

Физика плазмы и плазменные методы

УДК 533.9

Современное состояние исследований по физике плазмы и УТС в России в 2012 году

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

Обзор содержит наиболее интересные результаты докладов, представленных на ежегодной XL Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС), состоявшейся с 11 по 15 февраля 2013 года в городе Звенигород Московской области. Проведен анализ основных направлений исследований в области физики плазмы в России.

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

Ключевые слова: высокотемпературная плазма, низкотемпературная плазма, управляемый термоядерный синтез, магнитное удержание, инерциальный термоядерный синтез, плазменные и лучевые технологии, доклады, конференция.

Введение

XL Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде с 11 по 15 февраля 2013 года [1, 2].

Организаторами XL конференции были Научный совет РАН по проблеме «Физика плазмы», Научный совет РАН по комплексной проблеме «Физика низкотемпературной плазмы», Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Научно-технологический центр «ПЛАЗМАИО-ФАН», Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова.

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

На конференции было представлено 299 научных докладов из 77 российских и 20 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее

Гришина Ирина Антольевна, старший научный сотрудник

Иванов Вячеслав Алексеевич, заведующий отделом.

Коврижных Лев Михайлович, главный 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 2 августа 2013 г.

© Гришина И.А., Иванов В.А., Коврижных Л.М., 2013

количество участников конференции – более 500 человек.

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 — 35

3. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва — 34

4. Объединенный институт высоких температур РАН, Москва — 25

5. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск — 18

6. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Московская обл. — 16

7. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва — 15

8. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург — 14

9. Новосибирский государственный университет, Новосибирск — 12

10. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва — 12

11. Частное учреждение Госкорпорации РОСАТОМ «Проектный центр ИТЭР», Москва — 11

12. Российский университет дружбы народов, Москва — 9

13. Национальный исследовательский ядерный университет Московский инженерно-физический институт, Москва — 9

14. Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный, Московская обл. — 8
15. Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново — 8
16. ФГУП Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург — 7
17. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров — 6
18. Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань — 6
19. Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики, Москва — 6
20. ГОУ «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», Санкт-Петербург — 5
21. Дагестанский государственный университет, Махачкала — 5
22. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, МГУ, Москва — 5
23. Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново — 5
24. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск — 4
25. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва — 4
26. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород — 4
27. ФГУП «Центр Келдыша», Москва — 4
28. Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва — 3
29. Институт динамики геосфер РАН, Москва — 3
30. Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань — 3
31. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Московская обл. — 3
32. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск — 3
33. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург — 3
34. ФГУП Центральный научно-исследовательский институт машиностроения, Королев — 3
35. Институт термодинамики и кинетики химических процессов, Иваново — 3
36. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург — 3
37. ФГОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», Чебоксары — 2
38. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург — 2
39. ЗАО НПП ГИКОМ, Нижний Новгород — 2
40. Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск — 2
41. Научный центр волоконной оптики РАН, Москва — 2
42. Московский авиационный институт (государственный технический университет), Москва — 1
43. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Саранск — 1
44. Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва — 1
45. ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара», Москва — 1
46. Институт космических исследований РАН, Москва — 1
47. Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, Москва — 1
48. Всероссийский электротехнический институт им. В.И.Ленина, Москва — 1
49. Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН, Черноголовка — 1
50. Научно-исследовательский институт механики, МГУ, Москва — 1
51. Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск — 1
52. ФГУП «НИИ прикладной акустики», Дубна — 1
53. ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва — 1
54. ОАО «Криогенмаш», Московская обл., Балашиха — 1
55. Новосибирский филиал института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Новосибирск — 1
56. Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Иркутск — 1

57. Санкт-Петербургский институт машиностроения (ЛМЗ-ВТУЗ), Санкт-Петербург — 1
 58. Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород — 1
 59. ООО «Ивтехномаш», Иваново — 1
 60. Высоковольтный научно-исследовательский центр, Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина — 1
 61. Институт проблем информатики РАН, Москва — 1
 62. Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН — 1
 63. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск — 1
 64. ОАО Челябинский радиозавод «Полет», Челябинск — 1
 65. Южно-Уральский государственный университет, Челябинск — 1
 66. Московский энергетический институт (технический университет), Москва — 1
 67. Объединенный институт ядерных исследований, Дубна — 1
 68. Северный Арктический федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск — 1
 69. Всероссийский научно-исследовательский институт химической технологии, Москва — 1
 70. Группа компаний «ЛИТ», Москва — 1
 71. Таганрогский технологический институт, Южный федеральный университет, Таганрог — 1
 72. Нижегородская государственная медицинская академия, Нижний Новгород — 1
 73. Московский институт электроники и математики, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» — 1
 74. Научно-исследовательский институт энергетического машиностроения, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва — 1
 75. Мордовский государственный педагогический институт им. М.Е. Евсевьева, Саранск — 1
 76. Институт прикладной механики РАН, Москва — 1
 77. Научно-исследовательский и конструкторский институт электротехники им. Н.А. Доллежаля, Москва — 1.
2. Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь — 2
 3. Laboratoire G2Elab CNRS & Jozeph Fourier University, Grenoble, France — 1
 4. University of Leicester, Department of Physics and Astronomy, UK — 1
 5. University of California, Department of Chemistry, USA — 1
 6. Мечел Сервис Глобал, Гаага, Нидерланды — 1
 7. Институт тепло — и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь — 1
 8. Институт физики плазмы, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, Украина — 1
 9. Institut für Energie und Klimaforschung — Plasmaphysik, Forschungszentrum Jülich GmbH, EURATOM Assoziation, Trilateral Euregio Cluster, Jülich, Germany — 1
 10. Корнельский университет, Итака, США — 1
 11. Лаборатория физики плазмы, Королевская Военная Академия, Ассоциация ЕВРОАТОМ-Бельгия, Брюссель, Бельгия — 1
 12. CNIM Group, Z.I. de Bre 83507 La Seynesur-Mer, France — 1
 13. Culham Science Centre, EURATOM/CCFE Fusion Association, United Kingdom — 1
 14. Научно-исследовательский институт экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан — 1
 15. Karlsruhe Institute of Technology, Germany — 1
 16. Республиканский научно-практический центр гигиены, Минск, Беларусь — 1
 17. Aalto University, EURATOM-Tekes, Espoo, Finland — 1
 18. University of Helsinki, EURATOM-Tekes, Physics Department, Finland — 1
 19. University of California, San Diego, USA — 1
 20. Forshungszentrum Jülich, Germany — 1.
- На конференции были заслушаны доклады по пяти важнейшим направлениям физики плазмы:

Участниками конференции, представившими доклады из зарубежных стран, являются следующие научные организации.

1. ITER Organization, Cadarache, France — 4

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.

В ходе конференции состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 17 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 207 стендовых докладов.

Обзорные доклады, которые были представлены на пленарных заседаниях конференции, по существу подводили итоги работ, выполненных за последний 2012 год в области физики высокотемпературной плазмы, управляемого термоядерного синтеза, низкотемпературной плазмы, и прикладных работ по плазменным и лучевым технологиям. Были также представлены доклады по смежным с физикой плазмы проблемам.

Основная часть

Открыл конференцию мемориальный доклад «Памяти Э.П. Круглякова. Открытые ловушки: настоящее и будущее», посвященный научной и научно-организационной деятельности ушедшего из жизни в прошлом году академика Э.П. Круглякова. Доклад представил А.А. Иванов (ИЯФ СО РАН, Россия). Кратко остановившись на широко известной деятельности Э.П. Круглякова как популяризатора науки и борца с лженаукой, автор сделал акцент на исследованиях Э.П. Круглякова в области физики высокотемпературной плазмы и развитии методов ее диагностики. Экспериментальные работы Э.П. Круглякова по удержанию плазмы в многопробочной магнитной ловушке подтвердили принципы удержания плазмы в открытых системах и определили основные направления работы Института ядерной физики СО РАН в области удержания плазмы в открытых магнитных ловушках на многие годы. Был отмечен значительный вклад Э.П. Круглякова как в изучение коллективных явлений в плазме, в том числе сильной ленгмюровской турбулентности, так и методов удержания и нагрева плазмы при её взаимодействии с сильноточным релятивистским электронным пучком в открытых системах.

В докладе А.Д. Беклемишева «Физические основы проекта термоядерного реактора на основе открытой ловушки» (ИЯФ СО РАН, Россия) рас-

сматривались вопросы конкурентоспособности открытых ловушек в сравнении с токамаками при создании проекта термоядерного реактора. Был дан обзор физических и инженерных проблем, связанных с удержанием плазмы в ловушках разных типов, и подходы к решению этих проблем на основе газодинамической многопробочной ловушки (ГДМЛ). В предложенном проекте реактор на основе ГДМЛ состоит из двух систем — системы центральной активной зоны и системы подавления продольных потерь по краям. Центральная активная зона должна представлять собой длинный пробкотрон с квазиоднородным полем и небольшим пробочным отношением порядка 1.5. Активная зона может быть закрыта двумя видами системы подавления продольных потерь — амбиполярной и многопробочной ловушками, причём оба принципа могут быть совмещены в одном устройстве. При этом удержание горячей электронной компоненты осуществляется электростатическим потенциалом, а холодные электроны с торцевых пластин запираются в расширителях потенциалом Юшманова. Были рассмотрены условия зажигания и стационарного горения термоядерной плазмы с учётом изменения состава плазмы из-за накопления продуктов горения в реакторах на основе описанной схемы с топливными циклами D-T, D-D и D-He³. Получены оценки размеров и мощности реактора при существующих технических ограничениях и скейлингах. Было показано, что минимальная мощность D-T реактора на основе открытой ловушки и его стоимость могут быть на порядок ниже, чем для систем типа ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor — ITER).

Большой интерес участников конференции вызвал доклад Дж. Онгена «Прогресс в исследованиях термоядерного синтеза в Европе» (Laboratory for Plasma Physics, ERM/KMC, Belgium). В докладе обсуждались последние эксперименты на токамаке JET, проект WEST на токамаке Tore Supra во Франции и последние новости со стелларатора W7-X в Германии. На токамаке JET была создана металлическая первая стенка (в отличие от графитовой стенки, используемой в большинстве лабораторных установках типа токамак) частично из бериллия (Be) и частично из вольфрама (W), в общих чертах аналогичная по конструкции первой стенке строящегося международного экспериментального термоядерного реактора ITER. Было проведено тестирование этой металлической стенки в режимах, аналогичных основным

предполагаемым рабочим режимам ITER. Первые результаты продемонстрировали плюсы и минусы металлической стенки. Так количество водорода, абсорбированного металлической стенкой токамака JET, оказалось в 10 раз ниже по сравнению со стенкой из графита для всех сценариев удержания горячей плазмы. При работе с металлической первой стенкой установлено также низкое содержание ионов углерода в плазме, примерно, в 10 раз ниже в сравнении со стеной из графита, что существенно уменьшает радиационные потери, особенно на начальном этапе создания плазмы. Радиационные потери во время срыва удержания плазменного шнура тоже ниже, поэтому локальные потоки тепла из плазмы на первую стенку JET из бериллия допускаются более высокими, чем при работе с графитом. В режиме срыва удержания плазмы в JET проводилась усиленная инжекция в плазму газовой смеси дейтерия и аргона (D_2/Ar), при этом происходило увеличение мощности излучения плазмы и вывод параметров срыва на уровень, соответствующий режиму работы со стеной из графита. Переход из режима с низкой запасенной энергией в плазме (L – режим) в режим с высоким уровнем запасенной энергией (H – режим) происходил в JET при мощности нагрева на 30 % ниже, чем при работе со стенкой из графита. Предельная плотность вводимой в плазму мощности нагрева при L-режиме оказалась на 30 % выше, чем при работе со стенкой из графита, что позволяло дивертору (дивертор — специальное устройство в токамаке, служащее для приема потоков частиц и излучения с периферии плазменного шнура) стабильно работать при больших плотностях мощности. В то же время, стабильный H-режим, а также гибридные сценарии могли быть получены только с использованием интенсивного газового потока, что эквивалентно инжекции $\sim 10^{21}$ электронов / сек. В среднем удержание энергии в горячей плазме установки JET с металлической первой стенкой, несколько хуже, чем со стенкой из графита, но, тем не менее, эффективный средний заряд ионов плазмы в H-режиме составил величину около 1, а в гибридном L-H переходном режиме около 1,2. При этом экспериментально было установлено, что концентрация наиболее опасных (с точки зрения радиационных потерь плазмы) ионов вольфрама в плазме относительно концентрации ионов водорода значительно ниже максимально допустимого уровня — менее 0.001 %. Таким образом, эксперименты на европейском токамаке

JET, проведенные в режимах, близких к режимам работы международного термоядерного реактора ITER, показали перспективность использования металлической первой стеной из вольфрама и бериллия в наиболее напряженных режимах работы реактора, когда стенка из графита не может быть использована.

