией около 1,7 МДж. На предыдущей конференции В.Б. Розанов отметил, что нейтронный выход, зафиксированный на установке к 2013 г., составлял 10–15% от ожидаемого, и высказал предположения о возможных причинах этого. Проведенный в работах, представленных на IFSA-2013, всесторонний анализ данных, накопленных за время проведения NIC, позволил выделить, по крайней мере, два ответственных за указанное расхождение эффекта: крупномасштабную асимметрию сжатия и перемешивание аблятора с горючим (что согласуется с некоторыми из предположений В.Б. Розанова). Последовательный учет этих факторов позволил приблизить расчетный нейтронный выход к наблюдавшемуся экспериментально. Важным итогом этих работ стал переход к более высокоэнтропийному режиму непрямого сжатия, а именно, за счет использования т.н. high-foot лазерного импульса, позволяющего улучшить устойчивость границы аблятор-корона по отношению к неустойчивости Рэлея-Тейлора. Это привело к достижению 29.09.2013 т.н. «scientific break-even», когда энергия, выделившаяся в ТЯ-реакциях (~14 кДж), впервые превзошла энергию сжимающегося горючего, что указывает на эффективный нагрев α -частицами, а также к рекордному (на тот момент) нейтронному выходу $\sim 5 \times 10^{15}$ (выстрел 20.01.2014 дал $9,3 \times 10^{15}$ нейтронов — 26 кДж). В обзоре было особо указано (и это прекрасно понимают американские исследователи), что high-foot режим вряд ли позволит достичь высокой степени сжатия для получения необходимых высоких коэффициентов усиления мишени. Среди исследований, отмеченных в обзоре, также были отдельно упомянуты некоторые перспективные решения, применяемые в экспериментах на установке NIF, в частности, исполь-

зующие алмазный аблятор (HDC), которые, как полагают авторы, помогут преодолеть некоторые из остающихся трудностей на пути к зажиганию.

И.К. Красюк (ИОФ РАН) в докладе «*Конические мишени в исследованиях по инерциальному термоядерному синтезу (история и современное состояние)*» дал обзор развития подхода. Идея использования конических мишеней возникла при поиске простого способа ударной инициации ТЯ-реакций в газообразном дейтерии, заполняющем коническую полость в сплошном материале большой плотности. Конические мишени стали сначала удобным средством моделирования кумулятивных процессов, вообще, и физических процессов в оболочечных сферических мишенях ИТС, в частности, а на новом этапе исследований — составной частью перспективных современных конструкций мишеней ЛТС. Второе обстоятельство связано с тем, что, используя коническую мишень, можно инициировать ТЯ-реакцию в небольшом объеме, а затем использовать выделяющуюся энергию для зажигания основной массы горючего. В настоящее время эта концепция, являясь подмножеством методов «быстрого зажигания» («fast ignition»), насчитывает две практические реализации: удар макрочастицей-импактором и имплозию вещества внутрь конической мишени. Теоретический предел низкоэнтропийного ускорения плоской мишени в плотном состоянии составляет 1700 км/с. Типичные для ЛТС параметры сжатого топлива делают первоначальное зажигание импактора более достижимым ($u \sim 1000$ км/с) по сравнению с непосредственным зажиганием основного горючего сферической мишени, что подтвердили результаты серии экспериментов, проведенных в 2005–2009 гг. сотрудниками ILE (Япония). Тонкие СН-фольги удалось ускорить до ~ 700 км/с при сохранении плотности $\sim 0,4$ г/см³ (рекордное значение, достигнутое в 2009 г. на лазере NRL Nike, составило ~ 1000 км/с). Эксперименты по ускорению и столкновению CD- и СН-фольг в плоской геометрии показали, что основным источником нейтронов при столкновении CD-макрочастицы с мишенью является импакт-плазма самой макрочастицы. Это позволило выдвинуть концепцию «мишень в мишени», согласно которой сферическая оболочечная мишень конструктивно объединяется с тонкостенным конусом, в котором ускоряется и сжимается сегмент аналогичной мишени. Использование такого «детонирующего потока» позволяет снизить требования для скорости импактора до ~ 300 км/с. Результаты экспериментов, проведенных в ILE в 2008–2009 гг., показали, что использование такой системы приводит к увеличению выхода DD-нейтронов на два порядка

(до $\sim 2 \times 10^6$) в зависимости от согласования моментов удара и максимального сжатия основной мишени.

Обзор «*Наноплазмоника*», представленный **В.В. Климовым** (ФИАН), был построен как ознакомительная лекция о новой области нанооптики — наноплазмонике, предметом которой являются оптические свойства металлических частиц и наноструктур, обусловленные колебаниями электронов проводимости. В кратком историческом введении было отмечено, что, хотя физика поверхностных плазмонов достаточно давно и глубоко проработана, исследования плазмонов, локализованных в наночастицах, интенсифицировались лишь в течение последних 20 лет. Это обусловлено комплексом причин: современные технологии позволяют контролируемо создавать наночастицы весьма произвольных форм, диагностическая техника (сканирующие микроскопы разных типов) — характеризовать свойства отдельных частиц и структур, тогда как развитие вычислительных средств позволяет предсказывать и оптимизировать их свойства. В докладе было особо отмечено, что свойства локализованных плазмонов критически зависят от формы наночастиц. Это позволяет «настраивать» систему плазмонных резонансов на эффективное взаимодействие со светом или элементарными квантовыми системами (молекулы, квантовые точки). Эта важнейшая особенность уже позволила обнаружить ряд новых эффектов. Так, гигантские локальные поля вблизи наночастиц приводят к увеличению сечения комбинационного рассеяния на 10–14 порядков, что, например, позволяет говорить об обнаружении отдельных молекул. В заключительной части доклада был рассмотрен ряд направлений наноплазмоники и их применение к разработке принципов функционирования наноустройств и наноприборов для различных приложений, например, таких как биомедицина, создание новой элементной базы вычислительной техники, нанолазеры и многое другое.

Был также заслушан доклад **И.М. Подгорного** «*Физика солнечных вспышек*» (Институт астрономии РАН). В докладе было отмечено, что прогресс последних лет в области понимания физики вспышек достигнут благодаря рентгеновским измерениям в области $0,1$ – 10 Å и численному МГД-моделированию, в котором в начальные и граничные условия задаются из измерений состояния солнечной поверхности в предвспышечном состоянии. Никаких предположений о механизме вспышки не вводится. Основную энергию вспышки уносят рентгеновское излучение и потоки плазмы с массой $\sim 10^{16}$ г и скоростью до 10^8 см/с, вызы-

вающие магнитные бури на Земле. Часто вспышки сопровождаются потоком релятивистских протонов с энергией до 20 ГэВ. Анализ динамики активных областей показал, что для появления большой вспышки магнитный поток активной области должен превзойти 10^{22} максвелл. Типичное время возрастания магнитного потока 3–5 дней. Трехмерное МГД-моделирование, выполненное для конкретных вспышек, показало образование токового слоя, в магнитном поле которого накапливается энергия для вспышки. Определенное моделированием положение токового слоя совпадает с положением источника теплового рентгеновского излучения, зарегистрированного на космическом аппарате RHESSI.

В докладе **П.Р. Левашова с соавторами** «*Моделирование термодинамических и транспортных свойств сильно неидеальной плазмы методом квантовой молекулярной динамики*» (Объединенный институт высоких температур РАН) были представлены результаты моделирования термодинамических, транспортных и оптических свойств сильно неидеальной плазмы при плотностях порядка нормальной для данного вещества и температурах менее 10 эВ. Использовался метод квантовой молекулярной динамики, реализованный в программном пакете VASP. В моделировании участвовали металлы (алюминий, медь, серебро, золото) и дейтерий. Исследовались как термодинамические, так и транспортные свойства (комплексная диэлектрическая проницаемость, коэффициент теплопроводности), результаты сравнивались с существующими моделями. В большинстве случаев было получено очень хорошее согласие с экспериментальными данными. Обсуждались отличия от традиционных моделей, в частности, нарушение закона Видемана-Франца. Построенные модели могут быть использованы для прямого моделирования поглощения излучения в металлах и диэлектриках.

Был также представлен обзорный доклад **Б.Б. Зеленера с соавторами** «*Ультрахолодная плазма и ридберговское вещество в магнитооптической ловушке. Теория и эксперимент*» (ОИВТ РАН, НИЯУ МИФИ, НИЦ Курчатовский институт, ФИАН, Center for Atom Optics and Ultrafast Spectroscopy, Swinburne University of Technology, Australia). В докладе отмечалось, что в 90-е годы прошлого века появился метод лазерного охлаждения в магнитооптической ловушке, который позволил охладить газ атомов до температур 10^{-5} К, а в дальнейшем при помощи испарительного охлаждения до температур 10^{-9} К. При этом была получена Бозе–Эйнштейновская конденсация. В связи с этим появилась возможность экспери-

ментально исследовать ридберговское вещество. Одним из состояний ридберговского вещества является однократно ионизованная ультрахолодная плазма. В докладе был дан обзор работ, посвященных методам получения и экспериментальному исследованию ультрахолодной плазмы. Обсуждались также теоретические модели, предложенные в литературе. Главной особенностью ультрахолодной плазмы является сильная неравновесность, что приводит к ее рекомбинации. Рекомбинация ультрахолодной плазмы сильно зависит от параметров взаимодействия, а также от наличия магнитного поля. В докладе обсуждалось влияние неидеальности и магнитного поля на скорость рекомбинации в магнитном поле. При рекомбинации ультрахолодной плазмы возникают высоковозбужденные ридберговские состояния атомов. При наличии магнитного поля возможна магнитная стабилизация по аналогии с экситонами в полупроводниках. В ОИВТ РАН создана установка, на которой получен ультрахолодный газ атомов ${}^7\text{Li}$ при температуре 10^{-4} К. Предполагается исследовать ридберговское вещество и ультрахолодную плазму на основе ультрахолодного газа ${}^7\text{Li}$.

