

# Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.9

## Новые результаты прикладных и фундаментальных исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу в России в 2011 г.

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

*Дан обзор наиболее важных результатов, представленных на ежегодной XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся с 6 по 10 февраля 2012 г. в г. Звенигороде Московской обл. Проведен анализ главных направлений исследований в области физики плазмы в России и в мире.*

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

*Ключевые слова:* физика плазмы, конференция, обзор, управляемый термоядерный синтез, плазменные технологии.

### Введение

XXXIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде с 6 по 10 февраля 2012 г.

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

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

На конференции было представлено 289 научных докладов из 76 российских и 27 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу,

плазменным и лучевым технологиям. Общее количество авторов докладов составило более 800 чел.

Были заслушаны доклады по пяти важнейшим направлениям физики плазмы:

1. Магнитное удержание высокотемпературной плазмы.
2. Инерциальный термоядерный синтез.
3. Физические процессы в низкотемпературной плазме.
4. Физические основы плазменных и лучевых технологий.
5. Проект ITER. Шаг в энергетику будущего.

На конференции состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 14 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 86 устных и 189 стендовых докладов.

Тезисы всех докладов опубликованы в сборнике [1] и размещены на сайте конференции [2].

### Российские научные центры, представившие доклады на конференции (число докладов указано цифрами)

1. Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва — 44.
2. Институт Общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва — 42.

Гришина Ирина Анатольевна, старший научный сотрудник.

Иванов Вячеслав Алексеевич, заведующий отделом.

Коврижных Лев Михайлович, главный научный сотрудник.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 11991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. 8 (499) 135-80-31. E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 16 июля 2012 г.

© Гришина И. А., Иванов В. А., Коврижных Л. М., 2012

3. Физический Институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва — 30.
4. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск — 20.
5. Объединенный институт высоких температур РАН, Москва — 19.
6. Троицкий Институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Московская обл. — 18.
7. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург — 16.
8. Новосибирский государственный университет, Новосибирск — 13.
9. Московский государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Москва — 11.
10. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва — 10.
11. Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный, Московская обл. — 10.
12. ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", Санкт-Петербург — 9.
13. Частное учреждение Госкорпорации Росатом "Проектный центр ИТЭР", Москва — 8.
14. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров — 7.
15. Российский Университет Дружбы Народов, Москва — 6.
16. Национальный исследовательский ядерный университет Московский инженерно-физический институт, Москва — 6.
17. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва — 6.
18. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск — 6.
19. Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань — 5.
20. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва — 5.
21. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород — 5.
22. Дагестанский государственный университет, Махачкала — 5.
23. Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск — 5.
24. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Москва — 4.
25. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, Москва — 4.
26. Московский авиационный институт (Государственный технический университет), Москва — 4.
27. Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново — 3.
28. Институт динамики геосфер РАН, Москва — 3.
29. ФГОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова", Чебоксары — 3.
30. Институт проблем химической физики РАН, Московская обл., Черноголовка — 3.
31. 12-й Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны, Сергиев посад-7, Московская обл. — 3.
32. Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, Саранск — 2.
33. Костромской госуниверситет им. Н. А. Некрасова, Кострома — 2.
34. ФГУП "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Санкт-Петербург — 2.
35. Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва — 2.
36. Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань — 2.
37. ОАО "Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара", Москва — 2.
38. Институт космических исследований РАН, Москва — 2.
39. Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина, Москва — 2.
40. ФГУП "Центр Келдыша", Москва — 2.
41. Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва — 2.
42. Московский государственный университет печати им. Ивана Федорова, Москва — 2.
43. Иркутский государственный университет, Иркутск — 2.
44. Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина, Москва — 222.
45. НИИ Ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва — 1.
46. Иркутский государственный технический университет, Иркутск — 1.
47. Вычислительный Центр им. А. А. Дородницына РАН, Москва — 1.
48. Институт химии растворов РАН, Иваново — 1.
49. Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН, Черноголовка — 1.
50. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Троицк, Московская обл. — 1.
51. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН, Казань — 1.
52. Институт математического моделирования РАН, Москва — 1.
53. Институт механики МГУ им. Ломоносова, Москва — 1.
54. Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск — 1.

55. Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск — 1.
56. Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург — 1.
57. ФГУП "НИИ прикладной акустики", Дубна — 1.
58. ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова", Москва — 1.
59. Институт ядерных исследований РАН, Москва — 1.
60. ОАО "Криогенмаш", Московская обл., г. Балашиха — 1.
61. Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского (МАТИ), Москва — 1.
62. Новосибирский филиал института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Новосибирск — 1.
63. УТС — центр, Москва — 1.
64. Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского, Москва — 1.
65. ФГБНУ "Научно-исследовательский радиофизический институт", Нижний Новгород — 1.
66. Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, Иркутск — 1.
67. Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург — 1.
68. Санкт-Петербургский институт машиностроения (ИМЗ-ВТУЗ), Санкт-Петербург — 1.
69. Рязанский государственный радиотехнический университет, Рязань — 1.
70. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина, Снежинск — 1.
71. Санкт-Петербургский государственный горный университет, Санкт-Петербург — 1.
72. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург — 1.
73. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва — 1.
74. Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород — 1.
75. Башкирский государственный университет, Уфа — 1.
76. ОАО "Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности", Москва — 1.
3. Институт физики плазмы, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины, Харьков, Украина — 3.
4. Institut für Energie und Klimaforschung — Plasmaphysik, Forschungszentrum Jülich GmbH, EURATOM Association, Trilateral Euregio Cluster, Jülich, Germany — 2.
5. Корнельский университет, Итака, США — 2.
6. ГНПО "Сухумский физико-технический университет", Академия наук Абхазии, Сухум, Абхазия — 2.
7. JET, European Fusion Development Agreement, Culham Science Centre, Abingdon, Oxfordshire, United Kingdom — 1.
8. Университет А. Пуанкаре, Нанси, Франция — 1.
9. Исследовательский Центр Грама, Грама, Франция — 1.
10. Laboratoire des Plasmas et Conversion d'Énergie (LAPLACE), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Toulouse, France — 1.
11. Лаборатория физики плазмы, Королевская Военная Академия, Ассоциация ЕВРОАТОМ-Бельгия, Брюссель, Бельгия — 1.
12. Университет Тель-Авива, Лаборатория электрических разрядов и плазмы, Тель-Авив, Израиль — 1.
13. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands — 1.
14. Belgrade University, Belgrade, Serbia — 1.
15. Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, Spain — 1.
16. CNIM Group, Z.I. de Bré83507 La Seyne-sur-Mer, France — 1.
17. Culham Science Centre, Abingdon, Oxfordshire, United Kingdom — 1.
18. Centrum Wiskunde and Informatica, Amsterdam, The Netherlands — 1.
19. Associazione Euratom-ENEA sulla Fusione, Frascati, Rome, Italy — 1.
20. Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany — 1.
21. Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University, Fukuoka, Japan — 1.
22. Tri Alpha Energy, California, USA — 1.
23. Technische Universität Darmstadt, Institut für kernphysik, Darmstadt, Germany — 1.
24. University of Wisconsin-Madison, WI, USA — 1.
25. Институт физики комплексных систем им. Макса Планка, Дрезден, Германия — 1.
26. Таджикский государственный национальный университет, Душанбе, Таджикистан — 1.
27. Университет Южной Флориды, Тампа, США — 1.

**Научные центры стран дальнего и ближнего зарубежья, представившие доклады на конференции**

1. ITER Organization, Cadarache, France — 4.
2. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь — 3.

### Обзорные доклады

Обзорные доклады, которые были представлены на пленарных заседаниях конференции, по существу подводили итоги работ, выполненных за 2011 г. 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 физической плазмы проблемам.

**Профессор Дж. Онгена в докладе "Термоядерные исследования в Европе: захватывающие времена впереди"** (Лаборатория физики плазмы ЕРМ/КМС, Брюссель, и JET) представил участникам конференции планы предстоящих исследований на крупнейшем в мире действующем европейском токамаке JET (г. Калэм, Англия) и на строящемся международном термоядерном экспериментальном токамаке-реакторе ITER (г. Кадараш, Франция). В докладе подробно обсуждались результаты реализации программы модернизации токамака JET. В истекшем году на этой установке была проведена замена покрытия внутренней стенки основной камеры и дивертора. Теперь обращенная к плазме поверхность вакуумной камеры JET, так же как и камеры строящегося международного токамака ITER, имеет покрытие из бериллия в основной камере и покрытие из вольфрама в диверторе. Впервые на установке JET появилась экспериментальная возможность изучать свойства первой стенки будущей установки ITER. Во время модернизации JET были заменены более 4000 элементов стенки общим весом более 2 т. Разряды с плазмой были успешно возобновлены осенью 2011 г. Первые результаты показывают, что уровень углеродных примесей значительно уменьшился и что различные процессы рециклинга приводят к сильным эффектам уменьшения плотности плазмы. Программа экспериментов на JET до 2015 г. включает в себя полное тестирование первой стенки из бериллия, проведение плазменных экспериментов, моделирующих процессы, которые будут происходить при работе на установке ITER, реализацию на установке JET плазменных режимов, сходных с режимами работы ITER, а также проведение на JET экспериментов с дейтерий-третиевой плазмой. В своем докладе проф. Дж. Онгена подробно остановился на состоянии работ по запуску крупнейшего в мире стелларатора W7-X (г. Грайфсвальд, Германия). Отмечалось, что его строительство продвигается успешно: последний модуль основной конструкции установки был смонтирован в середине ноября 2011 г. Основными системами нагрева для этой установки будут: комплекс электронно-циклотронного резонансного нагрева (ECRH) мощно-

стью до 10 МВт, а также комбинация комплекса инъекции мощных пучков нейтральных атомов и комплекса ионного циклотронного резонансного нагрева (ICRH). Система очистки стенки стелларатора W7-X будет производиться с помощью плазмы, получаемой в различных режимах работы комплекса ICRH, который будет установлен в ближайшее время. Получение первой плазмы планируется на начало 2015 г., причем сначала эксперименты будут проведены в чистом водороде с использованием конфигурации плазмы типа "боб" при длительности разряда до 10 с. Затем вторую фазу экспериментов планируется провести, начиная с 2019 г., после установки системы охлаждения дивертора. При этом эксперименты будут проходить при более длинных рабочих импульсах. Наконец, докладчик вкратце остановился на состоянии работ по непосредственному строительству во Франции (г. Кадараш) нового крупнейшего токамака ITER усилиями международного научного сообщества, отметив завершение сооружения здания для монтажа сверхпроводящих катушек полоидального магнитного поля и фундамента для комплекса основного здания токамака ITER. По мнению докладчика, мировая физика высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза имеет прочную основу для дальнейшего прогресса на ближайшие 20 лет.