Достижения Российской Федерации как участника международного проекта по созданию первого экспериментального термоядерного реактора ИТЭР, а также изменения, произошедшие за последний 2012 год в управлении проектом, были доложены **А.В. Красильниковым** в докладе «ИТЭР. Вклад России», который был представлен организацией «Проектный центр ИТЭР» Госкорпорации РОСАТОМ. Проектный центр ИТЭР является главной организацией, представляющей Россию в международном проекте ITER и организующей поставки оборудования для этого проекта из России. В докладе директора Центра А.В. Красильникова отмечалось, что в рамках ответственности российской стороны в прошедшем 2012 году было подписано десятое Соглашение о поставках оборудования для нагрева плазмы и генерации тока в плазме установки ITER. Основные поставки — это изготовление уникальных генераторов СВЧ-излучения мм-диапазона длин волн — гиротронов, которые являются уникальной совместной разработкой организации ГИКОМ и Института прикладной физики Российской академии наук. Самые современные гиротроны, поставляемые российской стороной генерируют 2-мм СВЧ-излучение мощностью 1 МВт и длительностью непрерывной работы более 1000 секунд. Важным российским достижением в проекте ITER явилось изготовление и поставка сверхпроводящего кабеля для магнитной системы ITER. Для этого в России было создано новое высокотехнологическое производство сверхпроводящего проводника и оборудования для его упаковки в специальный защитный изолятор, которое помимо изготовления сверхпроводящего кабеля может выполнять и другие задачи электроэнергетики будущего. Обновленная технологическая база ряда передовых российских предприятий также является основой для создания первой стенки установки ITER из вольфрама и бериллия. В текущем году запущен испытательный стенд IDTF и начаты тепловые испытания японских диверторных пластин из вольфрама. Продолжается работа по созданию российской части диагности-

ческого комплекса ITER, включая изготовление испытательных стендов, работу по интеграции с диагностикой других участников проекта, создание системы сбора данных. В докладе также содержалась информация о достижениях по другим системам, поставляемым Россией для ITER.

В докладе **И.В. Мазуля** (НИИЭФА, Россия) «Проблемы создания дивертора и первой стенки реактора ИТЭР» анализировался окончательный вариант конструкции первой стенки реактора ITER. В докладе обсуждались критические проблемы, которые предстоит решить до подписания контракта на изготовление первой стенки. Среди этих проблем: разработка изоляционных покрытий для опор стенки, прохождение квалификационных испытаний прототипа первой стенки, разработка неразрушающих методов контроля конкретной конструкции. Первая стенка и дивертор ИТЭР представляют собой наиболее энергонагруженные внутрикамерные компоненты реактора, контактирующие с горячей плазмой. Российские обязательства перед ИТЭР заключаются в изготовлении и поставке 40 % панелей первой стенки и 100 % центральной сборки дивертора. Кроме того, тепловые приемные испытания всех компонентов дивертора (включая те из них, которые изготавливаются и другими участниками международного проекта) будут проводиться на российском электронно-лучевом стенде. Отмечалось, что конструкция центральной сборки дивертора уже определена, и контракт на ее поставку подписан. Первый этап контракта связан с изготовлением полномасштабного прототипа сборки, и аттестацией конкретного российского производителя НИИЭФА.

Инновационная концепция внеосевой генерации тока высокочастотными (ВЧ) волнами в больших токамаках типа экспериментального исследовательского ITER и демонстрационного DEMO (DEMO — это демонстрационный коммерчески перспективный термоядерный реактор полного масштаба) для стационарной работы с высокой эффективностью была предложена в докладе **В.Л. Вдовина** «Генерация тока геликонами и нижнегибридными (НГ) волнами в современных токамаках и реакторах ITER и DEMO. Сценарии, моделирование и антенны» (доклад представлен от НИЦ «Курчатовский Институт», Россия). Предложенная схема использует волны типа геликонов, — это быстрые магнитно звуковые волны в плазме на высоких (20–40) гармониках ионной циклотронной (ИЦ) частоты. Частота

геликонов лежит в диапазоне 500–700 МГц, распространяющихся во внешних областях плазмы с вращательным преобразованием. Ожидается, что ток, генерируемый геликонами, в сочетании с бутстрэп-током, обеспечит поддержание заданной величины полного тока в плазме при запасе устойчивости $q(0) \geq 2$ и $q(a) \geq 4$. Это будет способствовать получению режимов с отрицательным магнитным широм и внутренним транспортным барьером для обеспечения устойчивости при высоких значениях нормализованного давления плазмы $\beta_N > 3$, интересного для коммерческого реактора типа DEMO. Схема внеосевой генерации электрического тока в высокотемпературной плазме токамака-реактора может быть реализована на основе коммерчески доступных мощных клистронов. Преимуществами такой возможной схемы генерации тока в плазме, апробированной частично на меньших частотах в токамаках, являются значительное уменьшение роли параметрических неустойчивостей на периферии плазмы в сравнении с СВЧ-частотами, использование электрически прочных антенн резонаторно-волноводного типа, и существенно более сильная связь антенна–плазма.

От имени большого коллектива авторов из Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и Новосибирского государственного университета **П.А. Багрянский** представил доклад «Результаты экспериментов в поддержку проекта источника нейтронов на основе осесимметричной магнитной ловушки открытого типа». В докладе был представлен обзор работ, направленных на экспериментальное обоснование мощного генератора нейтронов на основе D-T реакции в газодинамической ловушке. Этот проект развивается в настоящее время в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН совместно с рядом отечественных и зарубежных организаций. Особое внимание в докладе было уделено вопросам продольного удержания частиц плазмы и способам подавления поперечных потерь энергии из удерживаемой плазмы при развитии МГД-неустойчивостей в системах с аксиально-симметричной конфигурацией магнитного поля. Созданные и экспериментально опробованные в настоящее время методы подавления поперечных потерь при развитии МГД-неустойчивостей позволили достичь режимов удержания с величиной относительного давления плазмы до $b = 0,6$. Были рассмотрены также способы улучшения продольного удержания плазмы, использование

которых ведет к увеличению эффективности проектируемого источника нейтронов. Обсуждались проблемы, связанные с равновесием ионно-горячей плазмы высокого давления и развитием микроустойчивостей, вызываемых анизотропным распределением в пространстве скоростей горячих ионов. Были представлены результаты первых экспериментов с дополнительным нагревом электронной компоненты плазмы при помощи созданной недавно системы электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева и продольной инжекции электронного пучка. Было показано, что полученные экспериментальные скейлинги позволяют прогнозировать коэффициент усиления мощности в оптимизированной версии источника нейтронов на основе ГДЛ на уровне значений параметра Q несколько более 0,1 (Q – отношение энергии в потоке термоядерных нейтронов, генерируемых в удерживаемой горячей плазме, к энергии, вложенной в плазму), а дополнительные меры по улучшению продольного удержания частиц плазмы способны привести к значительному увеличению Q . Это обстоятельство делает проект генератора нейтронов на основе ГДЛ вполне конкурентоспособным по сравнению с термоядерными системами на базе магнитных ловушек других типов, а также источниками нейтронов на основе ускорителей.

В докладе **С.В. Мирнова** «*Последние достижения литиевой программы России и зарубежья*» (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Россия) содержался обзор работ по применению лития в термоядерных установках. Эти работы были представлены в докладах на конференциях: 20th PSI, 27th SOFT, FEC2012, а также в виде ряда зарубежных публикаций 2012 года. Актуальность темы вызвана определенным кризисом, возникшим в процессе моделирования первой стенки реактора ITER на токамаке JET путем замены ее бериллий-графитового варианта на бериллий-вольфрамовый, предложенный ранее в качестве нового технического решения для первой стенки будущих токамаков-реакторов. Отмечалось, что проведенная замена удалась лишь частично, а именно, привела к некоторому снижению предельных плазменных параметров, предположительно, вследствие загрязнения плазмы вольфрамом. В качестве одного из потенциально перспективных путей улучшения ситуации рассматривалась возможность комбинированного использования вольфрама и лития, блокирующего процессы эрозии вольфрама в ходе плазменных неустойчивостей, развиваю-

щихся вблизи границы плазма-стенка. Докладчик обратил внимание участников конференции, что в настоящий момент около десяти экспериментальных установок УТС используют или предполагают использование лития в качестве защитных покрытий внутренних компонент разрядных камер, взаимодействующих с горячей плазмой. В течение 1994 – 98 гг., когда были проведены первые эксперименты на установках TFTR (США) и T-11M (Россия) использование лития в УТС исследованиях развивалось практически экспоненциально. По мнению С.В. Мирнова, применение лития и соответствующей технологии для защиты первой стенки строящейся установки ИТЭР будет способствовать существенному продвижению работ к достижению самоподдерживающейся термоядерной реакции в термоядерном реакторе.

Повышение интереса к стеллараторным исследованиям в мировом термоядерном сообществе констатировалось в докладе **С.Е. Гребенщикова** «*Стеллараторные исследования в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН*» (ИОФ РАН, Россия). Преимущества стеллараторов заключаются в возможности стационарной работы таких установок, в отсутствии существующих в токамаках неустойчивостей срыва и ограничений по плотности плазмы (предел Гринвальда в токамаках). В докладе отмечалось, что в России в настоящее время существует единственная действующая установка стеллараторного типа — это стелларатор Л-2М. Новый этап в исследованиях на данной установке связан с разработкой и созданием нового комплекса электронного циклотронного нагрева плазмы МИГ-3, позволяющего создавать и нагревать плазму при рекордно высоких удельных мощностях нагрева, вплоть до нескольких МВт/м³. Созданная на Л-2М диагностика обратного рассеяния излучения гиротрона позволила изучать спектры и уровень энергии коротковолновых флуктуаций плотности и их корреляцию с энергетическим временем жизни в зависимости от мощности ЭЦР-нагрева. В докладе также излагались результаты проведенных в течение 2010–2012 годов на Л-2М совместно с МИФИ экспериментов в поддержку программы ITER. Так, на стеллараторе Л-2М тестировались методы экспериментального обнаружения водяных течей с помощью спектральной регистрации линий гидроксидов (OH), либо линий ксенона (Xe) при его растворении в воде, циркулирующей в контуре охлаждения установки ITER. В результате проведенных экспериментов были установлены мини-

мальные регистрируемые величины потоков для обоих вариантов регистрации течи воды.