В обзоре **А.Д. Гурченко** «*Аномальный перенос и динамика многомасштабной дрейфовой турбулентности в токамаке: измерения с высоким разрешением и глобальное гирокинетическое моделирование*» (ФТИ РАН) проводится всестороннее сопоставление результатов глобального гирокинетического моделирования полной функции распределения частиц, выполненного на основе метода частиц в ячейках для омического разряда токамака ФТ-2, с экспериментальными данными, полученными как от набора стандартных диагностик, так и с помощью уникальных микроволновых диагностик обратного рассеяния, характеризующих параметры турбулентности и явления переноса на микро-, макро- и мезомасштабах. Отмечалось, что в результате моделирования кодом ELMFIRE достигнуто хорошее согласие между числовыми расчетами и экспериментальными оценками для профилей эффективной теплопроводности электронов и ионов. Полученное на макроуровне согласие, было дополнено на микроуровне и для промежуточных масштабов турбулентности с помощью диагностик: доплеровской рефлектометрии (ДР), радиальной корреляционной доплеровской рефлектометрии (РКДР) и доплеровского усиленного рассеяния (УР). Было отмечено, что данная работа является первым примером корректного глобального моделирования разряда в токамаке. Продемонстрировано согласие между численными резуль-

татами кода ELMFIRE для средних равновесных E'B потоков, мезомасштабных осциллирующих зональных потоков и спектров турбулентности плазмы, наблюдаемых с помощью диагностик ДР и УР, а также соответствие данных о температуро-проводности, профилях плотности и температуры плазмы в токамаке ФТ-2.

Академик **В.А. Рубаков** (ИЯИ РАН) представил доклад «*Бозон Хиггса открыт. Что дальше?*» Обработка имеющихся данных о различных каналах распада, полученных коллаборациями CMS и ATLAS по состоянию на март 2013 г., указывает, что обнаруженная частица (H) действительно соответствует бозону Хиггса Стандартной модели (SM). Открытие подтверждено на более высокой статистике, угловые распределения продуктов нескольких каналов распада и иные характеристики указывают, что H является скалярным бозоном. В докладе неоднократно подчеркивалось, что речь идет о начале изучения нового сектора физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, а не просто об открытии очередной элементарной частицы. Обнаружение бозона Хиггса ($m_H = 125$ ГэВ) дало экспериментальное подтверждение необходимой для SM-концепции происхождения масс частиц за счет их взаимодействия с вакуумным конденсатом поля Энгле-ра–Браута–Хиггса, что приводит к спонтанному нарушению симметрии (элементарным частицам в симметричной теории запрещено иметь массы). Тем не менее, SM остаются присущи внутренние трудности, главным образом, — проблема масштаба энергий. Радиационные поправки стремятся «подтянуть» m_H к планковской массе M_{Pl} , т.е. требуется чрезвычайно тонкая настройка параметров теории, чтобы обеспечить $m_H \ll M_{Pl}$. Поэтому основные вопросы теперь можно сформулировать так: каковы свойства нового бозона, один ли он, или их несколько, стоит ли за ним новая физика и какая? В этом смысле, в 2014 году на Большом адронном коллайдере (БАК) — когда он заработает на проектной энергии ~14 ТэВ (7x7, пока же — 8 ТэВ или 4x4) — начнутся прямые поиски новой физики, главным образом, в исследованиях потенциальных каналов рождения и распада. Любое отклонение от предсказаний минимальной SM с одним бозоном Хиггса, где его свойства однозначно предсказываются, может указывать на новую физику, но какова она — область гипотез. Среди них — суперсимметрия, позволяющая устранить ряд проблем, но суперпартнёров на БАК пока не обнаружено. Несмотря на распространенность мнения, что новая физика проявит себя на масштабе энергий несколько ТэВ (но не десятков ТэВ), пока отклонений нет. Но, как было отмечено в завер-

шение доклада, точности БАК в любом случае не хватит — нужен новый e^+e^- -коллайдер: именно он станет машиной для прецизионных исследований, тогда как БАК, скорее, — машина открытий.

Три доклада были посвящены 80-летию со дня рождения выдающегося ученого и организатора науки Бориса Борисовича Кадомцева. Это доклады **В.С. Стрелкова** «*Б.Б. Кадомцев. Ученый, директор, человек*», **В.П. Силина** «*Б.Б. Кадомцев и теория ионно-звуковой турбулентности плазмы*» и **А.А. Рухадзе** «*Роль Б.Б. Кадомцева в судьбе А.А. Власова — объективность и благородство*». Участники конференции с удовольствием послушали воспоминания людей, которых судьба лично свела с Б.Б. Кадомцевым. Особенный интерес доклады вызвали у представителей молодого поколения ученых.

Секционные доклады

Секция «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы»

На секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы» (председатель секции — **А.И. Мещеряков**) было представлено 17 устных и 41 стендовых докладов, выполненных сотрудниками более чем 20 российских научных центров, причем 5 докладов выполнены совместно с сотрудниками научных центров Белоруссии, Казахстана, Украины и Германии.

Большая часть экспериментальных работ (26 докладов) выполнена на тороидальных магнитных ловушках — токамаках и стеллараторах, меньшая часть (5 докладов) на линейных магнитных ловушках — пробкотронах.

Интерес участников конференции вызвали доклады, посвященные теме существования канонических профилей давления в тороидальных магнитных ловушках. Аномально быстрый, по сравнению с неоклассикой, перенос частиц и тепла поперек магнитного поля, быстрое распространение теплового фронта и другие явления, наблюдаемые в экспериментах, не находят физического обоснования. Считается, что перенос в тороидальных ловушках определяется, в основном, процессами турбулентности. Однако описать их с помощью численного решения кинетических уравнений не удастся. Одномерная модель переноса, основанная на гипотезе о существовании устойчивых самосогласованных профилей давления, дает возможность обоснования этих явлений. Эта идея, предложенная в свое время еще Б.Б. Кадомцевым, развивается в настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт».

Так, в докладе **Ю.Н.Днестровского с соавторами** «Модификация транспортной модели канонических профилей (ТМКП) на основе новых экспериментов на DIII-D» (НИЦ Курчатовский институт») предложена модификация транспортной модели канонических профилей. Модификация модели проведена, основываясь на экспериментах на токамаке DIII-D с инжекционным нагревом и переходом в режим улучшенного удержания. Причем профили ионной температуры в этих экспериментах оказываются сильно вогнутыми. В стандартной модели канонических профилей коэффициент жесткости профиля постоянен для всего плазменного шнура. Экспериментальные данные с DIII-D позволяют проследить поведение жесткости профиля ионной температуры по радиусу и ее зависимость от скорости тороидального вращения, найти радиальное распределение коэффициента жесткости и использовать его в модифицированной модели канонических профилей. Вычисленные в модели профили ионной температуры хорошо согласуются с экспериментальными профилями. Модифицированная модель канонических профилей плазмы была использована для сферического токамака MAST. Для поиска параметров $T_{e,i}$ (а) и κ_i^0 производится минимизация отклонений расчетных профилей температуры T_i и T_e от экспериментальных. В результате, сделан вывод о том, что в области $\rho < 0,4$ жесткость не существенна и профиль температуры ионов определяется коэффициентом κ_i^0 и пилообразными колебаниями. Найдены значения κ_i^0 для DIII-D и MAST, однако их значения сильно различаются, по-видимому, в силу наличия пилообразных колебаний на MAST. Для обеих установок κ_i^0 уменьшается с ростом вложенной мощности.

В работе **Дябилина К.С. с соавторами** «Самосогласованные профили плазмы. Интерпретация» сделана попытка получить самосогласованные профили плазмы при нахождении минимума функционала свободной энергии $\delta F = \delta (-\theta * S + E) = 0$, где учитывается магнитная энергия диамагнитных токов, а θ — магнитная температура. Для энтропии Больцмана найдено решение для профилей давления и рассмотрена их линейная релаксация. Динамика релаксации должна быть записана в форме, обеспечивающей условие стремления свободной энергии к минимуму. Найден скейлинг вблизи минимума свободной энергии, который оказался похожим на экспериментальный скейлинг ITER 98. Рассмотрена чувствительность профиля давления к профилю вложенной мощности. Рассмотрено также явление density pump out, возникающее при добавлении к омическому режиму ЭЦР-нагрева плазмы. Эффект выноса плаз-

мы из зоны нагрева в модели оказывается пропорциональным средней плотности плазмы. Таким образом, экспериментально установленный факт самосогласованности профилей давления плазмы в токамаках интерпретируется на основе статистического подхода, успешно используемого исследователями сложных неравновесных систем, где равновесные состояния являются следствием самоорганизации. Достоинством такого подхода является возможность обойтись без детализации «работы» самого физического механизма самосогласования. Насколько удачно был выбран механизм, можно судить, лишь анализируя полученные решения. При этом сами решения, как правило, не удается довести до окончательного численного ответа. Однако функциональное соответствие поведения решений экспериментальным фактам дает основания надеяться на то, что физический механизм был выбран правильно.

Другое явление, наблюдаемое в экспериментах по нагреву плазмы в тороидальных ловушках — транспортные переходы в режим улучшенного удержания или так называемые L-H переходы. Режимы улучшенного удержания весьма разнообразны даже для одной тороидальной установки. Поэтому важным является описание наблюдаемого перехода на каждой тороидальной установке и его классификация. На устных заседаниях секции были представлены экспериментальные исследования транспортных переходов на небольших тороидальных магнитных ловушках: токамаке T-11M, где используется литиезация вакуумной камеры для борьбы с поступлением примесей в плазму, и стеллараторе J-2M.

В докладе **А.Н. Щербак с соавторами** «Исследование феноменологии развития режима улучшенного удержания на токамаке T-11M» (ТРИНИТИ) представлено исследование перехода в режим улучшенного удержания, который существенно отличается как от ординарного режима работы токамака с лимитером (L-режима), так и от так называемых лимитерных H-мод. Их главное отличие от последних — рост плотности плазмы в центре шнура при сохранении, примерно, постоянным ее уровня на периферии. Пример такого перехода был продемонстрирован, в частности, на токамаке с литием FTU. Наблюдения транспортного перехода в T-11M показали, что режим улучшенного удержания существенно отличается от известной лимитерной H-моды прежде всего ростом плотности плазмы в центре шнура, что, как известно, характерно для развития внутреннего транспортного барьера, отсутствием ELMов, что характерно для токамаков, использующих литий. Обнаружено, что для дейтерие-

вой и водородной плазмы зависимость фактора пикированности от времени разряда для режима улучшенного удержания имеет разный характер. Это может свидетельствовать о том, что в образовании режима улучшенного удержания важную роль играет масса иона.