**Доклад проф. К. А. Разумовой "Синергетика плазмы в токамаках и других магнитных ловушках"** (НИЦ "Курчатовский институт") был посвящен обзору экспериментальных результатов, подтверждающих способность плазмы к самоорганизации. В различных магнитных ловушках (в токамаках, стеллараторах и пинчах с обращенным полем) наблюдается возникновение макроскопически устойчивых хорошо организованных "энергетических" профилей. Эксперименты показали, что в токамаках и стеллараторах самоорганизация приводит к формированию канонического нормированного профиля плазменного давления, не зависящего от следующих параметров: концентрации плазмы, распределения плотности тока внутри плазменного шнура, механизма нагрева плазмы, величины и радиального распределения мощности нагрева плазмы, дополнительного к омическому. Если ввести радиус плазмы, нормированный на коэффициент, зависящий от тока разряда, продольного магнитного поля и степени вытянутости сечения плазмы, то в этих координатах профиль давления плазмы будет одинаковым практически для любого токамака. Характерно, что время установления этого профиля давления в токамаке много меньше энергетического времени жизни плазмы. Такой канонический профиль давления плазмы существует во всех областях плазмы токамака, кроме зон транспортных барьеров. Доклад-

чик предполагает, что такой профиль регулируется энергетическими потоками в плазме, связанными с аккумулярованными на рациональных магнитных поверхностях турбулентными ячейками. Существование канонического нормированного профиля давления соответствует магнито-гидродинамически (МГД) устойчивой плазме, а его искажение приводит к раскачке мод с низкими номерами. В докладе отмечалось, что понимание саморегуляции профиля давления позволило объяснить такие сложные явления, как различная величина теплопроводности, найденной из баланса мощностей и из скорости распространения импульса тепла или холода, и быстрое изменение температуры или плотности в центральной части плазменного шнура при резких изменениях на границе плазмы, так называемая нелокальная зависимость транспортных коэффициентов от параметров плазмы. Следует, однако, заметить, что с утверждением о существовании канонических профилей давления плазмы в стеллараторах согласны далеко не все ученые, специализирующиеся в области физики высокотемпературной плазмы.

Достижения международной команды, работающей в рамках Международного соглашения с участием России о строительстве установки ITER, — крупнейшего в мире токамака, имеющего целью продемонстрировать "горение" плазмы при превышении в 10 раз выделенной термоядерной энергии по отношению к вложенной в плазму энергии ( $Q = 10$ ) и полной выделяемой термоядерной мощности 500 МВт в течение сотен секунд, были представлены в докладе д-ра физ.-мат. наук **А. В. Красильникова** "Прогресс в создании ITER и российский вклад" (Частное учреждение Госкорпорации Росатом "Проектный центр ИТЭР"). Отмечалось, что в последние полгода для интенсификации процесса сооружения ITER и оптимизации системы управления Международная организация ITER пересмотрела сроки выполнения, финансовые затраты и ответственность сторон за выполнение графика и предложила изменение некоторых технических систем. В частности, начаты исследования возможности установки вольфрамового дивертора с самого начала экспериментов на установке ITER, а также принято решение о переносе срока запуска ITER (получение "первой плазмы") на ноябрь 2020 г. Докладчик остановился на текущем состоянии работ по созданию критических систем ITER. Речь также шла о необходимых изменениях, которые возникли в процессе проектирования технических систем ITER: это изменение подхода к выполнению и контролю графика строительства, а также изменения в системе управления всем проектом. Подробно обсуждалось изготовление систем и оборудования в обеспечение российского вклада в проект

ITER: изготовление сверхпроводящих кабелей и изделий на их основе в кооперации с другими странами, производство элементов первой стенки вакуумной камеры ITER из бериллия, изготовление гиротронных комплексов и систем их электропитания, разработка прототипов диагностик, трехмерное проектирование различных систем ITER, развитие системы CODAS и т. д.

**Доклад проф. С. В. Мирнова** "От ТМ-2 и Т-3 до ДЕМО и далее (к 50-летию получения первых 100 эВ на ТМ-2)" (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), приуроченный к полувековому юбилею получения макроскопически устойчивого плазменного разряда с электронной температурой более 100 эВ на токамаке ТМ-2 в 1962 г., носил характер научно-исторического обзора. Уже через год после этого выдающегося результата в 1963 г. разряд с близкими параметрами по температуре электронов был получен на самом большом для того времени советском токамаке Т-3. Последующее сравнение характеристик плазменного удержания в этих двух установках позволило предложить (1968 г.) первый феноменологический закон подобия для энергетического времени жизни — скейлинг, который стал физической базой для создания многочисленных токамаков в различных странах мира. Этот процесс привел к созданию больших токамаков, приближающихся к зажиганию дейтерий—третиевой (ДТ) смеси с мощностью термоядерного синтеза на уровне 10 МВт, и к началу работ по созданию международного проекта ITER с предполагаемой выделяемой мощностью реакций синтеза около 500 МВт. Было отмечено, что токамаки такого уровня уже сегодня могли бы найти промышленное применение в качестве мощных источников быстрых нейтронов для ядерной энергетики в качестве трансмутаторов ("сжигателей") ядерных отходов, а также для производства ядерного топлива. Российские специалисты в области ядерной энергетики, заинтересованные такими приложениями, сформулировали требования для подобных источников нейтронов, которые могли бы обеспечить первые шаги в области технологических исследований в этих направлениях. Это стационарность такого нейтронного источника, создающего поток нейтронов в течение 80 % рабочего времени или несколько более, при полной мощности нейтронного потока не менее 20 МВт и его плотности не менее  $0,2 \text{ МВт/м}^2$ . Крупные токамаки с выходной мощностью ДТ-синтеза выше 10 МВт — TFTR и JET — имели среднюю нейтронную нагрузку около  $0,1 \text{ МВт/м}^2$ , но только в переходном режиме с длительностью разряда около 1 с. Квазистационарный нейтронный поток на уровне 5 МВт и длительностью 5 с был получен на европейском токамаке JET с плотностью нейтронной нагрузки менее  $0,025 \text{ МВт/м}^2$ . В докладе обсуждались меры,

необходимые для получения в токамаке масштаба JET стационарной ДТ-реакции с нейтронной нагрузкой около  $0,2 \text{ МВ/м}^2$ . Это снижение среднего значения заряда иона в плазме  $Z_{\text{eff}}$  путем применения электронно-циклотронного резонансного нагрева (ECRH) и использование лития в качестве компонента первой стенки, контактирующей с плазмой; создание стационарных источников нейтральной инжекции с энергией 150—170 кэВ (при использовании пучка нейтрального трития); удаление гелия (He) из плазмы; создание замкнутого контура циркуляции топлива. Обсуждались также перспективы создания установки ДЕМО и дальнейших шагов в области термоядерного синтеза.

**Доклад В. А. Рожанского** "Управление транспортным барьером в токамаке с помощью резонансных магнитных возмущений" (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) был посвящен вопросам работы токамака в режимах с развитием пристеночных электромагнитных локализованных мод (ELMs Type I). Отмечалось, что основным режимом работы современных токамаков и строящегося токамака-реактора ITER является режим улучшенного удержания (H-режим). Работа в этом режиме, как правило, сопровождается развитием процессов ELMs, которые приводят к временному разрушению краевого транспортного барьера и выбросу частиц и энергии через сепаратрису и далее на диверторные пластины. По современным представлениям, работа реактора в режиме с ELMs невозможна из-за высокой тепловой нагрузки на пластины. Одним из наиболее эффективных методов подавления ELMs является создание резонансных магнитных возмущений (RMP) в области краевого транспортного барьера за счет дополнительных седловых обмоток, которыми в настоящее время оснащены многие токамаки, и такие обмотки предусмотрены на установке ITER. В докладе были проанализированы механизмы воздействия RMP на структуру транспортного барьера в токамаке. Обсуждались такие явления, как уменьшение плотности плазмы в барьере, так называемый "pump-out" эффект, уменьшение отрицательного электрического поля или изменение его знака, ускорение плазмы в тороидальном направлении, эффекты экранирования RMP плазмой, возможные механизмы подавления ELMs. Аналитические предсказания и результаты численных расчетов сопоставлялись с данными экспериментов на действующих токамаках DIII-D, MAST, ASDEX-Up grade. В докладе обсуждались возможные сценарии работы ITER с режимом RMP.

Особенности использования методов генерации неиндукционного тока нижегибридными волна-

ми рассматривались в докладе **В. В. Дьяченко** "Генерация неиндукционного тока нижегибридными (НГ) волнами в традиционных и сферических токамаках" (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН). Отмечалось, что методы генерации неиндукционного тока нижегибридными волнами подробно исследованы и хорошо зарекомендовали себя в традиционных токамаках. Однако при попытках использования этого метода в установках с малым аспектным отношением, больших плотностях плазмы и относительно низких тороидальных магнитных полях в условиях, когда плазменная частота ниже электронной циклотронной, эти методы сталкиваются с рядом трудностей. В частности, сценарий НГ-генерации тока сложно реализовать из-за недоступности внутренних областей плазменного шнура для волн с продольным замедлением, необходимым для генерации тока. Тем не менее, присущая сферическим токамакам сильная полоидальная неоднородность открывает такую возможность, если возбуждать волны, замедленные преимущественно в полоидальном направлении. В докладе был сделан обзор современного состояния экспериментов по генерации тока НГ-волнами в традиционных токамаках. Обсуждались результаты численного моделирования возбуждения, распространения и поглощения НГ-волн применительно к экспериментам по генерации тока в сферическом токамаке. Были проанализированы возможности оптимизации ввода высокочастотной (ВЧ) мощности в плазму на токамаке Глобус-М, и описан статус подготавливаемого эксперимента по генерации НГ-тока увлечения на частоте 2,5 ГГц. Также были приведены результаты пилотного эксперимента по подъему и поддержанию тока только с помощью НГ-волн (на частоте 900 МГц) при полном отсутствии вихревого электрического поля.