Обзор недавних аналитических и численных исследований влияния вращения плазмы на возбуждение низкочастотных мод колебаний плазмы (в первую очередь, – на геодезические акустические моды (ГАМ) и зональные течения) в осесимметричных токамаках был представлен в докладе **В.П. Лахина с соавторами** «Влияние вращения плазмы на низкочастотные моды в осесимметричных токамаках» (НИЦ Курчатовский институт). В случае чисто тороидального вращения плазмы равновесие является вырожденным, и зависимости давления и массовой плотности плазмы от полоидального угла не определяются МГД-уравнениями. Показано, что помимо обычной ГАМ, модифицированной вращением плазмы, существует другая, более низкочастотная мода, обусловленная вращением. Установлено, что эта мода связана со стратификацией плазмы на магнитных поверхностях в поле центробежных сил, и, в зависимости от типа равновесия, эта мода может быть как устойчивой (в случае равновесия с изотермическими магнитными поверхностями), так и аperiodически неустойчивой (в случае равновесия с изохорическими магнитными поверхностями). Развита теория была обобщена на случай произвольного вращения плазмы — суперпозиции тороидального и полоидального вращения. Рассмотрен случай конструкции токамаков с большим аспектным отношением. Проведен детальный анализ влияния полоидального вращения плазмы на непрерывные МГД-спектры электростатических мод с $(m, n) = 0$ (m и n – полоидальное и тороидальное числа). Показано существование наряду с обычной ГАМ более низкочастотной моды. В случае медленного полоидального вращения эта мода идентифицируется как обычная звуковая волна, которая быстро затухает в случае чисто тороидального вращения плазмы.

В обзорном докладе **М.Б. Аграната, С.И. Ашиткова, А.В. Овчинникова и В.Е. Фортова** «Фемтосекундный лазерный центр (ФЛЦ) ОИВТ РАН» авторы ознакомили участников конференции с современной лабораторией ОИВТ РАН, где проводятся работы с лазерным излучением тераваттного диапазона мощности. Отмечалось, что центр начал создаваться в 2002 году, когда была разработана и изготовлена первая отечественная фемтосекундная «хром — форстерит» лазерная система тераваттного уровня мощности, не имеющая на сегодняшний день аналогов в мире. Се-

годня в составе ФЛЦ имеется пять фемтосекундных лазерных систем видимого и инфракрасного диапазона спектра излучения с длительностями импульсов от 30 фс, частотой повторения до 10 кГц и выходной мощностью излучения до 10 ТВт, имеются различные диагностические комплексы с уникальными методиками измерений параметров, характеризующих взаимодействие излучения с веществом. На тераваттном лазерном комплексе проводятся фундаментальные физические исследования экстремальных состояний, образующихся в сильно нагретом и сжатом поверхностном слое вещества, проводятся экспериментальные исследования плазменных явлений, структурных и фазовых превращений, происходящих при взаимодействии мощных фемтосекундных лазерных импульсов с веществом. Отмечалось, что в ФЛЦ проведены исследования неидеальной плазмы в начальный период её образования, генерации быстрых электронов и характеристического рентгеновского излучения, генерации жесткого рентгеновского излучения при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью $10^{14} - 10^{18}$ Вт/см² на металлы. Впервые было обнаружено формирование периодической структуры и образование аморфного углерода при сверхбыстром плавлении микрокристаллического графита. Также проводятся работы по разработке бесконтактных технологий и оборудования для бурно развивающейся области – клеточной медицины. Эти пионерские исследования в области клеточной медицины в настоящее время являются уникальными и не имеют аналогов в мире.

Опике градиентных диэлектрических наноструктур был посвящен доклад **А. Б. Шварцбурга** «Туннелирование света в градиентных наноструктурах: парадоксы и перспективы», где были представлены физические основы и математический аппарат нового направления в электродинамике сплошных сред. Такие градиентные наноструктуры формируются из прозрачных диэлектрических нанопленок без свободных носителей с технологически контролируемым пространственным распределением показателя преломления n . Теоретические результаты, полученные из «базовых физических принципов», и первые эксперименты указывают пути построения субволновых градиентных оптических систем с необычными свойствами. В докладе обсуждались такие необычные физические явления, возникающие в таких искусственных средах: сильная дисперсия, как нормальная, так и ано-

мальная, формируемая в любом спектральном диапазоне геометрическими параметрами и формой пространственного распределения величины показателя преломления n , а также его градиентом и кривизной; новые точные аналитические решения уравнений Максвелла для пространственных распределений n , содержащие несколько свободных параметров; безотражательное прохождение света в такой искусственной среде, связанное с интерференцией прямых и обратных волн, туннелирующих через градиентные диэлектрические структуры; быстрое преобразование амплитудно-фазовой структуры волнового поля в градиентных наноплёнках, обусловленное особенностями преломления распространяющейся волны в каждой точке внутри такой плёнки. Обсуждались также первые эксперименты, проводимые в области градиентной оптики, и в радиофизике.

В пленарном докладе **С.А. Пикуза** (ФИАН) «*X-пинч: 30 лет исследований*» был дан обзор истории, современного состояния и перспектив работ в области исследования пинчевых электрических разрядов со специфической формой электродов в форме буквы X, названных так автором по праву первого исследователя. X-пинч, концепция которого была разработана в ФИАН в стремлении добиться получения высокотемпературной плазмы в заданном месте пространства, оказался настолько своеобразным объектом, что положил начало нескольким направлениям научных исследований, имеющим большое фундаментальное и прикладное значение. Полученные за эти годы научные результаты внесли весомый вклад в понимание ряда фундаментальных физических процессов, таких как: формирование перетяжек в Z-пинчах, образование горячих точек в плазме и радиационный коллапс, возбуждение рентгеновских спектров в сверхплотной плазме и ряд других явлений. Уникальные параметры X-пинчей как источников мягкого рентгеновского излучения сделали возможными разработку новых приборов с рекордными характеристиками. На основе принципа X-пинча были разработаны несколько новых диагностических методик, например, таких как проекционная рентгенография и абсорбционная спектроскопия различных быстротекущих процессов, включая процессы во взрывающихся металлических проволочках и в проволочных сборках-лайнерах в исследованиях по инерциальному УТС. Важные области применения открывает возможность применения рентгеновского излучения X-пинчей для неразру-

шающего исследования биологических объектов «in vivo». Не менее интересным представляется моделирование некоторых астрофизических процессов на примере взаимодействия мощных плазменных струй в последовательных X-пинчах.

Е.В. Грабовский (ТРИНИТИ) в пленарном докладе «*Мощные импульсные генераторы для инерционного синтеза в России*» представил обзор ведущихся в четырех научных центрах России исследований на сильноточных установках ИТС с током в нагрузке порядка нескольких мегампер. Основная цель исследований в этих центрах — получение необходимых данных для проектирования суперсильноточного с током до 100 МА и длительностью менее 100 нс драйвера для энергетического варианта реактора на принципе инерциального термоядерного синтеза (ИТС). Поэтому значительные усилия этих центров были сосредоточены на уточнении физики работы таких суперсильноточных генераторов и определении их оптимальных параметров. К настоящему времени реализован значительный прогресс в технике мощных импульсных генераторов тока. Взрывомагнитные (ВМГ) системы разрабатываются в РФЯЦ-ВНИИЭФ: комплекс ДВМГ-240 позволяет получать ток в лайнере на уровне 14 МА, при этом энергия в импульсе мягкого рентгеновского излучения (МРИ) составляет 0,8 МДж, что приближается уже к параметрам установки Saturn (Sandia National Laboratory, США) при длительности импульса в 53 нс. Разработан проект установки с током уровня 70 МА, при этом одной из существенных проблем является сокращение времени нарастания тока на ВМГ. Для решения этой проблемы предложены и тестируются различные конструкции взрывных размыкателей тока (ВРТ). На установке ГИТ-12 (4,7 МА) проводится изучение плазменных прерывателей тока (ППТ). Ячейка LTD (linear transformer driver), которая для данной установки разработана ИСЭ РАН, генерирует импульс с фронтом 100 нс и амплитудой тока 0.1 МА без формирующих линий, что позволяет создавать мощные Z-пинчи, обладающие высоким ресурсом и надежностью. На основе сложения мощности многих таких ячеек, работающих как в моноимпульсном, так и в частотном режиме, как показали совместные исследования в лаборатории Sandia, возможно построение суперсильноточных генераторов. LTD-ячейки являются основой проекта новой системы с уровнем электрических токов около 70 МА, представленной американской национальной ла-

бораторией Sandia. Исследования взрыва электродов при плотности тока, требуемой на установках для ИТС с Z пинчем, ведутся на установке С-300 (НИЦ «Курчатовский Институт»). Для выяснения возможности увеличения мощности мягкого рентгеновского излучения на мишени в ТРИНИТИ на установке АНГАРА-5-1 проводятся серии экспериментов с квазисферическими проволочными лайнерами (КПЛ). 2D и 3D коды, созданные в ИПМ РАН, РФЯЦ ВНИИЭФ, НИЦ КИ служат вычислительной поддержкой экспериментов по сжатию Z-пинчей. Разработанный в ИПМ РАН код MARPLE проверен на результатах экспериментов со сложной формой импульса рентгеновского излучения. Показано, что при использовании КПЛ из оптимально подобранных смесей веществ можно рассчитывать на зажигание термоядерной мишени при величине электрического тока 40–50 МА. Важным сообщением доклада Е.В. Грабовского стало известие о начале финансирования работ по созданию сильноточной установки «Байкал» с импульсным током 50 МА для проведения экспериментов по зажиганию термоядерной мишени (проектная стоимость работ порядка 4 млрд руб.). В разработке установки участвуют 7 организаций под руководством ГНЦ РФ ТРИНИТИ; а запуск этой установки намечен на 2019 г. Основные задачи установки «Байкал»: — уточнение физики сильноточных Z-пинчей, определение основных параметров генерируемого Z-пинчем рентгеновского излучения, тестирование работы хольраума (в англоязычной научной литературе hohlraum — это полость специальной формы, в которую вводится излучение через малое отверстие, при этом в такой полости полностью поглощается вводимое излучение, а форма полости подобрана таким образом, что вводимое рентгеновское или лазерное излучение фокусируется на термоядерной мишени, расположенной внутри полости), проверка концепции двойного лайнера (преобразования жесткого рентгеновского излучения в мягкое рентгеновское излучение при взаимодействии первого со стенками хольраума), отработка конструкции термоядерной мишени, тестирование компьютерных вычислительных кодов при токах на уровне 50 МА. Итогом этих исследований должно стать достижение зажигания термоядерной реакции на мишенях с использованием рентгеновского излучения, генерируемого сильноточным Z-пинчем.