Важной особенностью обнаруженного режима стало одновременно с ростом времени жизни энергии τ_E (в 1,3–1,5 раз) видимое уменьшение $Z_{\text{эф}}$, что свойственно известному виду режима улучшенного удержания — I-моду. Анализ сигналов с матричного XUV-детектора показывает, что существование плазмы в режиме с улучшенным удержанием сопровождается развитием моды $m = 1$ и пилообразными колебаниями в центре шнура, что также характерно для развития I-моды.

В докладе **Д.Г. Василькова с соавторами** «Транспортные переходы при высокой мощности ЭЦР-нагрева в стеллараторе Л-2М» (ИОФ РАН) представлено описание транспортных переходов, наблюдаемых в стеллараторе Л-2М. В работе показано, что в серии экспериментов с нагревом плазмы одним гиротроном, когда мощность нагрева составляла до 400 кВт, обнаружен транспортный переход, сопровождающийся ростом энергии плазмы до 15%. Наконец, одновременная работа двух гиротронов позволила достичь суммарной поглощенной мощности 500 кВт и получить рост энергии при переходе до 25% и средней электронной плотности до 50%. Наблюдаемое явление можно определить как L—H-переход. В центральной области плазменного шнура наблюдается уплощение профиля электронной температуры и «провальный» профиль плотности. Существенное изменение параметров плазмы зафиксировано на краю плазмы: ленгмюровские зонды показывают падение уровня флуктуаций плотности и падение потенциала плазмы. В краевой области в момент перехода наблюдается рост интенсивности свечения ВП и падение Na, а также растёт мощность коротковолновой турбулентности.

Использование дополнительных методов нагрева ионной компоненты в современных тороидальных ловушках осложняется проблемой удержания горячих ионов в компактных и сферических токамаках. Особенностью тороидальных ловушек с малым аспектным отношением является малое значение тороидального поля и, как следствие, большой размер ларморовских орбит ионов и их плохое удержание. Дополнительный интерес к удержанию энергичных ионов (ЭИ) обусловлен планами сооружения компактных источников нейтронов на основе реакций ядерного синтеза в установках с магнитным удержанием. Исследованию удержания энергичных ионов

в компактном токамаке «ТУМАН-3М» посвящена работа **С.В. Лебедева с соавторами** «Энергичные ионы в плазме компактного токамака: роль магнитного поля в удержании ЭИ» (ФТИ РАН). Авторы приходят к выводу о том, что, по-видимому, единственным путем улучшения удержания энергичных ионов (ЭИ) при сохранении компактности является увеличение магнитного поля и плазменного тока в таких установках. По этому пути идут эксперименты на трех сферических токамаках: NSTX (Принстон), MAST (Калэм) и Глобус-М (ФТИ РАН). Для получения представления о влиянии B_t и I_p на параметры плазмы и возможность улучшения удержания ЭИ на ТУМАНе-3М в последнее время были осуществлены эксперименты с увеличенными полем. Наиболее чувствительным методом слежения за поведением ЭИ является регистрация потоков нейтронов, возникающих в реакциях ядерного синтеза. В результате исследования были установлены зависимости поведения потоков нейтронов I_n от магнитного поля, плазменного тока и плотности плазмы. При увеличении магнитного поля и тока обнаружено двухкратное увеличение потока DD-нейтронов.

В докладе **Н.Н. Бахарева с соавторами** «Удержание ионов высокой энергии в токамаках Глобус-М и Глобус-М2» (ФТИ РАН) были проанализированы результаты экспериментов по ионно-циклотронному нагреву (ИЦН) и нейтральной инжекции (НИ) на токамаке Глобус-М (при токе плазмы 200 кА и тороидальном магнитном поле 0,4 Тл). Также с помощью моделирования получены потери быстрых ионов в токамаке Глобус-М2, где ток плазмы будет увеличен до 500 кА, а тороидальное магнитное поле — до 1 Тл. При применении ИЦН наблюдался рост ионной температуры со 180 до 320 эВ. В эксперименте выяснено, что в плазме удерживаются запертые частицы с энергиями до 15 ± 5 кэВ. Моделирование орбит водорода высокой энергии показало, что энергия ускоренных ионов не может превышать 16 кэВ, что хорошо согласуется с экспериментальными данными. На токамаке Глобус-М2 магнитное поле и ток плазмы будут повышены в 2,5 раза, в результате чего будут удерживаться запертые ионы с энергией до 100 кэВ. Таким образом, на токамаке Глобус-М2 при повышении магнитного поля в 2,5 раза проблема плохого удержания быстрых ионов будет полностью решена и ожидается существенный рост температуры ионов и нейтронного выхода.

Электронный циклотронный нагрев плазмы широко используется в тороидальных магнитных ловушках. Он также будет проводиться на стоящемся токамаке ITER в качестве основного ме-

тогда нагрева электронной компоненты. Уровень мощностей нагрева на современных установках составляет 1 МВт и выше. Использование такой большой мощности выявило новую проблему: вынос плазмы из зоны нагрева, так называемый *density pump out effect*. Это явление было исследовано на токамаке T-10 и стеллараторе J-2M. В докладе **В.Ф. Андреева с соавторами** «*Экспериментальное исследование эффекта «density pump-out» при центральном ЭЦР нагреве на токамаке T-10»* (НИЦ КИ) приводятся результаты экспериментов по исследованию эффекта «density pump out» от параметров плазмы при центральном ЭЦР-нагреве. В работе показано, что с ростом средней плотности эффект «density pump-out» растет до некоторого критического значения плотности $\langle n_e^{cr} \rangle$, начиная с которого вынос плотности из зоны ЭЦР нагрева уменьшается. Показано также, что с ростом мощности центрального ЭЦР-нагрева эффект «density pump-out» возрастает, а с ростом полного тока плазмы — уменьшается.

На стеллараторе J-2M после создания нового гиротронного комплекса МИГ-3 удалось увеличить удельный энерговыход при ЭЦР-нагреве до рекордных значений в тороидальных магнитных ловушках $P/V = 3$ МВт/м³. В этих условиях эффект «density pump-out» возрастает настолько, что приводит к изменению характера профилей электронной плотности плазмы. В докладе **Летунова А.А. с соавторами** «*Профили плотности электронов плазмы стелларатора J-2M при высоких удельных энерговыходах»* (ИОФ РАН) приведены результаты измерения профиля плотности в режиме ЭЦР-нагрева в условиях высоких удельных мощностей. В докладе показано, что в режимах с удельным энерговыходом $P/V = 0,4\text{--}0,6$ МВт/м³ средняя по каждой хорде плотность монотонно спадает к периферии. При этом профиль плотности электронов хорошо приближается «параболой» — $N_0[1 - (r/a)^p]$. С увеличением мощности профиль уплощается, чему соответствует рост величины p . При удельных энерговыходах $P/V > 1$ МВт/м³ впервые были замечены признаки немонотонной зависимости плотности от эффективного радиуса, т.е. профиль плотности становится провальным в центре плазменного шнура. Для режимов с высоким удельным энерговыходом $P/V > 2$ МВт/м³, восстановленные профили плотности плазмы имеют относительную глубину ямы до 50%. Немонотонные профили были зарегистрированы и на других установках в режимах с ЭЦР-нагревом плазмы, но на стеллараторе J-2M профили демонстрируют заметно большую относительную величину центрального спада плотности, что связано именно с высоким удельным энерговыходом.

В целом работа секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы» была успешной и продемонстрировала соответствие уровня работ, проводимых в российских научных центрах в данной области исследований, мировому уровню. Возрос вклад российских ученых в международные проекты по исследованию высокотемпературной плазмы. Возросло по сравнению с прошлым годом число молодых ученых, принимавших участие в работе секции.

Секция

«Инерциальный термоядерный синтез»

На секции «Инерциальный термоядерный синтез» было представлено 4 обзорных, 12 устных докладов (в двух сессиях) и 33 стендовых сообщения (в двух сессиях). К сожалению, некоторые из заявленных в секционной программе докладов не состоялись по форс-мажорным обстоятельствам.

Работы по физике и технологии мишеней ЛТС были немногочисленны. **Е.Р. Корешева**, представляющая Лабораторию термоядерных мишеней ФИАН, имеет значительный опыт в разработке соответствующих технологий (см. материалы предыдущих конференций). В докладе «*Механический макет реактора ИТС для оптимизации технологий частотного формирования и доставки криогенных топливных мишеней»* **Е.Р. Корешева** сообщила о начале совместного с НИЦ КИ проекта, направленного на создание механического макета лазерного ТЯ-реактора. Он необходим для отработки технологий, связанных с производством и частотной доставкой криогенных мишеней в реакторную камеру, синхронизацией лазерного импульса с доставкой мишени, снижением рисков и решения ряда иных проблем, возникающих при проектировании пилотной энергетической ЛТС-станции (запуск которой ожидается около 2025 г.). Проблема расчета теплопереноса в плазме ЛТС, для которой типичны значительные градиенты температуры и плотности, была рассмотрена в докладе **С.А. Карпова** «*Моделирование теплового переноса в плазме ЛТС с учетом столкновений»* (ВНИИА) с кинетических позиций: предложен новый подход, в котором нелинейный оператор кулоновских столкновений рассчитывается с помощью оригинального метода типа Монте-Карло. На резких градиентах эта методика работает лучше, чем нелокальное приближение, тогда как на плавных профилях ситуация не столь однозначна. В сообщении **Г.В. Долголевой** «*Исследование влияния переноса быстрых заряженных частиц на горение термоядерных мишеней»* (ИПМ РАН) было проведено сопоставление трех

приближений, используемых для расчета ТЯ-горения при учете переноса α -частиц: локального, многогруппового диффузионного и кинетического. Показано, что удовлетворительную точность дает диффузионное приближение, позволяющее достичь большей скорости сходимости. Были также представлены результаты численного решения 1D-модельных задач о самовоспламенении сферической газовой мишени (**В.А. Щербаков**, ВНИИЭФ) и степени выгорания топлива в двух симметрично сходящихся плоских волнах ТЯ-горения при быстром поджиге сжатой мишени (**А.А. Чахчян**, ВЦ РАН).