Большой интерес у участников конференции вызвал доклад **большого международного коллектива авторов, представленный проф. Д. Хоффманом** "High Energy Density Physics with Intense Heavy Ion Beams" (Technische Universität Darmstadt, Institut für Kernphysik, Darmstadt, Germany; Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany; ИПХФ РАН, г. Черногоровка МО, Россия; ИТЭФ, Москва, Россия). В докладе отмечалось, что установки с пучками тяжелых ионов (Facility for Antiprotons and Ion Research) в будущем обеспечат интенсивности токов в пучке, на три порядка превышающие предельные плотности тока в существующих установках. Это открывает новые возможности для исследования теплофизических и транспортных свойств материи высокой плотности энергии в режимах, которые труднодостижимы традиционными методами ударного

сжатия. Обсуждался пример достигнутого состояния материи с очень высокой плотностью энергии: недавно был достигнут новый рекорд интенсивности пучка с  $10^{10}$  ионов урана с зарядом  $73^+$  и энергией 350 МэВ на нуклон. На этой установке будет возможно изучать теплофизические свойства состояний с высокой плотностью энергии, такой, что вещество переходит в режим "warm dense matter" (теплая материя), на фазовой диаграмме которому соответствуют высокие плотности и относительно низкие температуры. Зависимость изменения плотности "теплой материи" будет исследоваться с помощью протонного микроскопа. В докладе также были суммированы последние достижения по разработке криогенных мишеней, а также дан обзор развития исследований пучковой плазмы, создаваемой взаимодействием пучков тяжелых ионов с различными мишенями.

Поведение термически неравновесной газоразрядной плазмы рассматривалось в докладе проф. **Б. М. Смирнова** и **П. В. Каштанова** "Кинетика газоразрядной плазмы" (ОИВТ РАН, Москва). В докладе отмечалось, что ионизованный газ во внешнем электрическом поле (или газоразрядная плазма) представляет собой наиболее распространенный тип плазмы с наибольшим числом приложений. Это связано с относительно простым способом создания и поддержания газоразрядной плазмы под действием электрического поля, причем энергию от электрического поля получают сначала электроны, и далее она передается атомам или молекулам газа в процессе столкновения с ними нагретых электронов. Такой способ создания и поддержания газоразрядной плазмы делает ее термодинамически неравновесной по определению. Поэтому, в отличие от термодинамических объектов, газоразрядная плазма требует кинетического описания на языке функций распределения электронов по скоростям или энергиям. Основываясь на измеренных скоростях процессов, была проанализирована кинетика газоразрядной плазмы инертных газов в области параметров, при которых свойства газоразрядной плазмы определяются упругими и неупругими процессами столкновения электронов с невозбужденными атомами, а также процессами с участием возбужденных, как метастабильных, так и резонансно возбужденных атомов. При этом газоразрядная плазма рассматривалась как самосогласованная система, так что процессы столкновения атомных частиц определяли параметры этих частиц в плазме, от которых, в свою очередь, зависела скорость соответствующих процессов. Был рассмотрен пример: возбуждение и ионизация атомов в плазме в результате столкновения атомов с электронами при типичных условиях, когда средняя энергия электронов заметно меньше энергии возбуждения атома и опре-

деляется частью быстрых электронов из "хвоста" функции распределения электронов по энергиям. Этот процесс ведет к обеднению хвоста функции распределения, что, в свою очередь, ведет к уменьшению скорости возбуждения атомов в плазме. Представлены различные режимы кинетики рассматриваемой газоразрядной плазмы.

Пленарный доклад проф. **А. Н. Старостина** "Увеличение скоростей реакций ядерного синтеза за счет квантовых эффектов в распределении частиц по импульсам в неидеальной плазме" (ГНЦ РФ ТРИНИТИ, Троицк) был посвящен анализу экспериментальных ситуаций, в которых результаты измерения нерезонансного сечения ядерных реакций оказываются сильно зависящими от среды, в которой происходит взаимодействие. Одним из ярких примеров таких ситуаций является взаимодействие пучка дейтронов с мишенью из дейтерированного металла танталла (Ta). В этих опытах было показано, что сечение ядерной реакции образования ядра трития и протона при взаимодействии двух ядер дейтерия  $d(d, p)t$  (в данном случае взаимодействие ядер дейтерия в дейтерированном тантале) оказалось на несколько порядков больше, чем предсказываемое общепринятой моделью для частиц малых энергий. В серии работ, упомянутых докладчиком, последовательно учитывалось влияние квантовых эффектов, возникающих в силу принципа неопределенности Гейзенберга для частиц, упруго взаимодействующих с частицами неидеальной среды. Результаты точных расчетов сравнивались с приближенными аналитическими расчетами соответствующей диаграммы Фейнмана с помощью нерелятивистских кинетических функций Грина в среде, которые соответствовали обобщенной функции распределения взаимодействующих частиц по энергиям и импульсам. Проведенные расчеты показали, что квантовые эффекты существенно влияют на скорости таких реакций, как взаимодействие протона с ядром изотопа бериллия ( $p + {}^7\text{Be}$ ), взаимодействие ядер изотопов гелия ( ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ ), взаимодействие протона с ядром изотопа лития ( $p + {}^7\text{Li}$ ) и взаимодействие ядер углерода ( ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$ ). Уточненные величины скоростей реакций могут быть значительно выше, чем их классические значения для условий, ожидаемых в недрах Солнца и сверхновых звезд. Обсуждалась также возможность наблюдения теоретических предсказаний в лабораторных условиях.

В докладе д-ра физ.-мат. наук **В. П. Будаева** с соавторами "Переменяемость и обобщенное самоподобие в турбулентных пограничных слоях лабораторной и магнитосферной плазмы" (НИЦ Курчатовский институт, ИКИ РАН, Москва) был проведен обзор экспериментальных наблюдений развитой турбулентности с переменяемостью в

плазме лабораторных установок и в магнитосфере Земли, а также в гидродинамических потоках. Сравнительный анализ фундаментальных свойств флуктуаций вблизи границ плазмы, удерживаемой в термоядерных установках, и турбулентных пограничных слоях (ТПС) магнитосферы Земли показал схожесть их основных статистических характеристик, в том числе зависимости от масштабов (скейлинга) структурных функций и параметров мультифрактальности. Отмечалось, что наблюдаются перемежаемый характер флуктуаций и аномальный перенос массы и импульса за счет спорадических инъекций плазменных потоков со значительно большей вероятностью больших амплитуд потока, чем предсказывается гауссовым законом классической диффузии. Турбулентность в периферийной области удержания плазмы в термоядерных установках и в ТПС обладает обобщенным свойством масштабной инвариантности в широком диапазоне характерных длин, простирающемся вплоть до масштабов диссипации. Экспериментальные скейлинги, полученные в плазменных ТПС, используются для сравнения с аналогичными результатами экспериментов в нейтральных средах, что позволяет выявить универсальные свойства развитой турбулентности. Экспериментально определенные скейлинги ТПС описываются лог-пуассоновской моделью турбулентности с квазиодномерными диссипативными структурами. При этом смещение  $\delta x$  частиц со временем  $\tau$  описывается соотношением типа:  $\langle \delta x^2 \rangle \propto \tau^\alpha$  с показателем  $\alpha \approx 1,2-1,8$ , и это свидетельствует о супердиффузии.

Интерес участников привлек доклад **д-ра физ.-мат. наук С. В. Бондаренко с соавторами "Концепция построения лазерной установки УФЛ-2М"** (РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров), где говорилось, что в настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ начата работа по созданию лазерной установки УФЛ-2М мегаджоульного уровня энергии, позволяющей в лазерных мишенях достичь условий термоядерного горения. В проекте учтен опыт строительства установок NIF (США) и LMJ (Франция), что позволит снизить стоимость работ до 45 млрд руб. Это значительно ниже затрат на строительство американской лазерной установки NIF (4 млрд дол. США). Основой проекта являются научные и технологические достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ в области создания мощных лазеров, накопленные за последние 20 лет и реализованные при создании установки "Луч" — действующего прототипа модуля установки УФЛ-2М. Проект основан на использовании второй гармоники излучения Nd-лазера. Предлагаемая геометрия позволит добиться эффективного сжатия мишеней как при прямом, так и при непрямом облучении с использованием

сферического конвертора без кардинальной перефокусировки системы. Ожидается, что суммарная энергия установки составит 4,6 МДж на рабочей длине волны 1053 нм, а величина доставляемой к мишени лазерной энергии — 2,8 МДж уже на длине волны 527 нм. Итогом сотрудничества большого числа российских организаций и предприятий станет использование элементов, разработанных и произведенных, в основном, в России, в том числе активных лазерных элементов с большой лучевой прочностью и увеличенной апертурой, для накачки которых будет применена смешанная диодно-ламповая система.