В пленарном докладе «Установка УФЛ-2М, первые шаги по ее созданию», представленном

С.А. Бельковым (РФЯЦ-ВНИИЭФ), был дан обзор современного состояния работ по строительству российской мегаджоульной лазерной установки для исследований в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). В РФЯЦ-ВНИИЭФ в 2012 г. были созданы новые стенды испытаний высоковольтных накопителей, экспериментально отработан и испытан задающий лазер. В результате научно-технического анализа и расчетов обоснован выбор системы ввода лазерной энергии в камеру взаимодействия, при которой обеспечивается высокая степень симметрии облучения термоядерной мишени лазерным излучением. Система ввода лазерной энергии позволяет работать как с прямым облучением мишени, так и с непрямым облучением в сферическом или цилиндрическом боксах. Выбрана и обоснована схема базового канала установки, позволяющая реализовать основные параметры лазерного излучения как по энергии, так и по временной форме лазерного импульса. На основе базового канала был определен весь облик лазерной установки. Согласно представленному в докладе поэтапному графику строительства установки, создание и испытание первого лазерного модуля запланировано на 2014–2017 гг., при этом начало монтажа модуля состоится не позднее 2016 г. Применение нового состава активных лазерных стекол (технология отработана на Лыткаринском заводе оптического стекла), использование сферического бокс-конвертера лазерного излучения, применение динамических плазменных фазовых пластин, переход на вторую гармонику Nd-лазера и ряд других новаций позволит добиться рекордной энергии лазера 4,6 МДж на рабочей длине волны и 2,8 МДж на второй гармонике лазера, а также снизить затраты на создание всей установки. В комментариях к докладу было отмечено, что разработанные в России технологические решения открывают новые возможности для преодоления проблем, выявившихся в рамках действующей американской программы NIS, и, тем самым, достичь термоядерного зажигания мишеней на основе принципа лазерного термоядерного синтеза.

В докладе В.А. Титова с соавторами «Плазменное модифицирование полимерных материалов: от экспериментов к промышленной реализации» (ИГХТУ, Россия) рассматривались вопросы исследования и применения процессов модификации поверхности полимеров в неравновесной плазме. Изменяя состав и структуру тонкого поверхностного слоя материала, плазмохимическая

обработка позволяет регулировать смачиваемость и адгезионные характеристики поверхности, придавать биосовместимость и целый ряд других полезных потребительских свойств полимерных материалов. За последние годы значительно расширился круг объектов, подвергаемых модифицированию в плазме: от полимерных пленок, тканей, нитей, волокон, мембран до наноразмерных объектов — наполнителей композиционных материалов, а также биополимеров и живых объектов. Докладчиком было отмечено, что уже созданы технологии и промышленное оборудование, которые позволяют наносить тонкие слои металлов и их соединений методом магнетронного распыления на поверхность тканей и нетканых материалов, на поверхность полимерных пленок и искусственных кож, при ширине обрабатываемых полотен до 170 см. На действующей установке ММ-180, созданной совместно Ивановским государственным химико-технологическим университетом и ООО «Ивтехномаш», достигнута производительность 40000 м/месяц. Нанесение покрытий сочетается в едином цикле с предварительной плазмохимической активацией поверхности. С использованием этих технологий созданы новые материалы: ткани для одежды и декорирования интерьеров; материалы, защищающие персонал и оборудование от электромагнитных излучений; искробезопасные фильтры; медицинские салфетки с нанослоями серебра, которые обладают бактерицидными свойствами. Медицинские материалы прошли клинические испытания и разрешены к производству и применению на территории Российской Федерации.

Магнитное удержание высокотемпературной плазмы

На секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы» (председатель секции — А.И. Мещеряков) было представлено 17 докладов на устных и 43 доклада на стендовых заседаниях. Представленные в докладах результаты исследований были получены, в основном, сотрудниками российских научных центров, часть работ выполнялось совместно с сотрудниками научных центров Белоруссии и Украины.

Значительное количество работ, представленных как на устных (5 докладов), так и на стендовых заседаниях (4 доклада), было посвящено экспериментальным и теоретическим исследованиям, проведенным на стеллараторе Л-2М (ИОФ РАН). Это связано с тем, что в прошедшем году

на этой установке начались эксперименты с новым гиротронным комплексом, состоящим из двух гиротронов, суммарная номинальная мощность СВЧ-излучения которых составляет 1.5 МВт. В докладе **Н.К. Харчева** «Новый гиротронный комплекс МИГ-3 для создания и нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М, и результаты первых экспериментов» представлено подробное описание гиротронного комплекса и некоторые результаты по нагреву плазмы в стеллараторе Л-2М, в условиях, когда суммарная СВЧ мощность двух гиротронов достигала 800 кВт. В докладе показано, что если вводимая в плазму мощность СВЧ-излучения превышает 400 кВт, в стеллараторе наблюдаются переходы в режим улучшенного удержания энергии плазмы. Было также обнаружено, что в стеллараторе Л-2М в условиях высокой удельной мощности нагрева формируется профиль плотности с провалом в центральных областях плазменного шнура. В докладе **И.Ю. Вафина и А.И. Мещерякова** «Особенности измерения электронной температуры плазмы в тороидальных ловушках по рентгеновскому излучению» было проведено моделирование интенсивности потока мягкого рентгеновского излучения (МРИ) в условиях «провального» профиля плотности плазмы в стеллараторе Л-2М. Показано, что в таких условиях возможно занижение центральной электронной температуры плазмы на 15–20 % как при измерении температуры по «наклону» графика зависимости интенсивности МРИ от энергии рентгеновских квантов, так и при измерениях температуры электронов с помощью метода рентгеновских фильтров. В докладе **А.С. Сахарова** «Обратное рассеяние необыкновенной волны при ЭЦР-нагреве плазмы на стеллараторе Л-2М» (ИОФ РАН) показано, что в экспериментах по электронному циклотронному резонансному (ЭЦР) нагреву плазмы на стеллараторе Л-2М было впервые обнаружено обратное рассеяние необыкновенной волны при отражении излучения мощного гиротрона от локальной области ЭЦР-нагрева плазмы в центре шнура. Коэффициент отражения составляет величину порядка 10^{-3} . В этой же работе в волновом одномерном приближении рассчитана величина коэффициента отражения необыкновенной волны от области электронно-циклотронного резонанса на второй гармонике гирочастоты электронов. Рассчитанное значение коэффициента отражения совпадает по порядку величины с измеренным в эксперименте отражением.

Интерес участников конференции вызвали проводимые в НИЦ «Курчатовский институт» работы, посвященные самоорганизации плазмы в тороидальных ловушках. В докладе **К.А. Разумовой** «Основные характеристики турбулентности, ответственности за самоорганизацию и удержание плазмы токамака» представлена модель, описывающая образование внутренних транспортных барьеров (ITB) в токамаках. В этой модели аномальный транспорт тепла определяется наличием в плазме токамака турбулентных ячеек (под турбулентностью здесь подразумевается отсутствие регулярных движений заряженных частиц внутри ячеек — магнитных островов), возникающих на магнитных поверхностях, имеющих рациональные значения запаса устойчивости q . ITB формируется в зоне вблизи рациональной поверхности с низким значением $q = m/n$ (например, $q = m/n = 1/2, 3/2, \dots$, где m — полоидальное число — число полных оборотов силовой линии магнитного поля вокруг плазменного шнура в токамаке до самозамыкания силовой линии на себя, n — тороидальное число — число полных оборотов силовой линии вокруг плазменного тороида до самозамыкания силовой линии на себя) в зоне без рациональных поверхностей (зона GAR). Поскольку турбулентный поток чувствителен к расстоянию между рациональными поверхностями, то, как полагают авторы доклада, турбулентные ячейки локализованы на этих поверхностях. Перекрываясь, эти контактирующие ячейки могут давать аномальный тепловой поток, т.к. заряженные частицы беспрепятственно перемещаются из одной ячейки в другую, реализуя аномально сильный теплоперенос. Там, где турбулентные ячейки не соприкасаются, этот мощный механизм перестает работать, а непрерывность теплового потока обеспечивается другими менее сильными механизмами, которые уже требуют больших градиентов плазменного давления \tilde{N}_p . Данная модель была применена авторами для объяснения формирования внутренних транспортных барьеров на токамаках MAST и RTP. Приведенные в докладе качественные оценки говорят о быстром росте потока тепла, переносимого за счет турбулентных ячеек при снижении параметра m . На основании экспериментальных данных, полученных на токамаке DIII, было также продемонстрировано, что данная модель может быть применена и для объяснения механизма образования краевого транспортного барьера. Была выдвинута гипотеза, что H-мода — это результат образования зоны GAR

на краю плазмы, возникающей из-за больших потоков тепла, которые способны переносить турбулентные ячейки с низкими значениями параметра m , и которые дают большую ширину GAR и транспортный барьер.

На предыдущей XXXIX конференции, проходившей в феврале 2012 года, в ряде докладов была изложена концепция развития термоядерных источников нейтронов на основе открытых ловушек. В этом году было предложено другое прикладное применение открытых ловушек — использование их в качестве стенда для исследования взаимодействия материалов диверторных пластин с плазмой. В работе **Е.И. Солдаткиной** «Газодинамическая ловушка как стенд для изучения взаимодействия плазмы с поверхностью» (ИЯФ СО РАН) была показана возможность использования открытых ловушек, таких как газодинамическая ловушка (ГДЛ), для изучения взаимодействия плазмы с первой стенкой термоядерного реактора. При этом рассмотрена возможность проведения на установке ГДЛ полномасштабного экспериментального моделирования работы диверторных пластин, которые будут установлены в международном токамаке ITER. Эти диверторные пластины в ITER будут подвергаться воздействию потока плазмы с электронной температурой $T_e = 30\text{--}100$ эВ с плотностью мощности до $P = 0.5$ ГВт/м² в течении времени $t = 300\text{--}500$ с. В эксперименте, проведенном на установке ГДЛ, образец был помещен в область магнитной пробки открытой ловушки, при этом там был зарегистрирован поток с плотностью мощности на образец $P = 0.2$ ГВт/м², что всего в 2,5 раза меньше ожидаемого теплового потока на пластины дивертора в токамаке ITER. Температура электронов и плотность плазмы в области расположения образца соответственно составляли $T_e = 140$ эВ и $n_e = 2 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Основываясь на анализе экспериментальных данных, авторы считают, что на основе ГДЛ при увеличении плотности плазмы и длительности дополнительного нагрева плазмы (например, такими методами, как нейтральная инжекция и СВЧ-нагрев) может быть создан экспериментальный стенд для изучения взаимодействия плазмы с материалами дивертора и первой стенки термоядерного реактора.

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. Возросло по сравнению с прошлым го-

дом число молодых ученых, принимавших участие в работе секции.

Инерциальный термоядерный синтез

На секции «Инерциальный термоядерный синтез» (председатель секции — Р.В. Степанов) было представлено 12 устных и 25 стендовых докладов. Представленные доклады охватывали широкий спектр исследований в области ИТС.