Последовательное развитие **С.В. Рыжковым** (МГТУ им. Баумана) с коллегами концепции ТЯ-синтеза в замагниченной мишени (см. обзорный доклад и материалы предыдущих конференций) нашло отражение в сообщении о создании 2D-PMГД-кода PLUM (Plasma jets and Laser driven Universal Model — универсальная модель с плазменными струями и лазерными пучками в качестве драйвера) для расчета взаимодействия сферических и цилиндрических мишеней с многопучковыми источниками во внешнем МП. В PLUM включено решение уравнений Максвелла и Ома в плазме с конечной проводимостью. Транспортные коэффициенты учитывают замагниченность лазерной плазмы, перенос излучения рассчитывается в многогрупповом диффузионном приближении.

В области практических применений методик, созданных для моделирования задач ИТС, следует отметить комплексное исследование, представленное в докладах **И.П. Цыгвинцева с соавторами** (ИПМ РАН), проведенное на основе программ 3DLINE (в упрощенной постановке задачи), THERMOS-BELINE и 2D-PMГД-кода RZLINE с подключенными библиотеками OpenFoam. Его целью был анализ физических процессов при воздействии лазерных импульсов на различные мишени для выяснения возможности получения источников излучения с заданными свойствами, практическая ценность которых (особенно, в дальнем УФ-диапазоне) определяется требованиями технологии литографии интегральных схем с высокой степенью упаковки. В данном случае, в качестве мишени рассматривалась капля олова с последующим ее дроблением импульсом лазерно-иницированного абляционного давления, т.к. одна из основных проблем современной технологии заключается в «наиболее полезном» заполнении литографической камеры излучающей плазмой.

Остальные доклады лазерно-плазменной тематики были, в основном, посвящены исследованию

взаимодействия мощных ультракоротких лазерных импульсов (УКИ) с веществом, приводящего, в том числе, к генерации сгустков быстрых ионов, применение которых весьма разнообразно и не ограничивается областью ИТС. На пикосекундной лазерной установке в СОКОЛ-П (РФЯЦ-ВНИИТФ, докладчик **К.В. Сафронов**) была продолжена серия экспериментов по генерации нейтронов в двойных мишенях: $\text{H}_8\text{C}_{10}\text{O}_4$ (LiF), CD_2 (LiF) и CD_2 (LiD) (о первых результатах было сообщено годом ранее). Зарегистрированы нейтроны с энергией свыше 10 МэВ, что является свидетельством реакции ${}^7\text{Li}(d, n){}^8\text{Be}$. Суммарный выход превысил 5×10^8 нейтронов/выстрел, что находится на уровне результатов, достигнутых зарубежными группами. Следует особо отметить работу, представленную **Н.Н. Демченко** (ФИАН), в которой был проведен теоретический и расчетный анализ результатов эксперимента на лазерной установке «Неодим» (ЦНИИМАШ) по ускорению адсорбированных протонов с тыльной стороны плоской алюминиевой мишени. В этом эксперименте было обнаружено, что энергия протонов, ускоренных на тыльной стороне мишени, имеет максимум, возникающий при определенной начальной толщине мишени, ниже которой наблюдается спад, что является нетривиальным эффектом. Он связан со структурой импульса данной установки, его параметрами, т.к., при выходе иницированной первым предимпульсом волны сжатия на тыльную поверхность происходит откол части мишени. Соотношение скоростей частей мишени, их толщины и времени прихода второго предимпульса определяет ширину зазора между частями мишени на момент прихода основного импульса. Появление максимума в энергии протонов объясняется тем, что размытие границы, при котором размер неоднородности превышает дебаевский радиус быстрых электронов, приводит к снижению электрического поля в окрестности границы и уменьшению энергии ускоряемых протонов. Вероятность влияния структуры реального лазерного импульса следует учитывать при анализе подобных экспериментов. Доклады сотрудников ОИВТ РАН были посвящены вопросам моноэнергетичности электронного сгустка, инжектированного в кильватерное поле (**С.В. Кузнецов**) и эффективности генерации K_α -излучения при вакуумном нагреве электронов мишени, покрытой сферическими кластерами (**О.Ф. Костенко**).

Традиционно много сообщений было представлено сотрудниками Лаборатории диагностики плазмы ФИАН. В докладе **А.В. Брантова**, продолжившем цикл работ, представленных на предыду-

щих конференциях, с помощью 3D-кода «Мандор» была получена универсальная зависимость максимальной энергии ускоренных ионов от энергии лазерного излучения при оптимальных по толщине мишени (без учета упомянутого выше эффекта откола) условиях взаимодействия. Показано, что без учета ионизации полем нельзя объяснить возникновение квазимоноэнергетических сгустков ускоренных электронов мишени. Эффективность ускорения протонов из тонких мишеней оптимальной толщины падает при наличии пикосекундного предимпульса, частично разрушающего мишень (что, в общих чертах, близко идее доклада **Н.Н. Демченко**). Большой интерес вызвал доклад, представленный **И.И. Метельским**: в модели, описываемой уравнениями Максвелла и холодной гидродинамики, аналитическими методами ренормгруппового анализа, позволяющими выйти за рамки теории возмущений, был исследован один из механизмов генерации высших гармоник (ГВГ): вторичного излучения с частотами высокой кратности при нелинейном отклике вещества на воздействие интенсивных (от 10^{18} Вт/см²) лазерных импульсов в области критической плотности при резонансном поглощении излучения плазмой, что важно и для точной диагностики лазерной плазмы. В сообщении **Е.А. Говраса** была представлена теоретическая модель разлёта в вакуум плазменного слоя с бальцмановскими электронами для произвольных значений их температуры, которая является управляющим параметром теории и непосредственно связана с интенсивностью лазерного импульса: переход от режима квазинейтрального разлёта к случаю кулоновского взрыва происходит при увеличении этой температуры. В докладе **С.Г. Бочкарева** было рассмотрено нелинейное томсоновское рассеяние сильно сфокусированного (размер фокального пятна D сравним с длиной волны лазера λ) релятивистского ультракороткого лазерного импульса (УКИ) свободными электронами, генерируемыми в результате воздействия излучения на ультратонкие фольги. Показано, что в этом случае пробный электрон, ускоряясь в области фокального пятна, генерирует аттосекундный импульс рентгеновского излучения (РИ). Также показано, что параксиальное приближение, не учитывающее продольную компоненту электрического поля, оказывающую существенное влияние на ускорение электронов, менее точно описывает характеристики рассеяния. Близкая к этому вопросу задача об усредненном движении релятивистской заряженной частицы в поле мощного гауссова излучения произвольной моды — вне рамок проблемы взаимодействия релятивист-

ского УКИ с плазмой — была рассмотрена в сообщении **В.П. Милантьева** (РУДН).

Единственное сообщение, относящееся к диагностике лазерного эксперимента, было представлено **И.А. Ащеуловым** (ВНИИА): созданный авторами макет спектрографа импульсного РИ с фокусировкой по схеме Кошуа на основе ПЗС-регистратора, предназначенный для регистрации рентгеновских спектров высокотемпературной плазмы в диапазоне 5–40 кэВ (иные принципы фокусировки не эффективны в спектральном диапазоне свыше 10 кэВ), был успешно апробирован в экспериментах по взаимодействию лазерного излучения с плоскими Zn- и Y-мишенями на установке «Искра-5» (ВНИИЭФ). Спектральное разрешение составило не более 13 эВ.

Большинство докладов разрядной тематики было посвящено методике, диагностике и технике экспериментов на сильноточных импульсных установках. В сообщении **С.А. Пикуза** были проанализированы перспективы применения флуоресцирующих запоминающих пластин (ФЗП) для диагностики плазмы. ФЗП обладают рядом преимуществ перед обычными фотоматериалами, однако сведений о параметрах ФЗП в диапазоне энергий 1–10 кэВ имеется мало. В работе показано, что в диапазоне энергий 1–5 кэВ ФЗП имеют почти на порядок большую чувствительность, чем фотопленка, а многократное сканирование пластин, сохраняя изображение, позволяет даже переэкспонированные участки снимка выводить в область линейного отклика, т.е. расширяет реальный динамический диапазон до 10^6 – 10^7 . К недостаткам можно отнести низкое пространственное разрешение (~25 мкм). Кроме того, проведены исследования жесткого излучения (ЖИ), генерируемого стандартным X-пинчем (СХП) при обрыве перетяжки в результате радиационного взрыва горячей точки. Для гибридных X-пинчей (ГХП) ранее (см. материалы предыдущих конференций) было отмечено значительное — относительно СХП — снижение интенсивности ЖИ, однако последние эксперименты (доклад **Т.А. Шелковенко**) показали наличие в ГХП короткого пучка такого излучения. Максимальная зарегистрированная энергия квантов превышает 60 кэВ при размере источника меньше 1 миллиметра. Размер источника излучения с энергией выше 11 кэВ может быть порядка 20–25 микрон при длительности вспышки излучения 2–3 нс. Такой источник пригоден для проекционной рентгенографии протяженных объектов, где не требуется слишком большое увеличение. Высказанная годом ранее идея о возможности использования ГХП как единого источника излучения для одновремен-

ной реализации методик точечной проекционной рентгенографии и рентгеновской абсорбционной спектроскопии была реализована и успешно апробирована в экспериментах на установках БИН и ХР, в ходе которых РИ от ГХП с Мо-нагрузкой служило источником для подсветки объектного ГХП с нагрузкой из алюминия (сообщение **И.Н. Тиликина**).

Интерес вызвали сообщения, представленные **Е.О. Бароновой** (НИЦ КИ). Созданные авторами спектрополяриметр и численный код, позволяющий быстро восстанавливать экспериментально зарегистрированный спектр меди в диапазоне 9–14 Å, идентифицировать спектральные линии и т.д., позволил впервые экспериментально показать наличие поляризации 3F, 3G-линий L-оболочки меди, эмитированных плазмой X-пинча. Надо отметить, что подобные эксперименты немногочисленны и трудоемки. Детального объяснения механизма явления пока нет, но сам эффект следует учитывать при рентгеновской спектроскопии плотной высокотемпературной плазмы.