**В докладе д-ра физ.-мат. наук В. Б. Розанова "Лазерный термоядерный синтез: состояние и перспективы"** (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН) был дан обзор результатов, полученных на действующих в мире мощных лазерных установках, включая лазер NIF в Ливерморской лаборатории (США). Обсуждались также новые научные результаты и программы будущих исследований на зарубежных лазерных установках: LL (Франция), Omega (США), FIREX и Gekko-EHA (Япония), ELI (Европейский союз), PALS (Чехия), RHELIX (Германия), Искра-5, Луч, УФЛ-2М (все РФЯЦ-ВНИИЭФ, Россия). Доклад базировался на материалах Европейской конференции по взаимодействию лазерного излучения с веществом (ECLIM-2010) и Международной конференции по инерциальному синтезу (IFSA-2011). Основная часть доклада была посвящена экспериментам на лазере NIF, продвижению ученых США к зажиганию мишеней при непрямом (через рентген) облучении. Представлен анализ рентгеновских и нейтронных изображений мишени при энергии лазерного импульса 1—1,5 МДж. Отмечено, что хотя все элементы NIF соответствуют проектным спецификациям, нейтронный выход, зафиксированный на установке к настоящему моменту, составил всего 10—15 % от ожидаемого. В связи с этим в планы работ по программе NIC (National Ignition Campaign) внесены изменения, о чем было отдельно упомянуто в докладе. Были рассмотрены методы диагностики, конструкции и режимы сжатия мишеней как непрямого, так и прямого сжатия, оптимизация которых проводилась в ходе многолетних исследований на установке OMEGA (США) и других установках коллаборации, участвующей в проекте. Обсуждалась проблема влияния на нейтронный выход гидродинамических неустойчивостей и перемешивания, возникающих при сжатии мишеней. Были приведены данные об источниках возмущений, которые могут привести к снижению нейтронного выхода: несоблюдение параметров мишеней при их изготовлении, погрешности наведения и дисбаланса пучков, неточное попадание мишени в область фокусировки ла-



зерных пучков. Из приведенных данных и их анализа следует, что наблюдаемый в экспериментах сниженный нейтронный выход значительно больше, чем предсказывают расчеты с учетом приведенных факторов асимметрии.

Вопросам, связанным с эффективным поиском необходимой информации среди огромного объема оцифрованной информации, находящейся в публичном доступе, был посвящен доклад С. А. Шумского "Мозг и язык: индексация смыслов" (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН). В докладе был представлен подход к созданию семантической поисковой машины, способной индексировать смысловое содержание текстов. Подход основан на массовой параллельной архитектуре искусственных нейронных сетей, прототипом которой послужила модель функционирования коры головного мозга. Докладчик поделился своими представлениями о том, как может выглядеть достаточно реалистичная нейросетевая модель "языкового органа", способная в единой манере самостоятельно выявлять в потоке символов иерархии языковых паттернов в строении слов (морфология) и предложений (синтаксис). Значения слов (семантика) возникают в процессе обучения на основе статистики их взаимного употребления: слова с близкими значениями (синонимы) используются одинаковым образом в одних и тех же контекстах. Базовым модулем модели является участок коры, рассматриваемый как однородная двумерная адаптивная вычислительная среда (вариант "рекурсивных самоорганизующихся карт"). Было показано, каким образом последовательность таких модулей можно научить разбирать и индексировать структуру и смысловое содержание слов, фраз и предложений. На основе этих представлений разработан прототип высокопараллельного "семантического процессора", способного индексировать смысловое содержание текстов. Были приведены результаты обучения этого прототипа на большом массиве русскоязычных текстов. Возможность подобной смысловой индексации фактов и их описаний существенна для создания поисковых (в том числе научных) систем нового поколения.

### Секционные доклады

На секции "Магнитное удержание высокотемпературной плазмы" (председатель секции — А. И. Мещеряков) был представлен 71 доклад (из них 19 на устных и 52 на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками 21 российских научных центров, 7 докладов выполнены совместно с сотрудниками научных центров США, Италии, Испании, Белоруссии, Великобритании и Украины.

Обсуждение докладов, представленных на секции, выявило возрастающий интерес научных коллективов страны к теме использования магнитных ловушек в качестве термоядерного источника нейтронов. В докладе Б. В. Кутеева "Статус проекта термоядерного источника нейтронов (ТИН): техническое задание на эскизное проектирование" (НИЦ "Курчатовский институт") была представлена разработка демонстрационного термоядерного источника нейтронов на основе токамака с мощностью реакции синтеза дейтерия и трития до 10 МВт, предназначенного для наработки ядерного топлива и трансмутации высокоактивных ядерных отходов. Данная разработка завершила стадию технического задания на эскизное проектирование ТИН. В рамках проекта были рассмотрены варианты ТИН на основе сферического токамака (СТ) и классических токамаков (КТ) с теплыми и сверхпроводящими обмотками. Была предложена и детально обоснована концепция ТИН-СТ (с током 1,5 МА, магнитным полем 1,5 Тл, большим радиусом 0,5 м, аспектным отношением 1,66, мощностью нагрева плазмы до 15 МВт). Также было проведено сравнение плазмо-физических и технико-экономических характеристик указанных вариантов ТИН. Подтверждена возможность достижения в ТИН мощности 1—10 МВт для всех представленных вариантов. При ответах на вопросы С. В. Мирнова возникла дискуссия о том, возможно ли функционирование установки ТИН FNS-ST, в которой средний поток мощности на поверхность вакуумной камеры будет составлять  $P/S = (0,7—1,4) \text{ МВт/м}^2$ . По мнению С. В. Мирнова, допустимый предел потока мощности  $P/S = 0,4 \text{ МВт/м}^2$  был обнаружен в экспериментах на токамаке TFTR (США), когда превышение этого предела вело к неустойчивости срыва на этом токамаке. В то время как все современные действующие токамаки функционируют в условиях, когда этот параметр составляет величину около  $P/S = 0,2 \text{ МВт/м}^2$ .

Успешно развивается проектирование термоядерных источников нейтронов на основе открытых ловушек. Так, в докладе А. В. Аникеева "Плазменный источник нейтронов на основе газодинамической ловушки для ядерных энергетических установок" было показано, как в течение ряда лет в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН совместно с рядом российских и зарубежных научных организаций развивается проект мощного источника D—T-реакции с энергией нейтронов 14 МэВ, который может быть использован для испытания элементов первой стенки и blankets термоядерного реактора-токамака, а также для других приложений. Проектируемый источник нейтронов плазменного типа базируется на

газодинамической ловушке (ГДЛ) — открытой системе для магнитного удержания плазмы. В ИЯФ СО РАН при сотрудничестве с Исследовательским центром Россендорф (Германия) была разработана система компьютерных 3D-кодов ITCS для численного моделирования мишенной плазмы, быстрых ионов, нейтрального газа и распределения продуктов реакции синтеза в линейной магнитной ловушке типа ГДЛ. В докладе были представлены также результаты расчетов параметров оптимизированной версии нейтронного источника на основе ГДЛ и анализ возможности реализации различных приложений данного нейтронного источника для атомной техники и ядерной энергетики.

Вызвал интерес участников конференции доклад А. Д. Беклемишева "Геликоидальная система для продольного удержания или ускорения плазмы" (ИЯФ СО РАН), в котором был предложен "шнековый" механизм для перекачки плазмы вдоль магнитного поля. Система основана на геликоидальной геометрии магнитного поля и похожа на модели магнитного поля в прямом стеллараторе. Вдоль всех силовых линий (кроме магнитной оси) поле гофрировано, т. е. реализуется модель многопробочного удержания. Если плазму в такой системе вращать с помощью радиального электрического поля, то должно возникнуть и продольное течение. Направление перекачки плазмы определяется тремя независимыми параметрами: направлением магнитного поля, правой или левой винтовой симметрией и знаком приложенного электрического поля. Это позволяет качать плазму от краев к центру магнитной ловушки. Такую систему предполагается использовать в качестве секции многопробочной ловушки для уменьшения продольных потерь. В обычной схеме многопробочных ловушек, таких как ГОЛ-3, коэффициент подавления продольных потерь пропорционален длине системы. В геликоидальной системе с радиальным электрическим полем подавление потерь должно быть экспоненциальным.

Значительное число докладов, представленных как на устных, так и на стендовых заседаниях секции (11 докладов), посвящены исследованию электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева и удержания горячей плазмы в стеллараторе Л-2М (ИОФ РАН). Это связано с тем, что на стеллараторе вступил в строй новый гиротронный комплекс электронного циклотронного нагрева.

В докладе Д. Г. Василькова "Особенности удержания плазмы в стеллараторе Л-2М при удельной мощности ЭЦР-нагрева до 2 МВт·м<sup>-3</sup>" (ИОФ РАН) были приведены результаты измерений радиальных профилей плотности и температуры электронов, расчеты энергосодержания

плазмы, данные о шафрановском сдвиге магнитной оси и о характеристиках коротковолновой микротурбулентности при изменении вводимой удельной мощности ЭЦР-нагрева от 1 до 2 МВт·м<sup>-3</sup>. В условиях высокой удельной мощности нагрева наблюдается ряд особенностей в поведении удерживаемой в стеллараторе плазмы, а именно, провальный в центральных областях плазменного шнура профиль плотности плазмы, причем профиль электронной температуры имеет уплощенную вершину в интервале изменений радиальной координаты  $r$  по отношению к радиусу плазмы  $a$  в диапазоне  $-0,3 < r/a < 0,3$ . Шафрановский сдвиг магнитной оси оказался малым ( $\sim 1$  см при относительном давлении плазмы  $\langle \beta \rangle \approx 0,2\%$ ), что может быть объяснено плоским профилем давления.