На секции обсуждались важные аспекты масштабной программы по созданию сильноточной установки «Байкал», включая всестороннее экспериментальное, расчетное и теоретическое обеспечение различных ее этапов. Интерес вызвали доклады, представленные группами ГНЦ ТРИНИТИ, РНЦ КИ и ИПМ РАН. Известно, что для выхода плазменного прерывателя тока (ППТ) на оптимальный режим необходимо несколько дорогостоящих наладочных пусков — возникает проблема «первого выстрела»: требуется выйти на рабочий режим без предварительной «тренировки» плазменного инжектора (ПИ). Для ее решения на прошлогодней конференции была предложена идея заменить ПИ в ППТ на тонкую проволочку, и осуществлять ее электрический взрыв током ППТ. В докладе **А.А. Шведова** (РНЦ КИ) была рассмотрена динамика плазмы в таком ППТ. В этом докладе было показано, что предложенная конструкция способна решить и проблему предимпульса. Впервые выполнено экспериментальное исследование динамики сопротивления проволочки во внешнем магнитном поле; результаты проведенного 3D-МГД-моделирования по коду MARPLE хорошо согласуются с теоретическими оценками и полученными экспериментальными данными. В сообщении **О.Г. Ольховской** (ИПМ РАН) были представлены результаты расчета сжатия Z-пинча с помощью квазисферических проволочных лайнеров (КПЛ) в модели затянутого плазмообразования в условиях установки АНГАРА-5-1 (код MARPLE). Доклад **Е.Д. Казакова** (РНЦ КИ) содержал результаты применения методики количественной спектроскопии в области вакуумного ультрафиолета — ВУФ-спектроскопии (ТРИНИТИ) для измерения электронной температуры плазмы в окрестности горячих точек Z-пинча на основе токовой импlosionи нагрузки из дейтерированного полиэтилена малой плотности. Проведенные ранее измерения анизотропии и спектров нейтронного излучения показали, что нейтроны, в основном, порождаются дейтронами, находящимися в немаксвеллов-

ском «хвосте» функции распределения по энергиям. Видимо, ту же природу имеют и нейтроны ($N \sim 3 \cdot 10^{10}$), наблюдавшиеся на установке АНГАРА-5-1. Температура, измеренная в окрестности горячих точек, составила величину $T_e \approx 300$ эВ, при этом ярко светящиеся области на оси нагрузки коррелируют во времени с возникновением импульса мягкого рентгеновского излучения (МРИ). Методика измерения анизотропии энергетических потерь цилиндрического проволочного лайнера (ЦПЛ) и результаты ее применения на установке АНГАРА-5-1 были представлены **Е.В. Светловым** и **А.Н. Грицуком** (ТРИНИТИ). Было обнаружено, что для вольфрамового ЦПЛ в момент максимума мощности МРИ размер излучающей области составляет 4–5 мм, что соответствует (2–3)-кратному сжатию плазмы по радиусу. В сообщении **А.О. Шишлова** (ТРИНИТИ) были рассмотрены причины возникновения тока утечки в вакуумной транспортирующей линии, ограничивающие передачу энергии электромагнитного импульса в нагрузку. Еще один доклад **Е.Д. Казакова** содержал описание шестикадровой системы лазерного теневого фотографирования, разработанной для исследования импульсных процессов микросекундной длительности. Расчетное обеспечение исследований, проводимых РФЯЦ-ВНИИЭФ, было представлено в докладах **В.Н. Барабанова** и **Б.Г. Репина**.

Отдельные вопросы, затронутые в обзоре **С.А. Пикуза** и касающиеся, в основном, гибридных X-пинчей (ГХП) и их применения, были детально рассмотрены в цикле работ, представленном сотрудниками Лаборатории проблем новых ускорителей ФИАН (докладчики **И.Н. Тиликин**, **Т.А. Шелковенко**, **С.А. Пикуз**, **Г.В. Иваненков**). Эксперименты по изучению начальной стадии плазмообразования и процессов, происходящих на ранних стадиях образования горячих точек в ГХП, проводились на генераторе БИН. Показано, что начальная стадия взрыва представляет собой разлет единичной проволочки в расширяющихся плазменных электродах, образованных приэлектродной плазмой. Конечные стадии стандартного X-пинча (СХП) и гибридного X-пинча (ГХП) очень похожи, при этом, в отличие от СХП, ГХП генерирует значительно меньше жесткого рентгеновского излучения. Возможность использования практически любого вещества в качестве материала нагрузки значительно расширяет область исследований и применений ГХП. За три года исследований ГХП на генераторах БИН

и МИНИ (ФИ РАН), XP и COBRA (Корнельский университет, США) были найдены условия образования единичного точечного источника мягкого рентгеновского излучения. Важно, что оптимизация параметров нагрузки ГХП для разных генераторов позволяет стабильно получать практически точечный (характерный диаметр рентгеновского источника около 1 мкм) источник МРИ с малой (менее 1 нс) длительностью и гладким сплошным спектром. «Точечность» источника рентгеновского излучения успешно используется для создания систем проекционной рентгенографии с возможностью дистанционного зондирования объектов. Такие системы, не требующие от приемника экстремального пространственного разрешения, легко комбинируются с разработанной методикой абсорбционной рентгеновской спектроскопии, ключевым элементом которой служит тот же самый ГХП; при этом используются спектральные характеристики мягкого рентгеновского излучения горячих точек. Эта методика обладает рядом значительных преимуществ по сравнению с оптической и УФ-спектроскопией, и является эффективным диагностическим инструментом для определения 2D-распределений зарядового состояния, температуры и плотности плазмы в широком диапазоне параметров. Предельное пространственное разрешение ограничивается размером источника МРИ. В экспериментах на установках XP и COBRA использовались молибденовые ГХП, объектом служили взрывающиеся одиночные алюминиевые проволочки и их сборки, состоящие из нескольких (2–4) проволочек. Были получены рекордные значения спектрального разрешения $\lambda/\Delta\lambda \sim 5000$, что позволило зарегистрировать не наблюдавшиеся ранее спектральные линии поглощения ионов и использовать методику определения плотности плазмы вблизи керна взорванной проволочки по штарковскому уширению. На основе ГХП разрабатывается новая диагностика, основанная на томсоновском рассеянии линейчатого излучения источника на исследуемом объекте.

Среди докладов по электроразрядной тематике можно отметить еще несколько работ. В докладе **А.А. Шведова** (НИЦ «Курчатовский Институт») была предложена схема модульного генератора импульсов тока мегамперного диапазона на основе плазменного прерывателя тока, позволяющая создавать достаточно простые и дешевые установки для изучения динамики сжатия лайнеров. По расчетам, в лайнерной нагрузке может быть

получен импульс тока около 2,6 МА, что практически равно току установки С-300, по стоимости и габаритам многократно превышающей предлагаемый генератор. В докладе **С.Н. Полухина** (ФИАН) обсуждался альтернативный подход к повышению тока в системах типа «плазменный фокус» (ПФ), основанный на использовании низкоиндуктивной плоской (филипповской) геометрии разрядной камеры. Проведенные за последний год эксперименты показали, что использование новых материалов изолятора позволяет получить нейтронный выход, сопоставимый с традиционными ПФ-системами: среднее число нейтронов в одном импульсе $N \sim (1-2) \cdot 10^{10}$, максимальное значение нейтронов – $5 \cdot 10^{10}$ при амплитуде тока разряда 0,9 МА в импульсе с энергией 70 кДж. Помимо увеличения тока, снижение индуктивности ведет к сокращению фронта нарастания и, соответственно, к уменьшению размеров электродов и всей разрядной камеры в целом. Это позволило создать компактную и простую лабораторную установку с энергетикой в 30 кДж и током разряда 1,3 МА. Анализу возможности повышения выхода жесткого рентгеновского излучения в ПФ-установках было посвящено сообщение **В.В. Вихрева** (НИЦ «Курчатовский Институт»): развитая модель показывает, что условия эффективной генерации электронного пучка в ПФ-системе прямо противоположны условиям, необходимым для увеличения нейтронного выхода. Доклад **Ю.К. Куриленкова** (ОИВТ РАН) был посвящен схемам с импульсным электростатическим удержанием плазмы (ИЭУ). Код KARAT был использован для PIC-моделирования динамики частиц и пульсирующего выхода нейтронов в наносекундном вакуумном разряде с дейтерированным анодом (эксперименты были выполнены в Институте Марии Кюри, Франция, в 2006 г.). Показано, что в этой схеме реализуется «столкновительный» DD-синтез.

В последнее время возрос интерес к использованию мощных установок ИТС для исследований в области «лабораторной астрофизики». В докладе **Р.А. Яхина** (ФГУП ЦНИИмаш) на основании соотношений гидродинамического подобия было отмечено, что современные мощные лазерные установки позволяют моделировать отдельные стадии разлета остатков сверхновых звезд. Были рассмотрены возможные лазерные мишени-имитаторы сверхновых и приведены результаты модельного расчета. Р.А. Яхин представил также краткое содержание не состоявшегося по ряду об-

стоятельств доклада **В.С. Беляева** (ФГУП ЦНИИ-Имаш), посвященного отечественной программе «Лабораторная астрофизика», разработанной во ФГУП ЦНИИИмаш и открытой для участия российских исследовательских коллективов.

Привлекли внимание два доклада, представленные коллективом авторов РФЯЦ-ВНИИТФ и посвященные результатам экспериментов на лазерной установке СОКОЛ-П с мощностью в импульсе до 30 ТВт (докладчики **П.А. Толстоухов** и **Д.А. Вихляев**). В экспериментах по генерации нейтронов в (p, n) -реакциях под действием быстрых протонов, ускоряемых пикосекундным лазерным импульсом из тонких алюминиевых фольг при интенсивности лазерного излучения на мишени $10^{18} \div 10^{19}$ Вт/см². В этих экспериментах для генерации нейтронов на пути протонного пучка устанавливалась пластина из фторида лития (LiF). Максимальный зарегистрированный выход нейтронов в этих экспериментах превысил 10^8 за импульс. Полученные результаты позволили установить, что эффективность конверсии лазерного излучения в быстрые протоны находится в интервале значений 5–10 %. Были также представлены результаты экспериментов по облучению интенсивным лазерным излучением многослойных мишеней со сложной атомной структурой NaCl-В и NaCl-(CH₂)_n. В этих экспериментах измеренная эффективная температура горячей компоненты электронов составила 40 кэВ.

Значительное количество расчетно-теоретических докладов было посвящено процессам, протекающим при взаимодействии мощного ультракороткого лазерного импульса (УКИ) с веществом. Три работы были представлены Лабораторией диагностики плазмы ФИАН (докладчики **Е.А. Говрас**, **А.В. Брантов** и **С.Г. Бочкарев**). В первой из них изучался процесс лазерного ускорения ионов из ультратонких фольг однокомпонентного ионного состава. Для одномерного (1D) компьютерного моделирования разлета плазмы твердотельной плотности использовалась модель Больцмана-Власова-Пуассона (БВП). Аналитически получены решения, описывающее растекание плазмы в изотермическом режиме, и рассчитан скейлинг зависимости максимальной энергии ионов от электронной температуры. Найденное распределение электрического поля использовалось для решения задачи об ускорении легких примесных ионов мишени. Во второй работе были представлены расчеты по трехмерному компьютерному коду (3D-коду МАНДОР), которые показали,

что использование трехмерных микроструктур на передней поверхности мишени (например, тонкой фольги) приводит к увеличению числа и энергии генерируемых быстрых электронов по сравнению со случаем тонкой мишени с плоской гладкой поверхностью. В результате 3D моделирования взаимодействия лазерного излучения с тонкой фольгой показано, что в результате такого взаимодействия увеличивается энергия протонов, ускоренных из приповерхностного слоя на тыльной стороне мишени. Дальнейшему исследованию динамики электронов плазмы в суперпозиции электромагнитного поля, поля УКИ лазера и плазменного электрического поля была посвящена третья работа. Применение методов пробных частиц и приближенного уравнения диффузии в пространстве импульсов (p -пространстве) показало, что механизм ускорения электронов стохастическими плазменными полями в течение времени ускорения менее 1 пс приводит к лучшему согласию с результатами PIC-моделирования, чем механизм стохастического ускорения регулярными волнами. Эти расчеты были выполнены для параметров лазерного излучения, типичных для упомянутых выше экспериментов на установке СОКОЛ-П (РФЯЦ-ВНИИТФ).