В докладах группы, проводящей исследования на сильноточной (до 6 МА) установке «Ангара-5-1» (ТРИНИТИ), в основном, сообщалось о планомерном развитии предложенных ранее методик и их применениях. В 2012 г. было заявлено о максимальном зарегистрированном нейтронном выходе ($\sim 3 \times 10^{10}$) в быстром Z-пинче из малоплотного CD_2 . В докладе **В.Д. Королева** было указано, что воспроизводимость этого результата при использовании нагрузки из порошкообразного CD_2 с линейной плотностью 200–300 мг/см³ (максимум тока 2,5–3 МА) ниже, чем в пинче с нагрузкой из микропористого CD_2 с плотностью 100 мг/см³, где такой же выход был получен при несколько меньшем токе. Подчеркивалось, что максимальное значение выхода было зафиксировано при массе нагрузки 200 мкг и длине 2,5 мм, т.е. дальнейшее увеличение выхода может быть достигнуто при оптимизации нагрузки из микропористого CD_2 , что позволит согласовать время нарастания тока с моментом образования локальных высокотемпературных плазменных образований, являющихся источником нейтронов. Подобные исследования мотивируются тем, что получение высокого нейтронного потока является необходимым для инициации ТЯ-горения в перетяжке пинча с дальнейшим распространением волны горения (эта тема была затронута и в обзоре **В.В. Вихрева**).

Как отмечалось на предыдущих конференциях, по величине анизотропии мягкого рентгеновского (МР) излучения мощного Z-пинча можно опре-

делить размер области пинча, излучающей в МР-диапазоне. В докладе **А.Н. Грицука** продемонстрировано достоверное совпадение результатов измерения спектров МР-излучения в радиальном направлении, полученных независимыми способами. Экспериментальному исследованию прорыва магнитного потока внутрь объема многопроволочной сборки на финальной стадии имплозии был посвящен доклад **Е.А. Птичкиной**. В этой работе впервые было получено и исследовано аксиальное распределение индукции азимутального МП вблизи одной из проволок на различных стадиях имплозии. Показано, что из этих распределений можно определить уровень неоднородности индукции азимутального МП, момент окончания плазмообразования (момент прорыва магнитного потока) и пространственный размер неоднородностей. Ранее развитие неустойчивостей на внешней границе плазмы вблизи начального радиуса сборки изучалось, в основном, с помощью оптических и рентгеновских диагностик.

Несколько работ было посвящено развитию вычислительных методик, осуществляющих поддержку разрядных экспериментов. Как сообщалось ранее, во ВНИИЭФ был создан 2D-эйлеров РМГД-код FLUX-gz, предназначенный для моделирования — в том числе — плазмы излучающего Z-пинча. В докладе **А.П. Орлова** на примере моделирования процесса имплозии кольцевой плазменной оболочки представлены предварительные результаты исследований по учёту в обобщённом законе Ома холловского члена и силы электронного давления. Показано, что даже при отсутствии начального возмущения плотности характер имплозии оболочки, как и эволюции магнитного поля, существенно двумерен. В результате, вблизи катода развивается крупномасштабная гидродинамическая неустойчивость, приводящая к прорыву магнитного поля в радиальном направлении (что перекликается с сообщением **Е.А. Птичкиной**). Применение того же кода для моделирования лайнерного эксперимента с генератором ВМГ-200, проведённого во ВНИИЭФ, обсуждалось в сообщении **Б.Г. Репина**. Сравнительный анализ расчетных импульсов МР-излучения с экспериментально зарегистрированными сигналами — чему было уделено особое внимание — показал хорошее согласие расчетных и экспериментальных результатов. Следует также отметить работу, представленную **О.Г. Ольховской** (ИПМ), в которой показано, что расчет по РМГД-коду MARPLE-3D позволяет получать важные характеристики, которые могут быть прямо сопоставлены с конкретными экспериментами по имплозии многопроволочных цилиндрических сборок на установке

«Ангара-5-1», например, интегральные по времени и по пространству спектры излучения плазмы в зависимости от полярного угла, интегральные по времени изображения пинча, получаемые с помощью камер-обскур с разными фильтрами, а также зависимость спектра излучения плазмы пинча от времени.

Вопросам техники разрядного эксперимента, в частности, проблемам транспортировки токовых импульсов в вакуумных транспортирующих линиях (ВТЛ), были посвящены доклады **А.О. Шишлова** (ТРИНИТИ) и **С.И. Ткаченко** (МФТИ). В первом из них, в дополнение к представленным годом ранее результатам, описана методика локализации утечек по инфракрасному (ИК) излучению, регистрируемому с нагретых токами утечки зон на поверхности электродов. Во втором докладе в рамках 1D-МГД-модели проведены расчеты физических процессов, которые могут ограничивать эффективность транспортировки энергии субмикросекундных импульсов тока по ВТЛ с магнитной самоизоляцией.

В течение последних 10 лет наблюдается возрождение интереса к схемам с инерционным электростатическим удержанием — ИЭУ (доклады **Ю.К. Куриленкова**, ОИВТ РАН). На предыдущих конференциях был экспериментально продемонстрирован — в схеме с полым катодом и дейтерированным Pd анодом, основанной на наносекундном вакуумном разряде (НВР) с контролируемой потенциальной ямой (ПЯ) — столкновительный DD-синтез в межэлектродной среде НВР. PIC-моделирование по коду KARAT прояснило физику процессов и выявило принципиальную роль образования виртуального катода и соответствующей ему ПЯ. Выход нейтронов на 1 Дж энергии, введенной в разряд, составил 10^5 – $10^7/4\pi$ в изотропном приближении. В 2013 г. при поддержке РФФИ совместно с сотрудниками ФИАН авторами была создана новая установка. В предварительных экспериментах получена генерация DD-нейтронов с энергией 2,45 МэВ. Начато исследование возможности использования выбранной схемы ИЭУ, основанной на продемонстрированной высокой плотности мощности DD-синтеза, для безнейтронного ТЯ-синтеза p - B^{11} за счет резкого локального пика сечения этой реакции при энергии ~ 148 кэВ в системе центра масс.

По итогам работы секции можно сделать следующий вывод. Наблюдаемое с 2010 г. сокращение числа сообщений об экспериментальных исследованиях в области ЛТС и физики мощных лазеров можно объяснить тем, что основные идеи и методы, разработанные ИЛФИ ВНИИ-ЭФ (ведущей организацией по данной тематике),

к настоящему времени хорошо апробированы. Сейчас усилия и ИЛФИ, и смежников сосредоточены на создании мегаджоульной установки, о чем было рассказано на XXXIX и XL конференциях. Но те же соображения могут быть высказаны по поводу приоритетов ТРИНИТИ (создание установки «Байкал»). В отчете о XL конференции было отмечено, что «физическая» кооперация в период строительства новых установок, обеспечивающая проведение актуальных экспериментов на меньших масштабах энергии, налажена в области физики сильноточных пинчей (АНГАРА-5-1 и С-300), но практически отсутствует в области ЛТС. Эта тенденция нашла отражение и в составе представленных на XLI конференции работ. Поэтому вновь приходится констатировать, что необходимость создания лазерных установок с энергией порядка 1 кДж и проведения на них экспериментов, в том числе по сферическому облучению мишеней, остается актуальной задачей для развития национальной программы работ в области ЛТС.

Секция «Физические процессы в низкотемпературной плазме»

На XLI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС в рамках Научного совета РАН по проблеме «Физика низкотемпературной плазмы» работала секция «Физические процессы в низкотемпературной плазме» (председатель секции **В.С. Воробьев**). Было заслушано 24 устных доклада и 60 стендовых сообщений.

Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям:

- 1) термодинамические и транспортные свойства неидеальной плазмы;
- 2) элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы;
- 3) различные применения низкотемпературной плазмы;
- 4) плазма, возникающая в импульсных процессах.

По этим же направлениям можно разбить и стендовые доклады, хотя здесь было большое количество докладов, связанных с технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России, применительно к таким аспектам физики низкотемпературной плазмы как воздействие на пылевую

плазму и плазму газового разряда внешних полей. Было заслушано четыре устных доклада по этой тематике.

Интерес вызвал доклад **Храпака А.Г.** «Термодинамика дебаевских систем в слабо и умеренно неидеальных режимах» (ОИВТ РАН). Для улучшения точности традиционной модели Дебая-Хюккеля при расчете термодинамических свойств неидеальной однокомпонентной плазмы было предложено приближение «Debye-Hückel plus hole» (ДНН). Этот термин обычно ассоциируется с работой Нордхольма, хотя близкие аргументы были использованы ранее Грязновым и Иосилевским.

В докладе **А.Л. Хомкина и А.С. Шумихина** «Особенности диссоциативного фазового перехода в плотном водороде (дейтерии) и аномалии на адиабате и изоэнтропе» (ОИВТ РАН) были рассмотрены основы теории металлизации атомарного газа, заложенные еще в работах Вигнера-Зейтца и Дж. Бардина. Результатом этой теории стали расчеты коллективной квантовой энергии связи (cohesive energy), сжимаемости и пр. для жидких щелочных металлов. Физические причины металлизации обусловлены появлением блоховских электронов (за счет перекрытия волновых функций) и увеличением (по абсолютной величине) энергии основного состояния (электронного терма) системы атомов в целом. Проявление эффектов металлизации следует ожидать в условиях, когда среднее межчастичное расстояние сравнимо с диаметром частицы.

В докладе на основе модели плотного водорода (дейтерия), предложенной ранее [1], были представлены результаты расчета бинадали диссоциативного фазового перехода, адиабаты Гюгонио и изоэнтропы сжатия плотных водорода и дейтерия. В основе термодинамической модели лежит предположение о том, что взаимодействие между свободными атомами в плотном водороде и дейтерии происходит за счет коллективной квантовой энергии связи (cohesive energy), связанной с делокализацией связанных электронов основного состояния атома и образованием зоны проводимости. Эта энергия аналогична энергии связи атомов в жидких щелочных металлах. Парно аддитивное центрально симметричное приближение для описания межатомного взаимодействия в этих условиях не работает.