Одна из пока еще не решенных проблем создания реактора ITER — разработка методов обнаружения течи воды в системе охлаждения вакуумной камеры, бланкета и дивертора. На стеллараторе Л-2М проводятся эксперименты по обнаружению течи воды в вакуумной камере с горячей плазмой с параметрами, близкими к параметрам краевой плазмы ITER. Этому был посвящен доклад Г. С. Воронова "Обзор экспериментов на стеллараторе Л-2М по проблеме обнаружения течи воды в ITER" (ИОФ РАН). Большая мощность ЭЦР-нагрева ( $P_{\text{СВЧ}} = 0,5$  МВт) при относительно небольшом объеме плазмы ( $V_{\text{pl}} = 0,26$  м<sup>3</sup>) позволяет получить в стеллараторе Л-2М градиент температуры, сравнимый с градиентом температуры на краю плазмы в основном режиме ITER. Это обстоятельство дает возможность моделировать некоторые процессы краевой плазмы ITER на стеллараторе Л-2М. В проведенных экспериментах были смоделированы процессы возникновения течи в системе охлаждения первой стенки и поступления паров воды в горячую плазму. Был обнаружен эффект задержки появления линий фрагментов молекулы воды (гидроксила OH) в плазме, вызванный химическим взаимодействием молекул воды с бороуглеродным покрытием стенок камеры стелларатора. В установке ITER кроме бора (B) будут использованы покрытия из бериллия (Be) и лития (Li). Эти вещества также активно взаимодействуют с водой, и это может существенно повлиять на возможность обнаружения течи воды по появлению линий гидроксила OH в плазме. Вторая возможная методика обнаружения течи воды заключается в растворении в воде газа ксенона (Xe) и, в дальнейшем, обнаружении этого газа по его линиям. Регистрация по линиям Xe в этом отношении явно предпочтительнее, так как Xe не взаимодействует с атомами на стенках. Наиболее перспективная линия иона XeII 541,9 нм. Она попадает в область спектрального окна, где отсутствуют линии ионов

других типичных примесей. В экспериментах на стеллараторе Л-2М продемонстрирована возможность уверенной регистрации этой линии при потоке атомов Хе  $\sim 1 \cdot 10^{-6}$  Па·м<sup>3</sup>/с.

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

На секции "Инерциальный термоядерный синтез" (ИТС) было представлено 12 докладов на двух устных сессиях и 25 докладов на стендовой сессии (председатель секции Р. В. Степанов)

Доклады лазерно-плазменной тематики охватывали достаточно широкий спектр направлений. Экспериментам на мощных лазерных установках был посвящен только один доклад, представленный **С. В. Бондаренко** (РФЯЦ-ВНИИЭФ). В нем проведено сравнение результатов измерения температуры рентгеновского излучения плазмы в мишенях непрямого облучения по скорости ударной волны в алюминии на установке ИСКРА-5 и результатов сквозного численного моделирования по программе СНД-ЛИРА, позволившее определить коэффициент ограничения электронной теплопроводности ( $f = 0,03$ ). В докладе **В. Е. Шермана** (ЛМЗ-ВГУЗ), продолжающего цикл работ по исследованию перспектив применения твердого некриогенного горючего в мишенях для лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), особое внимание было уделено исследованию влияния теплового излучения плазмы на горение таких мишеней. Показано, что поглощение собственного излучения плазмы в мишенях такого типа приводит к смягчению требований по зажиганию и увеличению эффективности горения. Итогом доклада стало обоснование использования некриогенных бериллий—дейтерий—третиевых (BeDT) мишеней для быстрого зажигания ЛТС при энергии сжимающего лазерного излучения 2—3 МДж. В докладе **Е. В. Коршевой** (ФИАН) были представлены результаты исследования влияния микроструктуры топлива на общую эффективность мишеней. Отмечено, что анизотропия кристаллического криогенного горючего может оказать негативное влияние на сжатие, что, возможно, является важным в связи с результатами экспериментов на установке NIF. Метод создания криогенных мишеней, развитый в ФИАН, позволяет сформировать изотропный ультрадисперсный топливный слой, обладающий требуемым качеством топлива и, как

показывает моделирование, сохраняющий его до момента облучения лазером, тогда как анизотропный слой деградирует еще до момента прихода мишени в центр камеры. В докладе **Н. Н. Демченко** (ФИАН) была аналитически рассмотрена задача о диссипативной структуре течения плазмы в области критической плотности и его характерном масштабе неоднородности, определяющем эффективность генерации быстрых электронов и ускорения ионов, влияющих на режим работы мишеней ЛТС.

Несколько работ было посвящено процессам, протекающим при взаимодействии мощного ультракороткого лазерного импульса (УКИ) с веществом. Две работы были представлены Лабораторией диагностики плазмы ФИАН (докладчики **А. В. Брантов** и **С. Г. Бочкарев**). В первой работе проведен анализ взаимодействия мощных УКИ с мишенями, приобретшими сложную форму под действием лазерного предимпульса (эта проблема важна для многих практических, в том числе медицинских, приложений). Показано, что острая фокусировка в пятно с размерами порядка длины волны оптимальна для получения пучков протонов с максимальной энергией. Во второй работе авторами рассмотрена динамика электронов плазмы в суперпозиции электромагнитного поля УКИ и плазменного электрического поля. В этом случае возможен стохастический нагрев электронов, и их энергия может заметно превысить максимальное значение, отвечающее движению частицы в поле только лазерной волны.

Пространственная структура кильватерной волны, возбуждаемой в разреженной плазме узким лазерным пучком, численно и аналитически исследована в работе, представленной **А. И. Фроловым** (ОИВТ РАН).

В докладе **В. Д. Левченко** (ИПМ РАН) был представлен универсальный высокоэффективный 3D3V PIC-код CFhall, самосогласованно учитывающий три характерных временных масштаба, отличающихся друг от друга на порядок. Новый код позволяет производить расчеты с производительностью, близкой к пиковой на современных параллельных вычислительных системах.

Традиционно много докладов было посвящено экспериментам на сильноточных импульсных установках. Интерес вызвал цикл работ, представленных сотрудниками Лаборатории проблем новых ускорителей ФИАН (докладчики **Т. А. Шелковенко**, **С. А. Пикуз**, **В. М. Романова**, **И. Н. Тиликин**) и **С. И. Ткаченко** (МФТИ). Предложена конструкция гибридного X-пинча, имеющая ряд преимуществ перед традиционными многопроводочными X-пинчами. Она значительно расширяет область возможных экспериментов и позволяет

получать устойчивые результаты, генерируя единичную горячую точку, порождающую единичную вспышку мягкого рентгеновского излучения. Размер горячей точки (~1 мкм) определялся методом расчета дифракционных картин. Были также детально рассмотрены пространственные структуры, формирующиеся в кернах при электровзрыве тонких проволочек (ЭВП). Крупномасштабные молекулярно-динамические расчеты внутренней структуры кернов показали, что давление в сходящихся к центру проволочки интенсивных радиальных отраженных волнах может превысить динамический предел натяжения и в веществе начнется процесс кавитации, приводящий на начальной стадии расширения к формированию в центральной части проводника малоплотной пенной структуры, окруженной жидкой цилиндрической оболочкой. Это хорошо согласуется с результатами проекционной рентгенографии, полученными ранее. Экспериментальное исследование динамики формирования разрывов керна при ЭВП позволили предложить качественное объяснение, описывающее совокупность результатов: более интенсивное рассеяние электронов на неоднородностях и дефектах кристаллической структуры создает локальное повышение сопротивления и увеличение введенной в данную область энергии, что приводит к разрывам керна. Также получены экспериментальные данные по формированию страт при наносекундном взрыве для широкого диапазона параметров ЭВП.

Большое количество работ было посвящено методике экспериментов на электроразрядных установках. Коллективы ТРИНИТИ (докладчики **А. Н. Грицук, Г. С. Волков, К. Н. Митрофанов**), НИЦ "Курчатовский институт" (**В. Д. Королев**) и ФИАН (**А. П. Шевелько**) совместно продолжают совершенствование методов диагностики высокотемпературной импульсной плазмы: измерения с временным и/или пространственным разрешением в оптическом, рентгеновском и ВУФ-диапазонах длин волн, измерения магнитных полей и др., а также успешно применяют эти разработки для исследования физических процессов в многопроволочных сборках. Следует особо отметить, что методика количественной ВУФ-спектроскопии, впервые представленная на XXXVII Звенигородской конференции, стала широко применяемым инструментом исследования плазмы мощных Z-пинчей. При имплозии профилированного по массе квазисферического проволочного лайнера (КПЛ) впервые получено увеличение плотности энергии в плазме КПЛ до  $35,4 \text{ ТВт/см}^3$ , по сравнению с  $6,9 \text{ ТВт/см}^3$  для цилиндрических проволочных лайнеров (ЦПЛ) с аналогичными параметрами. Обнаружено, что в этих условиях источники

жесткого рентгеновского излучения представляют собой в центральной области КПЛ пространственно-однородное плазменное образование, расположенное симметрично относительно оси КПЛ. Для вольфрамовых ЦПЛ получено экспериментальное свидетельство существенной роли потоков плазмы в переносе энергии в осевом направлении. В быстром Z-пинче с лайнером из малоплотного дейтерированного полиэтилена на установке АНГАРА-5-1 зафиксировано возникновение локальных высокотемпературных плазменных образований, сопровождаемых эмиссией нейтронов с максимальным выходом  $3 \cdot 10^{10}$  нейтронов за импульс. Три доклада были представлены ИСЭ СОРАН (**А. Г. Русских, В. И. Орешкин, А. П. Артемов**). Следует отметить доклад **А. Г. Русских**, в котором рассматривались динамика сжатия плазмы и излучательные характеристики Z-пинчей, создаваемых на установке ИМРИ-5 с помощью многоканального вакуумного дугового разряда — методики, доложенной впервые на XXXVIII Звенигородской конференции. В докладе **А. П. Артемова** была представлена двухкадровая система импульсного зондирования в мягком рентгеновском диапазоне спектра, созданная на основе двух X-пинчей на компактных сильноточных импульсных генераторах. Новые диагностические и инструментальные методики были также рассмотрены в работах, представленных **А. А. Шведовым и Е. Д. Казаковым** (НИЦ "Курчатовский институт"). В докладе **А. И. Громова** (ФИАН) был предложен метод измерения плотности слоев из наночастиц тяжелых элементов с использованием компьютерного рентгеновского микротомографа. В докладе **Д. А. Войтенко** (Сухумский физико-технический институт) были приведены результаты исследований по выводу электронного пучка и плазменных струй на мишени в плазмофокусной установке КПФ-4. Моделированию плазмы электроразрядных установок с помощью 3D РМГД-кодов были посвящены три доклада: **О. Г. Ольховской** (ИММ РАН), **А. П. Орловой и Б. Г. Репиной** (РФЯЦ-ВНИИЭФ).