В поддержку организуемому в ИЛФ СО РАН эксперименту по изучению взаимодействия лазерного импульса с узким плазменным капилляром было проведено моделирование с помощью кодов MULTI и MULTI-fs (докладчик **И.Е. Карпов**, ИЯФ СО РАН). В результате компьютерного моделирования найдены оптимальные параметры эксперимента, предотвращающие отражение основного лазерного импульса (ЛИ) от плотной плазмы, образованной на торце капилляра пьедесталом, предшествующем основному лазерному импульсу. Генерация плотного пучка быстрых (скорость порядка 0,1 скорости света) электронов при взаимодействии ультраинтенсивного фемтосекундного лазерного импульса с тонкой пленкой была рассмотрена в докладе **И.Н. Косарева** (ИПЛИТ РАН) с позиций оригинального кинетического метода, основанного на построении пропагатора для функции распределения частиц. Этот метод дает результаты, хорошо согласующиеся с традиционным PIC-моделированием. В сообщении **С.В. Кузнецова** (ОИВТ РАН) проведено вычислительное и аналитическое исследование процесса захвата немонотонных энергетических электронных сгустков в кильватерной волне и их ускорения. Установлены режимы инъекции элект-

тронов в кильватерное поле, при которых энергетический разброс электронов в ускоряемом сгустке минимизируется. В результате аналитических исследований и компьютерных расчетов показано, что в кильватерной волне можно получать сгустки ускоренных электронов со средней энергией в несколько ГэВ и с малым относительным разбросом по энергии около 0,1 %.

Возникновение мелкомасштабных нитевидных структур в плотности токов и частиц, обусловленное развитием вейбелевской неустойчивости при взаимодействии мощного лазерного излучения со сверхкритической плазмой, было проанализировано в докладе **А.Ю. Перепелкиной** (ИПМ РАН). Анализ проводился путем численного решения уравнений Максвелла и Власова по 3D3V PIC-коду CFhall. Отмечено, что эволюция вейбелевской неустойчивости приводит к укрупнению характерного пространственного масштаба магнитного поля. В связи с последним замечанием следует упомянуть доклад **П.В. Конаша** (МИРЭА), содержащий результаты моделирования термоядерных микровзрывов и генерации спонтанных магнитных полей (СМП) в лазерных мишенях, проведенного по лагранжеву 2D-коду АТ-ЛАНТ. Было, в частности, показано, что по мере нарастания СМП в плазме термоядерной мишени траектории пробных α -частиц концентрируются в окрестности максимумов магнитного поля, т.е. в этих областях термоядерное горение может быть более интенсивным, чем в окружающем топливе.

На заседаниях секции ИТС были представлены еще несколько докладов, посвященных отдельным вопросам физики и технологии мишеней ЛТС. Доклад **В.Е. Шермана** (ЛМЗ-ВТУЗ) стал продолжением расчетно-теоретических работ, направленных на выяснение условий формирования игнитора (области начала термоядерного горения мишени) при зажигании мишени ЛТС пучком высокоэнергетических ионов. Показано, что варьированием начальной энергии и заряда ионов можно обеспечить формирование игнитора в любом месте мишени. Продемонстрирована возможность создания центрального игнитора пучками ионов с энергией $E = 100 \div 300$ МэВ/а.е.м. и удельной энергией пучка $Q = 5 \div 20$ ГДж/см².

В докладе **А.С. Орехова** (ФИАН) был представлен анализ свойств и характеристик мишеней, содержащих малоплотные материалы. Был представлен также краткий обзор экспериментов с такого рода мишенями, выполненных в различных лабораториях. Эксперименты по про-

хождению ЛИ через малоплотные среды, переноса поглощенной энергии, умножению давления ударной волны и исследованию других вопросов проводились на установках «Искра-5», ЛУЧ (ВНИИЭФ), Мишень (ТРИНИТИ), PALS (Чехия), LL (Франция) и ГЕККО (Япония). В настоящее время ведется разработка мишеней с градиентом плотности, и исследуется эффективность преобразования лазерного излучения в рентгеновское излучение в плазме, формирующейся в малоплотных мишенях (в том числе — с наночастицами металлов). В сообщении **А.И. Громова** (ФИАН) был представлен новый метод изготовления малоплотных металлических сред, которые могут быть применены для повышения эффективности преобразования лазерного излучения в рентгеновское излучение. Важной составляющей технологии является оригинальный метод измерения плотности слоев наночастиц тяжелых элементов с использованием компьютерного рентгеновского микротомографа. Доклад, представленный **Е.Р. Корешевой** (ФИАН) был посвящен очередному этапу развития технологии изготовления и доставки криогенных мишеней ЛТС в реакторную камеру, разработанной в лаборатории «Термоядерные мишени» ФИАН. Изготовлены и испытаны несколько устройств инъекции, транспортировки и позиционирования мишеней. Разработано оригинальное позиционирующее устройство, использующее вращающийся диск с кольцевым манипулятором. Впервые предложен метод позиционирования, основанный на эффекте Мейснера.

На секции было представлено три общетеоретических доклада. Необходимость определения параметров источника сильной турбулентности в экспериментах по турбулентному нагреву плазмы в открытой ловушке ГОЛ-3 привела к исследованию особенностей развития модуляционной неустойчивости в существенно немаксвелловской плазме, результаты которого были приведены в докладе **И.В. Тимофеева** (ИЯФ СО РАН). В сообщении **Р.А.Х. Кастильо** (РУДН) был представлен последовательный вывод по методу Боголюбова усредненных уравнений движения релятивистской заряженной частицы, находящейся в поле мощного электромагнитного излучения линейной или круговой поляризации. Показано, что, по сравнению с известными результатами, полученные уравнения содержат дополнительные малые члены, различающиеся для разных поляризаций волн.

Сравнительный анализ трех упрощенных моделей теплопереноса (диффузионной, потоково-ограниченной и нелокальной,) был представлен в докладе **Г.В. Долголевой** (ИПМ РАН), один из выводов которого состоял в предпочтительности (с точки зрения вычислительной нагрузки) диффузионной модели при условии, что диффузионный поток не превышает максимально возможного потока вещества.

Резюмируя, следует отметить поступательное развитие национальных программ создания крупнейших установок, направленных на достижение зажигания – лазерной установки УФЛ-2М и сильноточной установки «Байкал». Важной предпосылкой успешного развития этих проектов является существующая в стране основа «технологической» кооперации в создании функциональных узлов установок обоих типов, которая в результате своевременного решения директивных органов о финансировании проектов приобретает дополнительный импульс развития. Кроме того, в области физики сильноточных Z-пинчей имеется «физическая» кооперация (ее основу составляют установки АНГАРА-5-1 и С-300), которая способна обеспечить проведение актуальных физических исследований в период строительства установки «Байкал». К сожалению, такой «физической» кооперации практически нет в области лазерного термоядерного синтеза. В настоящее время в стране существует единственная установка «Луч» (ВНИИЭФ), на которой проводятся эксперименты на уровне нескольких сотен джоулей (установка «Искра-5» того же института ВНИИЭФ будет демонтирована). Создание лазерных установок с энергией хотя бы в несколько сотен джоулей и проведение на них экспериментов, в том числе, по сферическому облучению мишеней, является актуальной задачей развития национальной программы работ в области ЛТС.

Физические процессы в низкотемпературной плазме

На XL 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 66 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) комплексная плазма, различные применения низкотемпературной плазмы.

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 **Боброва А. А. и др.** «Влияние неидеальности на скорость столкновительной рекомбинации в неидеальной плазме» (ОИВТ РАН). Обсуждались результаты исследования скорости столкновительной электрон-ионной рекомбинации в ультрахолодной неидеальной плазме методом молекулярной динамики. Ультрахолодная плазма, как правило, это плазма с однозарядными ионами — однозарядная плазма, полученная с помощью ионизации лазером атомов, охлажденных до ультранизких температур. Типичные параметры такой плазмы: плотность электронов $n_e \sim 10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$, температура электронов $T_e \sim 1 - 50 \text{ К}$. Единственным процессом, приводящим к образованию связанных состояний в ультрахолодной плазме является столкновительная рекомбинация. Была предложена формула для оценки скорости рекомбинации в ультрахолодной плазме, хорошо описывающая результаты расчетов. Формула получается при подстановке в формулу Томсона вместо температуры электронов средней кинетической энергии электрона в поле иона на среднем межчастичном расстоянии $T_e + e^2 n_e^{1/3}$.

Ряд докладов был посвящен исследованиям плотной неидеальной плазмы, которая в англоязычной литературе называется «warm dense matter». Так, в докладе **Воробьева В.С., Навикова В.Г. и Грушина А.С.** «Развитие ячеечных моделей для описания состояния веществ при мегабарных давлениях» (ОИВТ РАН) была рассчитана ударная адиабата азота при плотностях сжатого

вещества 3,2–3,7 г/см³. На начальных участках адиабаты при низких температурах азот представляет собой систему, подобную слабоионизованной жидкости. С ростом температуры вдоль адиабаты происходит ионизация валентных электронов и электронов из внутренних оболочек атома. Эти расчеты подтверждаются экспериментальными данными. В докладе **Шумихина А.С. и Хомкина А.Л.** «Эффекты металлизации при сжатии жидкого водорода и дейтерия» (ОИВТ РАН) выдвинута гипотеза о том, что взаимодействие между свободными атомами в плотном водороде и дейтерии происходит за счет коллективной квантовой энергии связи (cohesive energy), обусловленной делокализацией связанных электронов основного состояния атома. Предложенная модель предсказала неизвестный ранее фазовый переход из плотного молекулярного флюида в атомарную металлизированную жидкость. Этот теоретически предсказанный переход коррелирует с наблюдаемым в эксперименте диссоциативным фазовым переходом [2].

Доклад «Эффект памяти в импульсном разряде в азоте: корреляция между величиной эффекта и параметрами плазмы послесвечения», авторов **Н.А. Дятко и др.** (ТРИНИТИ), представляет собой работу по кинетике низкотемпературной плазмы. Разряд зажигался в разрядной трубке длиной 40 см (расстояние между электродами 40 см) и внутренним диаметром 2,8 см. Давление азота 1 Торр, температура газа комнатная – 300 К. Напряжение источника питания $V_0 = 3,6$ кВ, балластное сопротивление 260 кОм. Исследовалась последовательность из двух разрядных импульсов. Напряжение пробоя во втором импульсе (U_2) сопоставлялось с напряжением пробоя в первом импульсе (U_1) в зависимости от временного интервала между импульсами. Длительность каждого импульса 10 мс.

На двух заседаниях стендовой секции было представлено 66 докладов. значительная часть из них была связана с технологическими применениями низкотемпературной плазмы, например, «Изменение поверхностных свойств текстильных волокон и материалов с помощью низкотемпературной плазмы» (авторы **Букина Ю.А., Ибатуллина А.Р., Сергеева Е.А.** из Казанского национального исследовательского технологического университета). Другая часть докладов была связана с исследованием свойств и процессов в низкотемпературной плазме. В частности, таких как расчет «*Электрофизические характеристики*

ки разряда атмосферного давления с водным раствором сульфанола в качестве катода» (**Шутов Д.А., Исакина А.А., Коновалов А.С., Бухарин Д.Б., Бобкова Е.С.**, ИГХТУ). Третья группа связана с исследованиями специфических форм разрядов в низкотемпературной плазме. Сюда можно отнести, например, доклад «*Спектроскопия СВ-разряда в жидких с7–с16 углеводородах*» (авторы **Константинов В.С., Лебедев Ю.А. и др.**, из ИНХС РАН).

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

Физические основы плазменных и лучевых технологий

На секции «**Физические основы плазменных и лучевых технологий**» было представлено 14 устных и 43 стендовых доклада из институтов РАН, вузов СНГ и других ведущих научных центров России. Доклады были посвящены широкому спектру вопросов – проблемам генерации и усиления СВЧ в различных плазменных устройствах, плазмохимии, в том числе плазменному воспламенению топлива, созданию высокочастотных (ВЧ) источников плазмы, проблемам сепарации отработанного ядерного топлива, медицинским приложениям, газификации различных веществ, а также другим физическим проблемам, связанным с плазменными технологиями.