В докладе **Н. Дятко и др.** (ТРИНИТИ) была представлена работа по кинетике низкотемпературной плазмы. Ее название «Эффект памяти в импульсном разряде в азоте: корреляция между концентрацией электронов в разрядном промежутке и возникновением волны ионизации при

пробое». Известно, что добавление молекулярной примеси в инертный газ приводит к изменению электрических и спектральных характеристик тлеющего разряда. Степень и направленность изменения характеристик зависят от условий: сорта инертного газа, сорта и процентного содержания примеси, давления газовой смеси и др. В данной работе разряд зажегся в разрядной трубке длиной 40 см (расстояние между электродами) и внутренним диаметром 2,8 см. Давление азота 1 Торр, температура — 300 К. Напряжение источника питания $V_0 = 3,6$ кВ, балластное сопротивление 260 кОм, ток разряда 8,5 мА. Форма переднего фронта импульса питающего напряжения $V(t) = K_0 t$. Исследовалась последовательность из двух разрядных импульсов длительностью 10 мс каждый. Напряжение пробоя во втором импульсе (U_2) сопоставлялось с напряжением пробоя в первом импульсе (U_1) в зависимости от временного интервала между импульсами, а также регистрировалось наличие (или отсутствие) волны ионизации при пробое разрядного промежутка.

На двух заседаниях стендовой секции было представлено 60 докладов. Значительная часть из них была связана с технологическими применениями низкотемпературной плазмы. Интерес вызвала работа «Скоростная видео- и тепловизионная съемка крупномасштабного плазменного тороидального вихря в атмосферном воздухе» (**Камруков А.С. и др.**, НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, НИИ прикладной химии, г. Сергиев Посад, Моск. обл.).

Другая часть докладов была связана с исследованием свойств и процессов в низкотемпературной плазме. Среди них можно выделить расчет «Параметры ЭЦР-плазмы, формируемой в коаксиальном резонаторе плазменного инжектора CERA-RI-2» (**А.А. Балмашнов и др.**, РУДН)

Третья группа связана с исследованиями специфических форм разрядов в низкотемпературной плазме. Сюда можно отнести, например, доклад «Исследование параметров короткого тлеющего разряда в гелии с нелокальной плазмой» (**А.А. Кудрявцев и др.**, СПбГУ, Санкт-Петербург).

В целом, работа секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» была успешной и прошла на высоком научном уровне.

Секция «Физические основы плазменных и лучевых технологий»

На секции «Физические основы плазменных и лучевых технологий» было представлено 14 устных и 64 стендовых докладов из институтов РАН, вузов СНГ и других ведущих научных цен-

тров России. Доклады были посвящены созданию технологий для новых материалов электроники, новых полупроводниковых материалов, плазмохимии, в том числе плазменному воспламенению топлива, переработке отходов, плазменной медицине и воздействию на грозовую атмосферу. Ряд докладов был посвящен новым аспектам традиционной тематики — генерации низкотемпературной плазмы с помощью ВЧ- и СВЧ-полей, проблемам генерации СВЧ-импульсов, плазменных СВЧ-антенн и воздействию лазерного излучения на вещество.

В докладе **А.С. Скрябина с соавторами** «Изучение процессов преобразования твёрдых частиц оксидов кремния в поликристаллический кремний в аргоново-водородных газоплазменных потоках» (МГТУ имени Баумана) изучены процессы преобразования оксидов кремния в поликристаллический кремний в аргоново-водородных плазменных потоках. Расчеты показали, что возможна конденсация 90% паров кремния в виде частиц с размером до 100–200 мкм. В экспериментах получен поликристаллический кремний размером до 200 мкм и чистотой 99,9%.

В докладе **М.Б. Шавелкиной с соавторами** «Синтез углеродных нанотрубок в плазмоструйном реакторе в присутствии катализаторов» (ОИВТ РАН, МГУ), с целью разработки высокопроизводительной технологии исследован синтез углеродных нанотрубок с помощью плазмотрона постоянного тока мощностью до 25 кВт, обеспечивающего испарение материалов на основе углерода и их последующую конденсацию. В целом, получены экспериментальные данные, позволяющие поэтапно масштабировать процесс получения нанотрубок нужной морфологии.

В работе **М.Х. Гаджиева с соавторами** «О взаимодействии высокоэнтальпийной плазменной струи с поверхностью графита» (ОИВТ РАН) исследовано взаимодействие высокоэнтальпийной (>40 кДж/г) плазменной струи азота или воздуха диаметром 10–15 мм с поверхностью технического и пиролитического графита. В азотной плазме наблюдается выход струй сублимированного углерода с размером 20–100 мкм и скоростью истечения 30–100 м/с. В воздушной плазме включается также процесс поверхностного горения графита.

В докладе **Субботина Д.И. с соавторами** «Использование паровоздушной плазмы для разложения отходов пластиков с целью получения синтез-газа с низким содержанием смол» (ИЭЭ РАН, Санкт-Петербург) исследовано использование паровоздушной плазмы для разложения отходов пластиков с целью получения синтез-газа. Использование паровоздушной плазмы дает возможность получить синтез-газ с высоким со-

держанием водорода и окиси углерода и снизить содержание азота и двуокиси углерода. Однако это происходит за счет дополнительного расхода электроэнергии в дуговом плазмотроне, так как процесс с водяным паром эндотермичен.

Интерес вызвал доклад **Г.И. Змиевской и А.Л. Бондаревой** «Численное моделирование формирования наноструктур при ионной имплантации» (ИПИМ РАН), в котором проведено математическое моделирование формирования наноструктур при ионной имплантации. Исследовано образование пор (порообразование) в карбиде кремния под действием имплантации ионами инертных газов, что может быть рассмотрено как возможная технология получения пористого карбида кремния. Исследована также повреждаемость карбида кремния как упрочняющего покрытия и перспективного полупроводника.

В устном докладе **Н.А. Попова** «Исследования поперечного тлеющего разряда в сверхзвуковом потоке газа» (НИИЯФ МГУ) проводился расчет химических процессов и нагрева плазмы поперечного тлеющего разряда в воздухе. Основное внимание уделялось анализу плазмохимических процессов в воздухе при высоких степенях диссоциации молекул кислорода и адекватному описанию реакций ассоциативной. Снижение величины поля со временем при постоянном значении тока происходит за счет увеличения проводимости плазменного шнура вследствие роста радиуса канала и максимальной концентрации электронов. Работа позволила объяснить ряд экспериментальных результатов, полученных ранее на кафедре физической электроники МГУ.

В устном докладе **И.М. Пискарева с соавторами** «Образование пероксинитрита под действием УФ-излучения самостоятельного искрового разряда на воздухе» (НИИЯФ МГУ, Нижегородская медицинская академия) было обнаружено, что бактерицидное действие излучения искрового разряда в воздухе может быть связано с образованием пероксинитрита, который вызывает гибель прокариотических и эукариотических клеток.

В докладе **А.И. Головина с соавторами** «Генератор электронного пучка, основанный на ускорении электронов из высоковольтного тлеющего разряда» (ФГУП «Центр Келдыша») предложена конструкция генератора электронного пучка. Его катод выполнен в виде неохлаждаемого металлического цилиндра, плотно вставленного в керамический изолятор, имеющий в торцевой части соосное катоду отверстие, к изолятору прижат металлический анод. По результатам работы подана заявка на изобретение № 20132485 от 15.07.2013.

Несколько устных докладов были посвящены эффектам генерации СВЧ-излучения, его возбуждения с помощью плазменных антенн, созданию плазмы с помощью СВЧ-излучения и другим эффектам.

В работе **Ернылевой С.Е. и Лозы О.Т.** «Предотвращение укорочения СВЧ-импульса в плазменном релятивистском СВЧ-генераторе» (РУДН) в численных расчетах найден способ предотвращения эффекта укорочения СВЧ-импульса в плазменном релятивистском СВЧ-генераторе (ПРГ), который происходит вследствие падения коэффициента усиления и нарушения обратной связи. Предложен метод создания плазмы, существенно повышающий стабильность ее параметров и устраняющий причины срыва СВЧ-генерации.

В работе «Плазменный релятивистский источник СВЧ-излучения в условиях пространственно-неоднородной плотности плазмы», авторами которой являются **И.Л. Богданкевич, С.П. Стрелков** (ИОФ РАН) и **В.П. Тараканов** (ОИВТ РАН), была рассмотрена модель трубчатой плазмы, в которой плотность плазмы зависит от координаты вдоль оси плазменного цилиндра, при сохранении постоянства параметров релятивистского электронного пучка (РЭП) и внешнего магнитного поля. В широком диапазоне первоначальных плотностей плазмы как в режиме усиления, так и в режиме генератора (усилителя шумов), не было обнаружено эффекта укорочения импульса СВЧ-излучения. Мощность выходного излучения оставалась примерно одинаковой в течение импульса тока РЭП или снижалась к середине импульса РЭП, затем увеличивалась и исчезала только в соответствии с формой импульса напряжения (тока) РЭП.

Еще в одном докладе **И.Л. Богданкевич с соавторами** «Влияние параметров системы на когерентность излучения плазменного релятивистского СВЧ-усилителя» (ИОФ РАН, МГТУ МИРЭА) была показана сильная зависимость когерентности выходного излучения плазменного релятивистского усилителя от плотности плазмы, индукции внешнего магнитного поля и коэффициента связи между плазменной волной и волной объемного заряда пучка. Изменяя их, можно получить как когерентное излучение, так и широкополосный «шумовой» спектр.

В работе **О.Б. Дементьевой** «Плазменная антенна-усилитель на СВЧ разряде» (МГУТУ) эксперименты с передающей антенной дали интересные результаты: в режиме передачи интенсивность излучения короткой плазменной антенны оказалась на 20–30дБ больше, чем металлической.

Н.Н. Богачевым (МГТУ МИРЭА), **И.Л. Богданкевич** и **Н.Г. Гуссейн-Заде** (ИОФ РАН) проведено моделирование плазменной вибраторной антенны в коде «Карат». Исследованы радиофизические характеристики антенны для дисков бесконечного и конечных радиусов. Получены распределения поля и диаграммы направленности антенны, которые сравнивались с результатами для аналогичных металлических несимметричных вибраторных антенн.