Интерес вызвал доклад **Ю. К. Куриленкова** (ОИВТ РАН), посвященный схемам с электростатическим удержанием. В докладе был сделан предварительный вывод, что заполненные плотным дейтерием микропоры, дислокации и т. п. на поверхности палладиевого (Pd) анода являются естественным многоканальным микрореактором, в котором на начальной стадии разряда проходят реакции синтеза.

Основываясь на материалах конференции, по-прежнему приходится констатировать недостаточный объем экспериментальных исследований в области ИТС. Конечно, сообщение о начале работ

по созданию установки УФЛ-2М и выделении для этого соответствующих средств вызывает оптимизм. Однако, помимо лазерной системы Искра-5 того же института РФЯЦ-ВНИИЭФ, в стране, фактически, нет других мощных установок, на которых могли бы проводиться исследования в поддержку программы УФЛ-2М в течение десятилетнего периода строительства этого лазера. Уже многие годы эксперименты в области сильноточных пинчей проводятся только на установках АНГАРА-5-1 и С-300. Не проводятся эксперименты в области импульсного электростатического удержания плазмы — направления, активно развиваемого во многих странах. Большую часть докладов в области ИТС составляют теоретико-вычислительные работы, что служит наглядной иллюстрацией недостаточного уровня развития экспериментальных исследований.

На конференции в рамках Научного совета РАН по проблеме "Физика низкотемпературной плазмы" работала секция "Физические процессы в низкотемпературной плазме" (председатель секции профессор В. С. Воробьев). Было заслушано три обзорных доклада, 23 устных доклада и 55 стендовых сообщений.

Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям:

- термодинамические и транспортные свойства неидеальной плазмы (А. С. Шумихин, А. Л. Хомкин, Е. М. Апфельбаум, В. Я. Тернова);
- элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы (К. Н. Ульянов, Н. А. Дятко, И. Л. Богданкевич, А. Г. Франк);
- комплексная плазма, различные применения низкотемпературной плазмы (Ю. В. Думин, Ю. А. Лебедев, С. А. Майоров, Т. В. Лосева и др.);
- пылевая плазма и плазма, возникающая в импульсных процессах (Ю. В. Думин, А. Г. Франк и др.).

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 Ю. В. Думина "Магнито-стимулированная диффузия в холодной ридберговской плазме" (ИЗМИРАН). В докладе обсуждалось одно весьма необычное явление, которого

следует ожидать в холодной слабоионизированной ридберговской плазме. Если в абсолютном большинстве известных плазменных систем (начиная от лабораторных устройств для осуществления управляемого термоядерного синтеза и кончая разнообразными астрофизическими объектами) наложение внешнего магнитного поля существенно подавляет диффузию в поперечном направлении, то в холодной ридберговской плазме может иметь место прямо противоположный эффект — усиление диффузии за счет магнитного поля. Были представлены две важные физические системы, в которых можно было бы наблюдать эффект такой магнито-стимулированной диффузии. Это эксперименты с ультрахолодной плазмой, создаваемой путем лазерного охлаждения и ионизации атомов в магнито-оптических ловушках, поскольку при свободном разлете и охлаждении такой плазмы образуется большое количество "вторичных" ридберговских атомов. Вторая потенциально интересная система относится к астрофизике. Это холодные межгалактические облака атомарного водорода (HI), наблюдаемые по излучению в рекомбинационных радиолниях. В таких облаках главное квантовое число ридберговских атомов может достигать значений вплоть до 1000, что значительно больше, чем в лабораторных условиях.

В докладе А. Л. Хомкина и А. С. Шумихана "Металлизация атомов в парах щелочных металлов" (ОИВТ РАН) были рассмотрены основы теории металлизации атомарного газа, заложенные еще в работах Вигнера-Зейтца и Дж. Бардина. Результатом этой теории стали расчеты коллективной квантовой энергии связи (cohesive energy), сжимаемости и других параметров для жидких щелочных металлов. Физические причины металлизации обусловлены появлением блоховских электронов (за счет перекрытия волновых функций) и увеличением (по абсолютной величине) энергии основного состояния (электронного терма) системы атомов в целом. Проявление эффектов металлизации следует ожидать в условиях, когда среднее межчастичное расстояние сравнивается с диаметром частицы. Термодинамика паров рассчитывается по термодинамической теории возмущений для однокомпонентной системы с учетом исключенного объема и металлизированной энергии связи атомов. Модель содержит фазовый переход пар—жидкость (петлю Ван-дер-Ваальса), параметры которого качественно согласуются с известными значениями. Выполнен расчет проводимости с использованием формулы Иоффе. Проводимость при околоскритических температурах демонстрирует переход металл—диэлектрик. Обсуждается корреляция этого перехода и перехода пар—жидкость.

В докладе **Н. А. Дятко и др.** "Влияние примеси азота на характеристики тлеющего разряда в гелии при средних давлениях" (ТРИНИТИ) была представлена работа по кинетике низкотемпературной плазмы. Известно, что добавление молекулярной примеси в инертный газ приводит к изменению электрических и спектральных характеристик тлеющего разряда. Степень и направленность изменения характеристик зависят от ряда параметров: сорта инертного газа, сорта и процентного содержания примеси, давления газовой смеси и др. В докладе были представлены результаты измерения электрического поля в положительном столбе тлеющего разряда в гелии и смесях гелия с 0,2 и 1 % азота в диапазоне давлений 2—40 Торр. Как и ожидалось, во всем рассмотренном диапазоне давлений величина электрического поля в разряде в смеси была больше, чем в разряде в гелии.

На двух заседаниях стендовой секции было представлено 65 докладов. Значительная часть из них была связана с технологическими применениями низкотемпературной плазмы. Например, внимание привлек доклад **И. Е. Иванова, П. С. Стрелкова и Д. В. Шумейко** "Плазменный релятивистский СВЧ-усилитель с плавной перестройкой частоты в широком диапазоне частот" (ИОФ РАН).

Другая часть докладов была связана с исследованием свойств и процессов в низкотемпературной плазме. В частности, таких как расчет "Исследование методами спектроскопии КАРС и эмиссионной спектроскопии распределений заселенностей молекул азота по электронно-колебательно-вращательным уровням возбужденных  $S^3P_u$ ,  $V^3P_g$  и основного  $X^1\Sigma_g^+$  состояний в положительном столбе тлеющего разряда постоянного тока и СВЧ-разряде в азоте при средних давлениях", выполненный в ИНХС РАН **В. А. Шахатовым, Т. Б. Мавлюдовым, О. А. Гордеевым и К. А. Верещагиным**.

Третья группа докладов посвящена исследованиям специфических форм разрядов в низкотемпературной плазме. Сюда можно отнести, например, доклад **Ф. Г. Бакшта и В. Ф. Лапшина** "Расчет световых параметров цезиевой плазмы в условиях импульсно-периодического разряда" (ФТИ РАН).

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

В рамках секции "Физические основы плазменных и лучевых технологий" (председатель секции проф. А. Ф. Александров) было проведено 2 устных заседания, на которых было заслушано 18 докладов и 2 стендовых заседания, на которых обсуждались 43 доклада. В докладах были представ-

лены результаты научно-исследовательских работ, выполненных сотрудниками академических институтов, ведущих учебных заведений России, и их совместных работ.

Тематика докладов была весьма разнообразна и включала в себя обсуждение как фундаментальных теоретических и экспериментальных вопросов физики плазмы и газовых разрядов, так и проблемы разработки физических основ современных плазменных и лучевых технологий.

Так, в докладе **В. П. Силина** "Роль нагрева частиц в теории ионно-звуковой турбулентности (ИЗТ) плазмы" (ФИ РАН), по существу, заложены основы своеобразной электродинамики плотной турбулентной плазмы со специфической временной нелинейной дисперсией и турбулентной проводимостью.

Значительная группа работ была посвящена проблемам создания источников особо мощного электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне и источников излучения терагерцового диапазона длин волн, регистрации и исследовании динамики параметров излучения, получению и практическому использованию плазмы СВЧ-разрядов в различных технологических приложениях. Здесь привлекают внимание создание СВЧ-плазмотрона применительно к задачам пищевой промышленности и медицины; накачка планарных  $CO_2$ - и  $CO$ -лазеров; создание эффективных плазменных вибраторных антенн и задача передачи СВЧ-излучения в полых плазменных волноводах.

К этой же группе разработок примыкают также работы по изучению лазерного ускорения ионов при облучении мишеней в виде газовых струй и аэрогелей (**В. Д. Зворыкин**, ФИ РАН) и проведению оптимизации параметров таких мишеней для достижения максимальной эффективности и энергии ускоренных частиц (**Д. В. Торшин**, РФЯЦ-ВНИИТФ).

Были представлены работы, посвященные изучению актуальных проблем кинетики частиц в низкотемпературной плазме газовых разрядов. Здесь следует отметить работу **Е. А. Филимоновой** (ОИВТ РАН), в которой изучена максимально достижимая концентрация при удалении  $NO_x$  в реакторе на основе импульсного разряда и предложены пути повышения эксплуатационных характеристик промышленных установок для вентиляции и очистки воздуха. Эта работа открывает большую группу докладов, посвященных проблемам улучшения экологических характеристик различных технологических процессов и устройств. В докладах **А. В. Гаврикова** (ОИВТ РАН) и **В. М. Бардакова** (ИрГУ) обсуждены задачи создания плазменного сепаратора отработанного ядерного топлива, в том числе методов плазмооптической масс-сепарации, и разрабатываются под-

ходы к увеличению их эффективности. **В докладе Е. С. Бобковой** (ИГХТУ) изучена кинетика и механизмы разложения некоторых органических соединений (фенол, сульфанола и др.) в водных растворах под действием диэлектрического барьерного разряда атмосферного давления в кислороде с целью оптимизации существующих методов очистки питьевой воды и указаны пути оптимизации указанных процессов.