В устных и стендовых докладах, представленных **Д.К. Ульяновым, О.Т. Лозой и др.** (ИОФ РАН, РУДН, МИРЭА) решалась задача управления спектром излучения в импульсно-периодическом режиме генерации СВЧ–излучения. Эксперименты проводились на плазменном релятивистском генераторе, выдающем последовательность импульсов длительностью 80 нс с частотой следования импульсов до 50 Гц при длительности пачки импульсов 1 сек. Выбранный режим работы позволял в каждом импульсе генерировать колебания на нескольких частотах, соответствующих разным продольным модам плазменно-пучкового резонатора. Были реализованы последовательности снижения и увеличения частоты от импульса к импульсу, последовательности импульсов с различной шириной спектров, а также генерация импульсов с неизменным спектром во всех импульсах пачки. В работе использовалась разработанная методика получения информации о спектре, форме, амплитуде, длительности СВЧ–сигнала. Результаты показали возможность

управления частотой СВЧ-излучения по заранее заданному закону в каждом импульсе пачки.

В докладе **А.С. Сахарова, В.А. Иванова, М.Е. Коньжева** (ИОФ РАН) с самосогласованным учетом электрического поля объемного заряда эмитированных электронов выполнено численное и аналитическое исследование вторично-эмиссионного электронного разряда (СВЧ–ВЭР) на диэлектрике в вакууме при различных углах наклона а вектора напряженности электрического СВЧ–поля относительно поверхности диэлектрика. Показано, что существует угол наклона поверхности диэлектрика относительно вектора электрической компоненты СВЧ–поля, при котором интенсивность СВЧ–ВЭР существенно снижается. Величина этого угла зависит от вторично-эмиссионных свойств диэлектрика, а коэффициент поглощения СВЧ-излучения в разряде СВЧ–ВЭР зависит и от величины СВЧ поля. В конечном итоге, поглощенная СВЧ-энергия выделяется в поверхности диэлектрика. На основании выполненных расчетов и компьютерного моделирования можно провести такую оптимизацию, при которой для конкретной электродинамической системы (например, резонатор, волновод и т.п.), нагрев или разрушения диэлектрика в разряде типа СВЧ–ВЭР будут минимизированы.

В цикле теоретических работ, выполненных в ФИ РАН и ОИВТ РАН (**С.А. Урюпин и др.**) теоретически рассмотрены эффекты генерации терагерцового излучения и магнитного поля при взаимодействии короткого лазерного импульса длительностью t с плазмой. Получено распределение терагерцового излучения по частотам, и показано, что в спектре излучения имеется широкий максимум около частоты $\omega = 1/t$. Изучено отражение пробного импульса плазмой, предварительно образованной при туннельной ионизации атомов вещества в поле фемтосекундного импульса циркулярно поляризованного излучения, занимающей полупространство $z > 0$. Показано, что имеет место эффект аномального усиления отраженного сигнала как при гидродинамическом, так и при кинетическом описании отклика электронов. В других докладах этих авторов рассмотрена задача генерации квазистационарного магнитного поля в случаях, когда источниками поля являются непотенциальная часть пондеромоторной силы, и развивается вейбелевская неустойчивость.

В работах коллектива ИЛФ СО РАН экспериментально исследована возможность ускорения потока ионов лазерной плазмы на приграничную

поверхность путём пропускания через плазму потока СВЧ-излучения. В работе впервые экспериментально показана возможность управления энергией ионов за счет эффекта выпрямления СВЧ-поля с частотой осцилляции 2,45 ГГц на нелинейности слоя пространственного заряда на границе плазмы.

В работе большого коллектива авторов из Новосибирска представлены первые результаты по регистрации электромагнитного излучения при взаимодействии 100-мкс электронного пучка с энергией электронов 50–100 кэВ с дейтериевой плазмой, удерживаемой в многопробочной ловушке.

В области исследования плазмохимических процессов авторским коллективом ИОФ РАН, ОИВТ РАН и МГУ (**Косский И.А., Попов Н.А. и др.**) изучено горение метан-кислородной смеси в замкнутом объёме, приведены результаты измерения концентрации электронов в плазме, сопровождающей их горение. Показано, что электронная концентрация в развитом пламени достигает $N_e \approx (2-6) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, что существенно превосходит значения, измеренные и предсказанные в работах предшественников. Теоретический анализ результатов этих измерений представлен в докладе И.А. Косского, Н.А. Попова, Е.А. Филимоновой, посвященном механизму хеми-ионизации и причинам возникновения голубого свечения при воспламенении метан–кислородной смеси. Показано, что возникновение голубого свечения связано в основном с излучением возбужденной молекулы формила (СНО*). Результаты расчетов концентрации электронов и частот электрон–нейтральных столкновений в зоне фронта волны горения согласуются с экспериментальными данными. В работе **Н.А. Попова** (МГУ) изучен механизм интенсификации химических реакций импульсными сильноточными разрядами и показано, что такого типа разряды могут быть эффективным источником воспламенения горючих смесей.

В работе, проведенной в МФТИ (**Александров Н.Л. и др.**), выполнено экспериментальное и теоретическое исследование воспламенения ацетилена под действием высоковольтного наносекундного разряда. Эксперимент проведен на ударной трубе с разрядной секцией. Воспламенение ацетилена происходило за отраженной ударной волной. Наличие неравновесной разрядной плазмы приводило к существенному уменьшению времени задержки воспламенения. Определены основ-

ные механизмы воздействия разрядной плазмы на воспламенение ацетилена.

В докладах, представленных авторскими коллективами МГУ имени М.В. Ломоносова (**В.А. Черников, В.Л. Бычков и др.**), изучалось влияние продольного электрического поля на стабилизацию воспламенения скоростной воздушно-пропановой смеси под действием продольно-поперечного разряда (ППР) постоянного тока. Эксперименты доказали возможность частичной стабилизации пламени горения высокоскоростной воздушно-пропановой смеси при помощи неоднородного продольного электрического поля. В другой работе сделан вывод о том, что эффект плазменно-стимулированного воспламенения воздушно-пропановой смеси наблюдается при создании СВЧ-разряда в скоростном потоке. Показано, что при одновременном действии СВЧ и ППР в скоростном потоке воздушно-пропановой смеси влияние СВЧ-разряда проявляется в дополнительной стабилизации процесса горения смеси, инициированного продольно-поперечным разрядом.

В работе, представленной **В.Ю. Великодным** (ОИВТ РАН, ИПМ РАН), экспериментально исследованы характеристики разряда в потоке воздуха и воздушно — керосиновой смеси. Показано, что под действием высокой температуры разряда и генерации активных радикалов происходит воспламенение струи и возрастает общая температура и проводимость потока, в котором появляются проводящие частицы углерода. Яркая выраженность разрядных каналов исчезает, и разряд становится диффузным.

В докладе **Мурсенковой И.В., Знаменской И.А., и др.** (МГУ) проведена высокоскоростная регистрация излучения при формировании импульсного объемного разряда. Экспериментально показано, что длительность излучения в исследованном оптическом диапазоне находится в соответствии с длительностью импульса тока разряда, причем с увеличением давления газа время свечения объемной фазы разряда уменьшается. Этот эффект связывается с ускорением процессов релаксации энергии внутренних степеней свободы молекул при увеличении плотности среды.

Большой интерес вызвал доклад **Г.И. Змиевской**. В нем проанализировано изменение свойств бислоя «SiC/металл» в потоке гелия. Это исследование механизмов неравновесных процессов радиационно-стимулированного фазового перехода востребовано в задачах плазмохимии и на-

нофизики: для контроля радиационного воздействия на материалы защитных покрытий различного назначения, например, стенок сопла плазменного двигателя, в тонкопленочных покрытиях карбидом кремния и др. Использование кинетической теории фазового перехода для описания образования зародышей пузырьков газа в кристаллической решетке твердого тела позволило получить важные результаты по самоорганизации дефектов в результате броуновского движения зародышей в решетке под действием дальнедействующих потенциалов коллективного самосогласованного косвенного упругого взаимодействия дефектов между собой.

Большой цикл работ, выполненных в МГУ, был посвящен исследованию ВЧ-разрядов. Так, в одном из докладов, представленном **Кралькиной Е.А. с соавторами**, изложены результаты математического моделирования с помощью программы КАРАТ индуктивного ВЧ-разряда низкого давления в аргоне. Показано, что в области скин-слоя в режиме аномального скин-эффекта формируется пучок электронов, азимутальная скорость которого осциллирует, достигая максимума дважды за период ВЧ-поля. Проведенные расчеты показали, что в этой области средняя энергия электронов выше, чем в центральных областях разряда. В другой работе приведены экспериментальные данные о параметрах плазмы ВЧ индуктивного источника плазмы диаметром 46 см, и показано, что наложение на плазму внешнего магнитного поля при давлениях менее 10 мТорр приводит к увеличению эффективности вложения ВЧ-мощности в плазму. В третьей работе рассмотрены основные закономерности геликонного разряда в связи с разработкой на его основе прототипа двигателя для космических приложений. В таком разряде ускорение ионов происходит на срезе двигателя, где возникает скачок электрического потенциала, обусловленный газодинамическим эффектом. Экспериментально установлено, что энергия ускоренных ионов может быть увеличена за счет увеличения радиальной составляющей магнитного поля на выходе из разрядной камеры, уменьшения потока газа или же увеличения магнитного поля в области резонансного возбуждения геликонов и волн Трайвелписа-Голда.

В докладе, представленном **Двининым С.А.** (МГУ), теоретически рассмотрена пространственная структура ВЧ-поля с частотой 100 МГц в емкостном ВЧ (ВЧЕ) разряде низкого давления с электродами большой площади (ради-

ус электродов $\approx 22,5$ см). Показано, что разряд поддерживается поверхностными волнами, распространяющимися вдоль границы плазма-слой пространственного заряда-металл. В работе получены аналитические выражения для импеданса разряда с учетом возбуждения четной и нечетной поверхностных волн, а также затухающих волн. Проведены численные расчеты структуры поля в разрядной камере и импеданса ВЧЕ-разряда.

В докладе **Богачева Н.Н. с соавторами** «*Моделирование ионизации плазменной вибраторной антенны*» основное внимание уделено вопросам ионизации газа полем ВЧ-волны. Для моделирования плазменной антенны был выбран полный электродинамический код.

Следует отметить работы, посвященные технологиям утилизации отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В работах **В.П. Смирнова с соавторами** (ОИВТ РАН, МФТИ), посвященных развитию метода плазменной сепарации отработавшего ядерного топлива, развита концепция плазменной сепарации ОЯТ в плоскости, перпендикулярной магнитному полю в электрическом поле специальной конфигурации. На примере установки «Архимед» численно исследована возможность ввода энергии в камеру сепаратора ОЯТ с магнитным полем с помощью ВЧ-излучения (геликонный разряд).

Ряд работ касался прямых технологических применений. В работе **В.С. Желтухина и др.** (КФУ, КНИГУ, Казань) развита математическая модель взаимодействия ВЧЕ-плазмы пониженного давления с неткаными материалами, показавшая, что воздействие данного типа разряда позволяет придавать коже, меху и тканям гидрофильные или гидрофобные свойства, улучшать их прочностные, технологические и эксплуатационные характеристики. Установлено также, что наночастицы серебра (Ag) в ВЧ индуктивном разряде (ВЧИ-плазме) пониженного давления распыляются полностью, и на поверхность образца поступает поток ионов и атомов серебра.

В докладе **Великодного В.Ю., Сона Э.Е., и др.** представлены результаты исследования электрофизических свойств разряда в пузырьковой жидкости применительно к задаче очистки сточных вод и предложена конструкция 9-электродного реактора с резонансным контуром.