В работе **С.А. Урюпина и А.А. Фролова** «Возбуждение поверхностных волн при воздействии на проводник импульса лазерного излучения» (ФИАН, ОИВТ РАН) была рассмотрена возможность возбуждения поверхностных волн в проводнике при воздействии сфокусированного фемтосекундного лазерного импульса. В результате пондеромоторного воздействия лазерного излучения в скин-слое проводника возникает изменяющийся за время воздействия импульса вихревой ток, который приводит к возбуждению поверхностных волн в терагерцовом диапазоне частот. Исследованы частотные и энергетические характеристики поверхностных волн, а также их пространственно-временная структура.

Д.К. Солихов (Таджикский национальный университет, Душанбе) и **С.А. Двинин** (МГУ) в докладе «К теории вынужденного комбинационного рассеяния электромагнитных волн в двумерной области пространства» исследовали пространственные зависимости амплитуд волн и интенсивности рассеянного излучения при локализации волны накачки в двумерно ограниченной области. Расчет показал, что в допороговом режиме рассеиваемая энергия уменьшается с увеличением угла рассеяния. Напротив, в слабо надпороговом режиме рассеиваемая энергия растет с увеличением угла. В сильно надпороговом режиме возрастающая зависимость становится гораздо более резкой.

К.Ю. Вагин и **С.А. Урюпин** (ФИАН) рассмотрели задачу об инкременте неустойчивости продольно-поперечных возмущений в фотоионизированной плазме. Показано, что в плазме, в которой энергия движения электронов вдоль оси анизотропии мала по сравнению с энергией движения поперек нее, область неустойчивости в пространстве волновых векторов \mathbf{k} сосредоточена в относительно узком конусе углов около оси анизотропии. Напротив, в плазме, в которой энергия движения электронов вдоль оси анизотропии максимальна, неустойчивыми оказываются продольно-поперечные возмущения с \mathbf{k} , образующими с осью анизотропии углы, близкие к $\pi/2$.

В работе **К.Н. Овчинникова и С.А. Урюпина** «Диффузия и субдиффузия электромагнитного импульса в неизотермическую плазму с током» (ФИАН) рассмотрена задача о проникновении электромагнитного импульса в неизотермическую плазму с током с развитой ионно-звуковой турбулентностью. Если во время действия импульса из-за турбулентного нагрева изменяются температуры частиц и напряжённость поддерживающего ток поля, то изменение во времени основного состояния является причиной замедления проникновения поля в плазму. Для случая, когда электрическое поле импульса ортогонально оси анизотропии ИЗТ, установлена явная зависимость глубины проникновения импульса от времени $\sim t^{0.25}$.

Большой цикл работ по плазменному горению был представлен коллективами МГУ имени М.В.Ломоносова. В докладе **Д.А. Ваулина с соавторами** (МГУ, ИОФ РАН) был исследован процесс распространения разряда над поверхностью воды в присутствии диэлектрических преград. Полученные результаты требуют дальнейшего осмысления.

В докладах **В.М. Шибкова с соавторами** (МГУ) было показано, что период индукции в условиях газоразрядной низкотемпературной плазмы изменяется от миллисекундного масштаба времени для разряда постоянного тока до нескольких десятков микросекунд в условиях СВЧ-разрядов, существующего при больших значениях приведенного электрического поля $E/N = 100\text{--}200$ Тд. Экспериментально реализована стабилизация горения высокоскоростных воздушно-углеводородных потоков внутри расширяющегося аэродинамического канала. Показано, что температура пламени линейно растёт вдоль аэродинамического канала и выходит на установившееся значение $1800\text{--}1900$ К в зависимости от стехиометрии смеси и секундного расхода топлива. Причем горение бедных смесей происходит эффективнее по сравнению с богатыми, что очень важно с точки зрения экономии топлива. В другом докладе реализована стабилизация горения на пластине, обтекаемой свободным высокоскоростным воздушно-углеводородным потоком при создании на ее внешней поверхности низкотемпературной газоразрядной плазмы. Получено, что в области существования разряда температура газа при горении пропан-воздушного потока изменяется от 2000 до 2500 К, тогда как вне разряда на расстоянии $z = 15$ см от кончиков электродов температура пламени равна, приблизительно, 1800 К, постепенно уменьшаясь вниз по потоку.

В работе **В.Л. Бычкова с соавторами** «Модернизированная система поджигания несамостоя-

тельного газового разряда в пропано-воздушной смеси» (МГУ и МРТИ РАН) продолжены исследования по применению несамостоятельного разряда, создаваемого электронным пучком в присутствии внешнего электрического поля для инициации горения пропано-воздушной смеси. Модернизирована установка, включающая электронный пучок и устройство смешения и ламинаризации смеси, произведен ее поджиг. Проведены расчеты электрон-молекулярных и плазмохимических процессов во влажной пропан-воздушной смеси во внешнем электрическом поле. При наименьшем значении поля $E/N = 30$ кВ/см, приложенном к смеси, поджиг происходит за самое большое время, в течение которого происходит ионизация и нагрев газа плазменными электронами. Было зарегистрировано быстрое изменение состава смеси, приводящее к изменению баланса энергии, накоплению молекулярных ионов с участием молекул воды. Заряженные частицы рекомбинируют медленно из-за быстрого установления высокой температуры в плазме. В работе **В.Л. Бычкова и Д.С. Максимова** «Модель потока ионов в тропосфере» (МГУ и МРТИ РАН) рассмотрен подъем облака отрицательных ионов кислорода к нейтральному облаку. Показано, что важнейшую роль в подъеме ионов играет присутствие вертикального ветра. Этот эффект объясняет неустойчивость результатов экспериментов по управлению осадками.

В работе **Н.Л. Александрова с соавторами** «Воспламенение этанола под действием высоковольтного наносекундного разряда» (МФТИ, Princeton university, USA) экспериментально и теоретически исследовались процессы воспламенения этанола под действием высоковольтного наносекундного импульсного разряда, развивавшегося в форме волны ионизации. Эксперименты проводились на ударной трубе, дополненной разрядной секцией, за фронтом ударной волны. Измерения были проведены в смесях $C_2H_5OH: O_2: Ar$ (90% Ar) для стехиометрических соотношений 1 и 0.5 как для случая воспламенения после разряда, так и для самовоспламенения. Результаты расчёта времен самовоспламенения и стимулированного плазмой воспламенения согласуются с экспериментом. Это говорит об удачном выборе сечений электрон-молекулярных столкновений в недостаточно исследованной плазме паров спирта.

В работе **Е.И. Анохина с соавторами** «Воспламенение ацетилено-воздушной смеси наносекундным поверхностным барьерным разрядом» (МФТИ) было экспериментально получено воспламенение ацетилено-воздушной смеси наносекундным поверхностным барьерным разрядом.

Воспламенение носит многоочаговый характер и происходит по всей поверхности высоковольтного электрода. Прodelано двумерное численное моделирование развития поверхностного барьерного разряда. Результаты расчета показывают существенное различие разрядов в случае отрицательной и положительной полярностей как по нагреву, так и наработке активных частиц в смеси.

Медицинские приложения исследовались в работе **В.Л. Бычкова с соавторами** «Импульсный разряд во влажном воздухе для медицинских приложений» (МГУ, МРТИ РАН). В ней была теоретически рассмотрена разрядная плазма во влажном воздухе при объемном содержании паров воды H_2O в воздухе, находящемся в диапазоне 0,5–4%, соответствующем воздействию газового разряда с расстояния 0–0,85 мм от поверхности человеческой кожи в течение времени, за которое газовая температура изменяется от 300 до 385 К. Расчеты показали, что за время импульса разряда порядка ~5 мкс происходит нагрев воздуха на ~55 К, к этому времени молекулы O_3 , O и NO становятся основными малыми химически активными компонентами. При этом количество молекул озона O_3 растет со временем. Именно озон и производит стерилизирующий эффект, что позволяет объяснить эксперименты по воздействию плазмы на палочки Coli.

А.М. Давыдов с соавторами (ИОФ РАН) изучали возможность изменения вторичноэмиссионных свойств алюминиевой пластинки посредством создания на ее поверхности микро-рельефа. Модификация поверхности происходила при взаимодействии с ней плазмы импульсного микроволнового капиллярного разряда. Основным механизмом создания рельефа авторы считают микровзрывы на контактах металлической поверхности с плотной ($n_e \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и достаточно горячей ($T_e \sim 2\text{эВ}$) плазмой.

Небольшой цикл работ, проведенных в МГУ, посвящен исследованию ВЧ-разрядов.

В докладе большого коллектива авторов (Е.А. Кралькина и др.) «Механизмы управления рабочими характеристиками технологических ВЧ-источников плазмы путем изменения внешних параметров разряда» были проведены систематические исследования указанных характеристик плазмы при изменении внешних параметров разряда: давления рабочего газа, рабочей частоты и мощности ВЧ-генератора, величины и конфигурации магнитного поля, формы индуктора. На основании математического моделирования проанализирована роль емкостной составляющей разряда. В работе «Влияние емкостной ВЧ-составляющей на функцию распределения ионов

на выходе «геликонного» источника» **Е.А. Кралькина с соавторами** показали возможность создания эффективного прототипа ионного двигателя с гибкими возможностями независимого контроля параметров. Подобное устройство способно изменять энергию ионов пучка от 10 до 300 эВ и ионный ток от 0 до 250 мкА/см².

В работе **Двинина С.А.** «Структура электромагнитного поля и импеданс высокочастотного емкостного разряда с электродами большой площади» (МГУ) были рассчитаны импедансы разряда при возбуждении обеих поверхностных волн и предложена эквивалентная схема разряда, позволяющая найти амплитуды каждой из волн, а также ВЧ-токи на боковую стенку разрядной камеры. Полученные результаты позволяют определить условия оптимального возбуждения разряда для реализации однородного разряда с высокой плотностью электронов.