**В докладе С. С. Попова** (ИЯФ СО РАН) обсуждались пути совершенствования технологии нейтрализации мощных пучков отрицательных ионов изотопов водорода в задаче повышения полного КПД проектируемых термоядерных реакторов, а **в докладе В. Т. Астрелина** (ИЯФ СО РАН) представлен проект миллисекундного инжектора электронов на основе плазменного эмиттера для нагрева плазмы в линейных ловушках.

Большой интерес вызвала работа *"Свойства упрочняющих и термоустойчивых покрытий: численный эксперимент"*, представленная **Г. И. Змиевской** (ИПМ РАН), в которой исследуется широкий спектр проблем, возникающих, с одной стороны, при анализе вопросов устойчивости поверхности материалов к действию техногенных и природных факторов (изменение температуры, влажности, действие различного рода излучений и т. д.) и, в первую очередь, вопроса возникновения дефектов в виде пор и микротрещин. С другой стороны, это анализ технологий направленной модификации свойств поверхности, прежде всего, с помощью нанесения на нее различных функциональных покрытий. В основу развитой модели указанных процессов положено предположение, что зарождение пор или пузырьков пара на поверхности различных материалов начинается с флуктуационной стадии фазового перехода 1-го рода, при которой образуются центры зародышеобразования дефектов, приводящих к аморфизации поверхности. Эта концепция положена в основу модели нанесения тонких пленок из различных материалов. В качестве примера изучено нанесение упрочняющих пленок из карбида кремния. Однако совершенно очевидно, что разработанная модель может быть применена для описания перспективных в последнее время технологий синтеза пленочных структур из низкоразмерных аллотропных форм углерода (линейно-цепочечный углерод), а также композитных материалов и пленочных структур для задач энергетики, электроники, материаловедения и медицины.

Много интересных докладов было представлено на стендовых заседаниях.

**В докладе В. В. Андреева и др.** (Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, Чебоксары) представлены результаты исследования комбинированного (сдвоенного) барьерного

электрического разряда в воздухе при атмосферном давлении. Разряд создается в разрядной камере двумя парами электродов, присоединенных к двум автономным высоковольтным источникам питания. Интерес к плазмохимическим установкам такого типа обусловлен возможностью их применения в качестве генераторов озона высоких концентраций при сравнительно простых способах поддержки электрических разрядов. В результате использования комбинированного разряда можно достичь при малых напряжениях электрических полей высокой производительности озонаторов и, следовательно, повышать ресурс их работы. Исследовано влияние фазового сдвига между напряжениями, приложенными к двум контурам разряда, на синтез озона. Установлено, что существует оптимальный сдвиг фаз, при котором выход озона максимален.

**В работе Т. В. Долматова и др.** *"Регистрация мощных СВЧ-импульсов наносекундной длительности с помощью электрооптического эффекта Погкельса"* (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН) реализован способ оптической регистрации СВЧ-волны, основанный на эффекте Погкельса. Этот способ лишен недостатков, присущих полупроводниковым датчикам на горячих носителях, и обладает рядом дополнительных достоинств. Создан измеритель, позволяющий регистрировать наносекундные импульсы СВЧ-излучения в волноводе. В состав измерителя входят лазер с длиной волны излучения 1064 нм, элемент Погкельса, анализатор и приемник оптического излучения на основе ФЭУ или полупроводникового фотодиода. Произведены первые опыты по измерению СВЧ-мощности в открытом пространстве с импульсно-периодическим плазменным СВЧ-генератором в частотном диапазоне 5—20 ГГц при уровне мощности до 100 МВт.

**В докладе А. Ф. Александрова, В. В. Хвостова, О. А. Стрелецкого и др.** *"Свойства углеродных пленок, полученных распылением графитовой мишени пучком ускоренных ионов аргона"* (МГУ им. М. В. Ломоносова) предложен оригинальный метод напыления пленок в вакуумной камере с помощью источника ионов с холодным катодом, работающего на разряде постоянного тока. Пучок ионов аргона с энергией 750—1500 эВ и плотностью тока 2 мА/см<sup>2</sup> направлялся на графитовую мишень. Образовавшиеся в результате распыления мишени атомы и ионы углерода осаждались на подложки из кристаллического хлористого натрия (NaCl), кристаллической двуокиси циркония (ZrO<sub>2</sub>) и поликристаллического кремния (Si). Структура полученных пленок исследовалась с помощью рамановской спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии высокого раз-

решения, химическим методом, методами рентгеновской фотоэлектронной и туннельной спектроскопии. Исследования пленок углерода в просвечивающем электронном микроскопе показали, что пленки имеют высокоразвитую поверхность с четко выраженной конусообразной морфологией. Анализ дифракционной картины свидетельствует о поликристаллической структуре полученных углеродных пленок, а также о наличии монокристаллических фрагментов. Изучение электропроводности полученных структур показали сильную анизотропию проводимости вдоль и поперек, что свидетельствует о присутствии углеродных цепочек, ориентированных перпендикулярно подложке.

**Н. Г. Киселев и др.** (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Иркутский государственный университет) представили доклад, посвященный исследованию влияния параметров иницирующего наносекундного лазерного импульса с плотностью мощности в диапазоне  $10^7$ — $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> на процесс генерации многозарядных ионов в плазме вакуумно-искрового разряда. Цель исследования — создание малогабаритного источника ионов металлов высоких энергий. Показано, что время развития разряда определяется плотностью мощности лазерного излучения на катоде и напряжением на накопителе. Исследован процесс ионной эмиссии из плазмы микропинча в различных режимах его формирования. При работе с алюминиевым катодом максимальный заряд ионов Al составляет  $Z = +8$ . Максимальная энергия ионов при напряжении на накопителе 8 кВ составляет ~300 кэВ. Предварительные эксперименты по исследованию ионной эмиссии из плазмы разряда с катодами из тяжелых металлов показали наличие в пучке ионов тантала с зарядовым состоянием  $Ta^{+15}$  и выявили существенные отличия от динамики плазмы в разрядах с катодами из легких металлов.

**В работе А. С. Сахарова, В. А. Иванова и др.** *"Поглощение СВЧ-мощности мультипакторным разрядом на диэлектрике: теория, эксперимент и численное моделирование"* (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН) аналитически и численно исследована зависимость коэффициента поглощения мощности СВЧ-излучения односторонним мультипакторным разрядом на поверхности диэлектрика от мощности падающего излучения. С помощью численного 1D3V-моделирования показано, что учет отражения электронов от диэлектрической поверхности приводит к существенному возрастанию коэффициента поглощения СВЧ-мощности. Проведено сравнение аналитических и численных результатов с экспериментальными данными.

**В докладе А. М. Давыдова и др.** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН) пред-

ставлены экспериментальные исследования газодинамических явлений, сопутствующих процессу горения при возбуждении микроволнового поверхностного разряда (микроволновая дуга) в стехиометрической смеси газообразного метана и молекулярного кислорода ( $CH_4 + O_2$ ). Экспериментальные исследования по СВЧ-поджигу керосин—воздушных смесей показали, что "микроволновой дугой" осуществляется поджиг значительно более бедных (по содержанию топлива) смесей и с большей скоростью потока, нежели в случае применения стандартных авиационных свеч.

**В докладе А. М. Анпилова и др.** (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Российский государственный технический университет им. К. Э. Циолковского (МАТИ), Москва, Россия) приведены результаты исследования воздействия импульсно-периодического высоковольтного многоискрового разряда на этиловый спирт с инъекцией газообразного аргона (Ar) в межэлектродное пространство. Результаты исследований показали, что после обработки импульсным электрическим разрядом с энерговыделением  $E \approx 40$  Дж/см<sup>3</sup> в полученной жидкости появляются наночастицы углерода размером 1—10 нм, принадлежащие различным углеродным фазам. Показано, что наночастицы углерода, обладающие отрицательным зарядом, являются одним из переносчиков тока, причем прохождение тока существенно ускоряет процесс конгломерации и выпадение углерода из жидкой фазы. Предложенный в докладе метод позволяет получать однородные углеродные пленки на металлических поверхностях.

**В работе Н. В. Арделяна и др.** (Физический факультет МГУ, Москва, ТРИНИТИ, Троицк, Московская обл., Россия) изучено изменение величины возможного пробойного поля на высотах от поверхности Земли до мезосферы, исходя из известных значений пробойного поля на уровне земли и зависимостей давления и температуры воздуха от высоты. Проведен анализ эффективного процесса ионизации на ранних стадиях развития электрического разряда в воздухе при средних годовых температурах и давлениях на высотах 0—100 км над поверхностью Земли. В работе рассмотрены процессы ионизации во внешнем электрическом поле с учетом внешних фоновых электронов, прилипания и отлипания электронов от атомов и молекул кислорода, перезарядки и конверсии отрицательных ионов.

**В докладах К. В. Вавилина и др.** (Физический факультет МГУ, Москва) представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования новой модификации ВЧ-разряда, а именно, гибридного ВЧ-разряда, возбуждение ко-



того осуществляется как индуктивным, так и емкостным способами. Показано, что изменение внешней цепи разряда позволяет гибко управлять параметрами разряда. Выполнено сравнение параметров гибридного ВЧ-разряда с параметрами индуктивного и емкостного ВЧ-разрядов.

В целом, работа секции была успешной. Представленные доклады свидетельствуют о большом разнообразии тематик, связанных с применением плазменных и лучевых технологий. По результатам конференции можно утверждать, что заметная часть исследований проводится научными коллективами высших учебных заведений страны с привлечением молодых ученых.

На ставшую уже традиционной сессию "Проект ITER. Шаг в энергетику будущего" в этом году было представлено 28 докладов, из них 13 были доложены на двух устных заседаниях, 15 — на стендовой сессии.