В работах коллектива авторов из Санкт-Петербурга (**А.С. Лернер и др.**) проведен эксперимент по воздушно-плазменной газификации отходов древесины в реакторе, а также составлена

кинетическая модель образования и разложения смол на примере нафталина.

В докладе **Г.С. Лукьянчикова, Т.Р. Хазиева** (ИОФ РАН) проверялась возможность создания потока воздуха с помощью электрически заряженных микрокапель, движущихся в постоянном электрическом поле.

В других докладах рассмотрены интересные вопросы масс-сепарации плазменного потока, бактерицидного воздействия самостоятельного искрового разряда и холодных плазменных струй, большинство из которых имеют прямое отношение к плазменным технологиям.

Таким образом, работа секции в целом показала, что в области плазменных и пучковых технологий ведется достаточно активная исследовательская работа, причем число работ, которые можно характеризовать не только как научно-исследовательские, но и как опытно-конструкторские, постоянно растет. Следует, однако, отметить, что основное количество работ представлено от крупных исследовательских центров, а работы, представленные малыми предприятиями и исследовательскими фирмами отсутствовали на конференции.

Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего

На ставшую уже традиционной секцию «**Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего**» в этом году было представлено 31 доклад, из них 9 были доложены на устном заседании, 22 – на стендовом.

Доклады устного заседания были посвящены системам ИТЕР. В докладе **Ж.— М. Древона** было рассказано об интеграции и расположении различных диагностических систем в диагностических портах ИТЕР.

Доклад **А.Ю. Лешукова** обобщил результаты работ, выполненных в 2012 г. по разработке, изготовлению и испытанию опытных образцов несущих конструкций первой стенки (НКПС) и соединителей модулей бланкета ИТЕР (СМ). Обсуждались также перспективы на период до подписания соответствующих Соглашений о Поставке разрабатываемых устройств. К наиболее значимым результатам работ, представленным в докладе, следует отнести:

- создание конструкции опытных образцов НКПС модулей и результаты их расчетного обоснования;

- конструкции опытных образцов СМ и результаты их расчетного обоснования;

- результаты испытаний работоспособности электроизоляционных покрытий на элементах системы крепления НКПС, а также результаты отработки процессов нанесения и шлифования указанных покрытий на опытных образцах СМ;
- результаты испытаний опытного образца НКПС модуля (полномасштабный макет);
- изготовленные макеты прототипа секций НКПС;
- отработанный цикл изготовления опытных образцов СМ с нанесением электроизолирующих покрытий;
- результаты испытаний на ударостойкость, износ трением, адгезионную прочность, напряжения пробоя опытных образцов элементов СМ;
- результаты входного контроля качества приобретенных материалов на соответствие сертификатам качества.

Д. Бородин рассказал в своем докладе о моделировании при помощи кода ERO времени жизни компонентов первой стенки ITER, изготовленных из бериллия.

Г.Г. Денисов рассказал о разработке новых мегаваттных гиротронов кооперацией ИПФ РАН и ЗАО «ГИКОМ». Основные усилия в этой работе были направлены на разработку для ITER гиротрона с выходной мощностью 1 МВт с КПД около 50%, генерирующего непрерывное СВЧ-излучение мм-диапазона на частоте 170 ГГц. Важной разработкой является также создание многочастотного гиротрона. В прототипе промышленного гиротрона для ITER используется рабочая мода $TE_{25,10}$, позволяющая обеспечить эффективное охлаждение стенок резонатора в мегаваттном режиме работы. В гиротроне используется рекуперация остаточной энергии электронов. Выходное окно гиротрона изготовлено на основе искусственного алмазного диска. Испытательный стенд в Институте физики токамаков (НИЦ «Курчатовский институт») был модернизирован с целью демонстрации основных параметров гиротрона для ITER. В частности, основные высоковольтные источники питания обеспечивают электронный пучок с энергией до 80 кэВ и током до 50 А. Используются вакуумированные линия передачи СВЧ-мощности и поглощающая СВЧ-нагрузка. За два последних года изготовлены и испытаны в импульсах до 1000 секунд два промышленных гиротрона. Для мегаваттного режима работы КПД гиротрона составил 53 %. В последнем варианте конструкции этот тип гиротрона работает в стационарном магнитном поле сверх-

проводящего магнита без долива жидкого азота и жидкого гелия.

В докладе **И.Б. Семенова** была изложена концепция построения Системы управления плазмой — Plasma Control System (PCS) установки ITER. Это основная система управления установкой ITER, которая задает алгоритм работы всей установки. PCS осуществляет управление всеми аспектами работы установки с плазмой, такими как подготовка камеры, старт плазмы, подъем, поддержание и спад тока, горение разряда, управляемое прекращение разряда, предсказание неустойчивости срыва и осуществление действий, смягчающих последствия неустойчивости срыва (Disruption Mitigation). Последнее осуществляется через Центральную Систему Блокировок и Защит (CIS — Central Interlock System). Алгоритмы PCS рассматривают целые подсистемы CODAC как сенсоры и актуаторы, не вдаваясь в подробности функционирования устройств на нижнем уровне. PCS размещается в ядре центральной вычислительной системы установки (High Performance Computing System). PCS связана с остальными системами посредством специальных сетей передачи данных, таких как — Synchronous Databus network (SDN), которая предназначена для передачи всех данных необходимых для управления в реальном времени, TCN (Timing Communication Network) — осуществляющая точную привязку данных во времени, DAN (Data Archiving Network) — сеть предназначенная для создания архива текущих данных, и CIN (Central Interlock Network). В отличие от 180 технических подсистем установки ITER, которые разрабатывают и поставляют страны участницы проекта, PCS как и CODAC полностью разрабатывает центральная команда ITER.

Доклад **А.В. Звонкова** посвящен современному статусу и достижениям в создании диагностических систем ITER, разрабатываемых в РФ: это активная спектроскопия, рефлектометрия плазмы со стороны сильного магнитного поля, спектроскопия водородных линий; анализаторы атомов перезарядки, томсоновское рассеяние и лазерная флюоресценция в диверторе, вертикальная нейтронная камера, монитор нейтронного потока в диверторе, гамма спектрометрия.

В докладе **Е.Е. Мухина** были рассмотрены физические аспекты применения диагностики томсоновского рассеяния (ДТР) в диверторе токамака ITER. Описан метод интерпретации данных ДТР в диверторе, позволяющий разделить влияние сдвига магнитной конфигурации и изменения

степени контакта плазмы с диверторными пластинами.

В.П. Будаев в своем докладе рассмотрел вопросы взаимодействия высокотемпературной плазмы со стенкой, которые следует учитывать при испытаниях вольфрамовых пластин дивертора ITER. Докладчик привел результаты проводимых на установке КСПУ испытаний вольфрама, исследований микроструктуры вольфрама и композитных материалов (вольфрам в сочетании с бериллий-подобными материалами) при плазменных нагрузках $0,5\text{--}2,5$ МДж/м², близких по величине к воздействию локальных плазменных потоков, создающихся в результате развития неустойчивости типа приграничной локализованной моды — Edge-Localized Mode (ELM), а также больших срывов основной горячей плазмы в токамаке (major disruption of high temperature plasma in tokamak) ITER.

Современный статус и достижения в развитии диагностики «Спектроскопия водородных линий» для ITER рассмотрены в докладе **Алексеева А.Г.** В этом докладе приведены подробные результаты по наиболее важным направлениям исследований и инженерно-конструкторским работам, математическим и инженерным расчетам, выполненным для реализации диагностики водородных линий в плазме ITER.

Работа секции «**Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего**» была весьма успешной. Она показала существенный прогресс в научно-исследовательских и конструкторских работах в поддержку международного проекта ITER в рамках ответственности Российской Федерации.

Выводы

1. XL Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых России, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в нашей стране. Она проходила уже в 40-й раз и собрала на свои заседания более 500 участников из научных центров России и ряда ведущих стран мира. Число как российских, так и иностранных организаций, представивших доклады на конференцию, остается стабильно на высоком уровне.

2. Уровень экспериментальных работ, выполненных российскими учеными на крупных отечественных установках в области магнитного удержания горячей плазмы, пока еще достаточно

высок, несмотря на физическое и моральное старение экспериментального и диагностического оборудования, снижение численности и старение научных коллективов.

3. Продолжаются работы по проектированию новой установки для инерциального термоядерного синтеза «Байкал», включая всестороннее экспериментальное, расчетное и теоретическое обеспечение всех этапов создания установки. Эта новая программа на основе суперсильноточного Z-пинча приведет к существенному продвижению фундаментальных и прикладных исследований в области инерциального термоядерного синтеза на основе электрического взрыва. Конечная цель этой программы состоит в получении зажигания термоядерной реакции в микроплазме, создаваемой с помощью концентрации генерируемого Z-пинчем рентгеновского излучения на микромишени.

4. Интенсивно ведутся исследования по разработке нейтронного источника на основе токамака и открытой магнитной ловушки. Такой источник быстрых нейтронов с энергий 14 МэВ может быть эффективным средством преобразования высокорadioактивных отходов ядерных реакторов в низкорadioактивные отходы, а также такой источник может быть эффективным в технологии производства дополнительного топлива для ядерных станций из вещества отработавших тепловыделяющих элементов ядерных реакторов.

5. В России в ОИВТ РАН создана новая лазерная установка современной конфигурации с выходной мощностью импульса 10 Тераватт и длительностью импульса 30 фемтосекунд, работающая с частотой следования импульсов до 10 кГц. Такая установка имеет широкие возможности для применения как в фундаментальных исследованиях, так и в прикладных разработках для проведения испытаний прочностных свойств металлов и сплавов, для разработки новых технологий обработки материалов с нанометровой точностью, развития новых методов диагностики деформационных и прочностных свойств наноструктур.

6. Растет число работ, посвященных прикладным исследованиям в области физики плазмы, увеличивается интерес к этим научным поискам среди молодежи, принявшей участие в работе конференции. Однако участники конференции отмечали значительные трудности, возникающие при внедрении результатов научных исследований в области создания новых материалов, полу-

ченных с применением плазмы, а также развитие новых плазменных технологий для применения в промышленности, в медицине, в космосе. Необходимо создание для этих целей нескольких разнoproфильных структур, аналогичных инновационному центру «Сколково», которые могли бы финансироваться как из бюджета РФ, так и частными российскими и иностранными компаниями.

7. Остается заметным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными в ведущих научных центрах Европы и США. Это указывает на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых в области физики плазмы остаются пока достаточно высокими, чтобы быть востребованными мировым научным сообществом.

8. В последние годы оргкомитет сталкивается с трудностями поиска спонсоров и средств для финансирования подготовки и проведения конференции в связи с общим удорожанием услуг и снижением финансовых возможностей российских научных организаций по поддержке участия научных сотрудников в конференции.

Заключение

В целом следует особо отметить, что XL 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. Издан сборник тезисов докладов конференции на русском языке [1]. Все представленные доклады размещены на сайте конференции [2] как на русском, так и на английском языках.

Данный обзор подготовлен при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований, проект № 13-02-6000.

Литература

1. XL Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС. г. Звенигород, 11–15 февраля 2013 г. Тезисы докладов. М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2013 г.—360с. ISBN 978-5-9903264-3-9.
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XL/Zven_XL.html

Modern status of research on plasma physics and controlled fusion in Russia in 2012

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

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 199991, Russia
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

The article provides a review of the most interesting results presented at the annual XL International (Zvenigorod) Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion held from 11 to 15 February 2013 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.

Bibliography — 2 references

Received August 2, 2013