В работе большого коллектива авторов физического факультета МГУ (**И.В. Мурсенкова и др.**) «Динамика излучения импульсного объемного разряда в присутствии плоской ударной волны» были исследованы с высоким временным разрешением пространственно-временные характеристики импульсного объемного разряда с предыонизацией от плазменных «листов» (скользящих поверхностных разрядов) в присутствии ударной волны, движущейся вдоль разрядного промежутка. Использовались высокоскоростные камеры БИФО К008 и К011 в режиме развертки и 9-кадровом режиме регистрации, соответственно. Одновременно регистрировались осциллограммы тока разряда. Исследование пространственно-временной динамики разряда позволило получить оценку эффективности его воздействия на поток, а также исследовать особенность свечения в присутствии ударной волны.

Ряд работ посвящены прямым технологическим применениям плазмы, конструированию новых экспериментальных и технологических установок, модификации поверхности разрядом, плазменной сварке, распылению, воздействию плазмы на пылевую и мелкодисперсную компоненты рабочей смеси, исследованию коронного и искрового разрядов.

Работа секции в целом показала, что в области плазменных и пучковых технологий ведется активная исследовательская работа, причем число работ, которые можно характеризовать как НИ-ОКР, выросло, так же как выросло и общее число докладов. К сожалению, некоторое количество присланных на конференцию докладов не было доложено из-за отсутствия у авторов средств для посещения конференции.

**Сессия «Проект ИТЭР.
Шаг в энергетику будущего»**

На ставшую уже традиционной сессию «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего» в этом году было представлено 28 докладов, из них 8 были доложены на устном заседании, 20 — на стендовом.

Доклады устного заседания были посвящены системам ИТЭР. В докладе **В.П. Будаева** (НИЦ Курчатовский институт) «*Физические эксперименты в поддержку вольфрамового дивертора ИТЭР*» был представлен краткий обзор современного состояния проводимых испытаний вольфрама в интересах сооружения дивертора ИТЭР и подходы к планированию физических экспериментов, направленных на исследование стойкости вольфрама в термоядерных установках. Приведены результаты исследования вольфрама после испытаний в КСПУ-Т при плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР при срывах. Было показано, что для определенных сортов вольфрама при импульсных плазменных нагрузках образуются трещины параллельные поверхности. Такие трещины могут вызвать хрупкое разрушение, что следует учитывать при выборе режимов работы и эксплуатации вольфрамового дивертора ИТЭР. После серии импульсов обнаружено переправление и рекристаллизация вольфрама в слое на глубине до 50 мкм.

В докладе **Д.Б. Гина** «*Разработка гамма-спектрометрических систем ИТЭР*» (ФТИ РАН) были изложены результаты последних работ в этой области. Были выполнены предварительные расчёты уровней сигнала и фона, ведутся испытания прототипов узлов систем и подготовка конструкторской документации по проекту. Кроме того, были модифицированы алгоритмы цифровой обработки сигналов и показано, что соответствующие коды могут работать с загрузкой до 10^7 импульсов в секунду в режиме реального времени. Разработаны и продолжают совершенствоваться методы восстановления спектров убегающих электронов и быстрых ионов, ведется переработка кодов восстановления томографии.

В докладах **М.В. Иванцовского** (ИЯФ СО РАН) «*Предложение конструкции диагностических модулей и нейтронной защиты для вертикальной нейтронной камеры ИТЭР*» и «*Статус разработки порт-плаггов в ИЯФ СО РАН*» были рассмотрены конструкторские решения, которые предложил ИЯФ СО РАН для создания вышеперечисленных диагностических защитных модулей. Приводится обоснование целесообразности принятых конструкторских решений. Представлены первые термогидравлические и прочностные расчёты.

Представленные в докладе **А.Б. Кукушкина** (НИЦ Курчатовский Институт) «*Анализ рассеян-*

ного диверторного света в JET с ИТЭР-подобной стенкой и последствия для H-а диагностики в ИТЭР» показали, что РДС/СОЛЛ для D-а света варьируется в пределах от двойки до нескольких единиц в диверторных режимах с умеренной и высокой мощностью нагрева нейтральным пучком. Сформулированы последствия влияния РДС на спектроскопическую диагностику «H-а (и видимый свет)» в ИТЭР.

Г.С. Курскиев (ФТИ РАН) в докладе «*Статус диагностики томсоновского рассеяния плазмы в диверторе ИТЭР*» подчеркнул, что разработка диагностического комплекса для исследования режимов работы дивертора методом томсоновского рассеяния, а также макетирование основных подсистем диагностики имеет большое практическое значение как для развития данной диагностики, так и для проектирования диагностических комплексов современных токамаков и токамаков будущего. В частности, проблема запыления оптических компонент продуктами эрозии диверторных пластин, решаемая в рамках создания диагностики томсоновского рассеяния, также остро стоит и для других диагностик, имеющих оптические элементы внутри вакуумного объема.

В докладе **И.Б. Семенова** (Проектный центр ИТЭР) были приведены требования МО ИТЭР на радиационную стойкость электронных компонентов оборудования, приведены методики расчета потери надежности систем управления из-за накапливаемой дозы радиации или проявляющиеся из-за одиночных сильно ионизирующих воздействий (SSE – Single Effect Event). В случае потери надежности ниже проектной величины приведены рекомендации МО ИТЭР по устранению (уменьшению) радиационного воздействия. Начиная с 2014 года, Проектный Центр ИТЭР распространяет требования на радиационную стойкость электронных компонентов на оборудование, изготавливаемое по проекту ИТЭР в России.

Доклад **С.А. Кузьмина** (Проектный центр ИТЭР) был посвящен коллаборативной IT-платформе «Проектного центра ИТЭР». Ядро платформы составляет виртуальный кластер с использованием встроенных средств виртуализации Hyper-V. Основные IT-сервисы, предоставляемые пользователям — это широкополосный доступ в интернет, безопасность которого обеспечивает CISCO IronPort, почтовая служба на платформе Microsoft Exchange 2010, видеоконференционные залы, система коммуникаций на базе Microsoft Lync 2013, интегрированная с оборудованием видеоконференций на базе Polycom. Система документооборота, информационный ресурс на базе Microsoft SharePoint, бухгалтерская система, а также системы мониторинга, бэкапирования, антивирусной и антиспам защиты.

Для обеспечения работоспособности САД-офиса была спроектирована и внедрена абсолютно независимая от основной сети Центра инфраструктура. Был собран отказоустойчивый кластер на базе серверов IBM, к которому подключена реплика базы данных конструкторской документации ИТЭР. Репликация всех изменений раз в сутки приводится к общему знаменателю по всему миру. К этой части сети подключено большинство российских организаций, участвующих в проектировании различных узлов и агрегатов.

В докладе частично приводятся схема IT-инфраструктуры Проектного Центра ИТЭР, а также рассказывается об опыте создания и эксплуатации сложной отказоустойчивой компьютерной системы.

Работа сессии была успешной. Она показала существенный прогресс в научно-исследовательских и конструкторских работах в поддержку проекта ИТЭР в рамках ответственности по поставкам Российской Федерации.

Заключение

Подводя итоги, следует отметить, что XLI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу стала важным событием, оказавшим влияние на развитие научных исследований и их координацию в ведущих научных центрах России и за рубежом.

Таким образом, по результатам конференции можно сделать следующие выводы.

1. XLI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в России и СНГ. Она проходила уже в 41-й раз и собрала на свои заседания более 600 участников из научных центров России и других стран. Число российских (77) и иностранных организаций (27), представивших доклады на конференцию, стабильно остается на высоком уровне.

2. Конференция способствовала решению научных проблем по направлениям: магнитное удержание высокотемпературной плазмы, инерциальный термоядерный синтез, физические процессы в низкотемпературной плазме, физические основы плазменных и лучевых технологий и проблемы, связанные с реализацией международного проекта ИТЕР. Ежегодно происходящий обмен информацией и опытом между учеными России, стран дальнего и ближнего зарубежья способствует установлению научных контактов между научными центрами, занимающимися близкими

проблемами. Это подтверждается большим количеством работ, совместно выполненных сотрудниками различных научных центров.

3. Уровень экспериментальных работ, выполненных российскими учеными на крупных российских установках в области магнитного удержания горячей плазмы, пока еще достаточно высок, несмотря на физическое и моральное старение экспериментального и диагностического оборудования.

4. Растет число работ, посвященных прикладным исследованиям в области физики плазмы, увеличивается интерес к этим научным исследованиям среди молодежи, принявшей участие в работе конференции.

5. Остается заметным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными совместно с учеными ведущих научных центрах Европы, Японии и США. Это указывает на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых в области физики плазмы остаются высокими и востребованы мировым научным сообществом.

6. На конференции было представлено 85 докладов, результаты которых получены в рамках действующих проектов РФФИ, что составляет 27% от всех докладов, заслушанных на конференции. Проблематика этих проектов РФФИ соответствует перечню актуальных проблем, рассматривавшихся на конференции: магнитное удержание высокотемпературной плазмы — 16 докладов (28%), инерциальный термоядерный синтез — 23 доклада (51%), физические процессы в низкотемпературной плазме — 22 доклада (26%), физические основы плазменных и лучевых технологий — 23 доклада (29%), и проблемы, связанные с реализацией международного проекта ИТЕР — 1 доклад (4%).

7. Оргкомитетом конференции издана книга «Тезисы докладов XLI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. 368С. ISBN 978-5-990326446. Материалы конференции также размещены на сайте конференции http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLI/Zven_XLI.html.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ
(грант № 13-02-06204).*

Литература

1. Тезисы докладов «XLI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу». — М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. 2014.

2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLI/Zven_XLI.html.

Review of modern status of research on plasma physics and controlled fusion in Russia in 2013

I. A. Grishina, V. A. Ivanov, and L. M. Kovrizhnych

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Science
38 Vavilova str., Moscow, 199911, Russia

E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Received May 25, 2014

The article provides a review of the most interesting results presented at the annual XLI International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion held from 10 to 14 February 2014 in the town of Zvenigorod, Moscow region. The main development trends of studies on plasma physics in Russia are analyzed.

PACS: 52.55.— s, 52.25.— b

Keywords: plasma, conference, physics, thermonuclear fusion, reports

References

1. *Proceedings of the XLI International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion* (ZAO PLAZMAIOFAN, Moscow, 2014). ISBN 978–5–990326446.

2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLI/Zven_XLI.html.