Доклады первого устного заседания были посвящены системам ITER. В докладе **Л. Н. Химченко** (Проектный центр ITER) были приведены результаты экспериментального воздействия плазменных сгустков с удельной энергией 0,5—2,5 МДж/м<sup>2</sup> и длительности 0,5 мс на образцы бериллия на плазменной пушке КСПУ-Ве. Исследовался российский сорт бериллия ТПП-56ПС. Исследования показали, что бериллий при больших тепловых нагрузках проявляет те же свойства, что и материал дивертора ITER — вольфрам. Появляются трещины в бериллии, на поверхности обнаружена наноструктурированная бериллиевая пыль с характерным размером около 1 мкм, а на поверхности видны потоки и капли расплавленного металла.

**В. С. Высоцкий** (ВНИИКП) рассказал о разработке и поставке кабелей полоидального поля и проводников тороидального поля для магнитной системы ITER. В соответствии с планом поставок для ITER изготовлены и доставлены в Европу пять длин (4 медных макета и один сверхпроводящий макет) кабелей полоидального поля. Кроме того, изготовлены и испытаны два пробных проводника тороидального поля длиной около 400 м, один медный макет длиной 760 м и два сверхпроводящих проводника длиной 100 и 415 м. Тем самым, начата регулярная поставка кабелей и проводников для магнитной системы ITER в зачет материального вклада Российской Федерации в его строительство.

**А. Е. Воробьева** рассказала о проведении верификационных измерений для испытаний стрендов из сверхпроводящих сплавов ниобий—олова (Nb<sub>3</sub>Sn) и ниобий—титан (NbTi) во ВНИИНМ. Для того чтобы получить официальное признание от Международной организации ITER, ОАО "ВНИИНМ" прошло процедуру сравнительных

(референсных) испытаний Nb<sub>3</sub>Sn и NbTi стрендов на референсных образцах стренда, подготовленных в ЦЕРНе (Швейцария), в Референсной лаборатории Международной организации ITER. В ОАО "ВНИИНМ" было подготовлено необходимое для верификационных испытаний оборудование, разработаны и аттестованы методики выполнения этих испытаний, организованы испытания на регулярной основе. В докладе представлены результаты верификационных измерений образцов промышленных партий Nb<sub>3</sub>Sn от II, III и IV фаз СП 1.1.P6A.RF.01.0 и NbTi стрендов от II и III фаз СП 1.1.P6C.RF.01, которые были изготовлены на ОАО "ЧМЗ", а затем хромированы (Nb<sub>3</sub>Sn) и никелированы (NbTi) в ОАО "ВНИИКП". Проведенный анализ полученных данных подтверждает соответствие характеристик изготовленных стрендов требованиям СП 1.1.P6A.RF.01.0 и 1.1.P6C.RF.01.

**И. Б. Семенов** (Проектный центр ITER) сообщил об организации системы сбора больших информационных потоков для диагностических подсистем установки ITER.

Все доклады второго устного заседания были посвящены диагностическим системам ITER. При этом много внимания было уделено текущим проблемам и трудностям на этапе конкретного проектирования и размещения диагностик в ITER.

**Е. Е. Мухин** (ФТИ РАН) в докладе, посвященном диагностике томсоновского рассеяния (ТР) плазмы в диверторе ITER, подчеркнул, что работа этой диагностики в диверторе ITER будет проходить в крайне неблагоприятных условиях: высокой радиационной нагрузке на оптические элементы, загрязнении оптических элементов продуктами эрозии первой стенки в виде пылевых и пленочных осадений. Дополнительные трудности в реализации диагностики связаны с ограниченным доступом к плазме и интенсивностью сигнала ТР, зачастую более слабого, чем интенсивность фонового излучения, которое включает линейчатый и непрерывный спектры излучения плазмы, а также излучение нагретых объектов.

**С. Н. Тугаринов** в докладе "*Современное состояние исследований по проблеме первого зеркала для оптических диагностик ITER*" (ТРИНИТИ) выделил основные результаты данной тематики на текущий момент. Это вывод о доминировании процессов осаждения материалов первой стенки на поверхность первого зеркала над эрозией во всех диагностических портах; выбор монокристаллического молибдена в качестве основного кандидатного материала первого зеркала для верхних и экваториальных портов ITER; экспериментальное подтверждение эффективности различных систем защиты зеркал, включая диафраг-

мирование светового потока, развитие поверхности диагностических каналов, использование подвижных шторок и систем очистки зеркал за счет физического распыления поверхности.

**К. Ю. Вуколовым** (НИЦ "Курчатовский институт") был представлен общий обзор работ по диагностическим системам, проводящимся в Российской Федерации (активная спектроскопия, рефлектометрия плазмы со стороны сильного магнитного поля, спектроскопия водородных линий, анализаторы атомов перезарядки, нейтронные диагностики, томсоновское рассеяние в диверторе и лазерная флуоресценция). Основные проблемы связаны с выбором элементов и материалов, которые позволят обеспечить надежную эксплуатацию диагностической аппаратуры в условиях ITER на D—T-стадии: длительность "импульса" до 1000 с, поток нейтронов на стенку на уровне  $10^{14}$  н/(см<sup>2</sup>с), магнитные поля в месте размещения детекторов до 2 Тл.

**Д. А. Шелухин в докладе "Развитие диагностики рефлектометрии со стороны сильного магнитного поля для установки ITER"** (НИЦ "Курчатовский институт") рассказал о создании макетов СВЧ-генераторов и схем предварительной обработки сигналов, собранных и испытанных на стенде рефлектометрии ITER и установке T-10. Для макетов применялись гетеродинная схема с усилением сигнала на промежуточной частоте, квадратурная схема анализа сигнала и сбор данных с помощью 10-разрядного АЦП с тактовой частотой до 1 ГГц. Была разработана и изготовлена плата управления генератором, включающая 400 МГц 16-битный ЦАП, формирователь промежуточной частоты, умножитель/сдвигатель частоты. Создан и испытан универсальный источник питания для СВЧ-генераторов.

Был заслушан доклад **А. Г. Алексеева «Статус диагностики "Спектроскопия водородных линий" для ITER»** (НИЦ "Курчатовский институт").

**А. Б. Кукушкин в докладе "Теоретические проблемы спектроскопических H $\alpha$ -измерений высокого разрешения в ITER"** (НИЦ "Курчатовский институт") подчеркнул успехи текущего этапа исследований в формулировке обратной задачи для оценки точности измерения отношения концентраций трития и дейтерия и измерения полной плотности нейтралов в плазме по данным спектроскопических H $\alpha$ -измерений высокого разрешения и для ряда других линий наблюдения в ITER.

В последнем на сессии докладе **А. В. Горбунова "Методика лазерной флуоресценции для диагностики плазмы в гелиевых разрядах ITER"** (НИЦ "Курчатовский институт") была представлена детальная расчетная информация о параметрах гелиевых разрядов, позволившая провести анализ

новой задачи — изучения возможности применения методики лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) с использованием диагностики иона гелия He<sup>+</sup>. Была предложена спектроскопическая схема ЛИФ, удовлетворяющая требованию проведения измерений на ITER. Использовались значения параметра  $\lambda_L = 320$  нм и параметра  $\lambda_{FLU} = 1012$  нм. Таким образом, выполнено условие  $\lambda_L \neq \lambda_{FLU}$ , что позволяет избежать влияния "паразитного" лазерного излучения. Выбор линии флуоресценции в ближнем инфракрасном диапазоне имеет в данном случае преимущество, так как возможно применение лавинных фотодиодов, имеющих высокий квантовый выход (например, Hamamatsu Si APD S8890 series, характеристики которого использованы при проведении расчетов сигналов флуоресценции).

На стендовой сессии были представлены доклады касающиеся, в основном, диагностических систем ITER, за создание которых в международном проекте отвечает Россия. Обсуждались как физические, так и конструкторские вопросы нейтронной диагностики, активной спектроскопии, спектроскопии водородных линий, томсоновского рассеяния, рефлектометрии со стороны высокого поля.

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

## Выводы

В целом, следует отметить, что "XXXIX 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. На основании изложенного материала и дискуссий на конференции можно сделать следующие выводы.

1. 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 в 2012 г. проходила уже в 39-й раз и собрала на свои заседания значительное количество участников из научных центров России и других стран. Число как российских, так и иностранных организаций, представивших доклады на конференцию, остается стабильно на высоком уровне.

2. Развиваются исследования и опытно-конструкторские работы в России, выполняемые в рамках международного проекта ITER.

3. 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. Физический износ установок и отсутствие современных научных приборов и оборудования, используемых в экспериментах, а также недостаточное финансирование научных институтов являются факторами, сильно тормозящими проведение исследований в перспективных областях физики плазмы. При сохранении этих негативных тенденций в ближайшем будущем Россия попадает в положение аутсайдера в области научных исследований по физике горячей плазмы на долгие годы.

4. Растет число работ, посвященных прикладным исследованиям в области физики плазмы, растет интерес к этим научным исследованиям среди молодежи, принявшей участие в работе конференции. Однако участники конференции отмечали значительные трудности, возникающие при внедрении результатов научных исследований в области создания новых материалов и применения новых технологий.

5. Остается заметным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными в ведущих научных центрах Европы, Японии 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.

6. Организационному комитету Звенигородской конференции пришлось столкнуться с трудностями, связанными с финансированием 39-й конференции, что отражает, по-видимому, перманентные кризисные явления в экономике России.

Обзор подготовлен в рамках работ по Программе Президиума РАН "Фундаментальные процессы в высокотемпературной плазме с магнитной термоизоляцией".

#### Литература

1. Тезисы докладов XXXIX Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. г. Звенигород, 6—10 февраля 2012 г. — М.: ЗАО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН", 2012.
2. [http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXIX/Zven\\_XXXIX.html#offer](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXIX/Zven_XXXIX.html#offer)

## New results from applied and basic research in plasma physics and controlled fusion in Russia in 2011

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

General Physics Institute named after A. M. Prokhorov of the Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov str., Moscow, 199911, Russia  
E-mail: [ivanov@fpl.gpi.ru](mailto:ivanov@fpl.gpi.ru)

*The article provides a review of the most interesting results presented at the annual XXXIX International (Zvenigorod) Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion held from 6 to 10 February 2012 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 July 16, 2012*