

# Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.9

## Прикладные и фундаментальные исследования по физике плазмы и УТС

(по материалам XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции  
по физике плазмы и УТС, февраль 2011 г.)

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

*Представлен обзор основных результатов и проведен анализ главных направлений исследований, представленных в докладах на ежегодной XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу.*

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

*Ключевые слова:* плазма, конференция, прикладные исследования, управляемый термоядерный синтез.

### Введение

Очередная ежегодная XXXVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде Московской обл. с 14 по 18 февраля 2011 г.

На конференции был представлен 391 научный доклад\* из 84 российских и 27 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее число авторов докладов составило около 1000 чел.

Организаторы конференции: 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.

**Гришина Ирина Анатольевна**, старший научный сотрудник.

**Иванов Вячеслав Алексеевич**, зав. отделом.

**Коврижных Лев Михайлович**, зав. отделом.

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

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

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

Статья поступила в редакцию 1 июля 2011 г.

© Гришина И. А., Иванов В. А., Коврижных Л. М., 2011

Финансовая поддержка конференции: Российский фонд фундаментальных исследований; Российская академия наук и ЗАО «Научно-технологический центр «ПЛАЗМАИОФАН»».

На конференции были заслушаны доклады по четырем направлениям физики плазмы и УТС:

1. Магнитное удержание высокотемпературной плазмы.
2. Инерциальный термоядерный синтез.
3. Физические процессы в низкотемпературной плазме.
4. Физические основы плазменных и лучевых технологий.

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

1. Национальный инновационный центр "Курчатовский институт", Москва — 52.
2. Объединенный институт высоких температур РАН, Москва — 43.
3. Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва — 38.
4. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва — 31.
5. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Троицк, Московская обл. — 28.
6. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург — 24.
7. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск — 19.
8. Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Москва — 20.

\* Тезисы докладов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород, 14—18 февраля 2011 г.

9. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва — 19.
10. Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Московская обл. — 17.
11. Российский университет дружбы народов, Москва — 13.
12. Казанский государственный технологический университет, г. Казань — 11.
13. ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", С.-Петербург — 11.
14. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва — 10.
15. Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород — 10.
16. Национальный исследовательский ядерный университет "Московский инженерно-физический институт", Москва — 10.
17. Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск — 9.
18. Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева, г. Казань — 8.
19. Российский федеральный ядерный центр "Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров — 6.
20. Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново — 6.
21. ФГУ "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов", г. Троицк, Московская обл. — 5.
22. Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург — 5.
23. Дагестанский государственный университет, г. Махачкала — 4.
24. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Москва — 4.
25. Институт динамики геосфер РАН, Москва — 4.
26. Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, г. Саранск — 4.
27. Агентство ИТЭР, Москва — 4.
28. ФГУП "Московский радиотехнический институт РАН", Москва — 3.
29. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва — 3.
30. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск — 3.
31. Институт океанологии РАН им. П. П. Ширшова, Москва — 3.
32. ФГОУ ВПО "Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова", г. Чебоксары — 3.
33. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, Москва — 2.
34. Костромской госуниверситет им. Н. А. Некрасова, г. Кострома — 2.
35. Камская государственная инженерно-экономическая академия, г. Набережные Челны — 2.
36. Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск — 2.
37. Московский авиационный институт (государственный технический университет), Москва — 2.
38. НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва — 2.
39. Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск — 2.
40. Институт астрономии РАН, Москва — 2.
41. Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, Москва — 2.
42. Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск — 2.
43. Институт химии растворов РАН, г. Иваново — 2.
44. Московский энергетический институт (технический университет), Москва — 2.
45. Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН, г. Черноголовка — 2.
46. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН, г. Троицк, Московская обл. — 2.
47. Томский политехнический университет, г. Томск — 2.
48. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН, г. Казань — 2.
49. Институт математического моделирования РАН, Москва — 1.
50. ФГУП "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова", С.-Петербург — 1.
51. Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва — 1.
52. Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск — 1.
53. Институт механики МГУ им. Ломоносова, Москва — 1.
54. Казанский государственный университет, г. Казань — 1.
55. Институт неорганических материалов им. А. А. Бочвара, Москва — 1.
56. НПП "Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики", Москва — 1.
57. Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина, Москва — 1.
58. Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск — 1.
59. Институт молекулярной генетики РАН, Москва — 1.
60. Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск — 1.
61. Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург — 1.

62. ЗАО "ЛИТ", Москва — 1.
63. Московский технический университет связи и информатики, Москва — 1.
64. ФГУП "НИИ прикладной акустики", г. Дубна, Московская обл. — 1.
65. Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл. — 1.
66. Поморский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Архангельск — 1.
67. ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова", Москва — 1.
68. ЗАО «Научно-производственное предприятие "ГИКОМ"», г. Нижний Новгород — 1.
69. ЗАО «СКБ "ЗЕНИТ"», г. Зеленоград, Московская обл. — 1.
70. Институт космических исследований РАН, Москва — 1.
71. Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва — 1.
72. Институт ядерных исследований РАН, Москва — 1.
73. Казанский (Приволжский) Федеральный университет, г. Казань — 1.
74. Карельская государственная педагогическая академия, г. Петрозаводск — 1.
75. ФГУП "Красная Звезда", Москва — 1.
76. Объединение "КОНСИСТ", Москва — 1.
77. ОАО "Криогенмаш", г. Балашиха, Московская обл. — 1.
78. ООО КриоТрэйд, Москва — 1.
79. Российский государственный технический университет им. К. Э. Циолковского (МАТИ), Москва — 1.
80. Московский государственный университет леса, г. Мытищи, Московская обл. — 1.
81. Московский государственный университет технологий и управления, Москва — 1.
82. Новосибирский филиал института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, г. Новосибирск — 1.
83. Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина, Москва — 1.
84. УТС-центр, Москва — 1.
5. Институт физики плазмы, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины, г. Харьков, Украина — 3.
6. JET, European Fusion Development Agreement, Culham Science Centre, Abingdon, Oxfordshire, United Kingdom — 2.
7. Научно-исследовательский институт прикладной физики Национального университета Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан — 2.
8. Кыргызско-Российский Славянский Университет, г. Бишкек, Кыргызская Республика — 2.
9. Николаевский государственный университет им. В. А. Сухомлинского, г. Николаев, Украина — 2.
10. Institut für Plasmaphysik, Forschungszentrum Jülich GmbH, EURATOM Association, Trilateral Euregio Cluster, Jülich, Germany — 1.
11. Университет А. Пуанкаре, Нанси, Франция — 1.
12. Исследовательский центр Грама, Грама, Франция — 1.
13. LAPLACE CNRS, Toulouse, France — 1.
14. Институт нейтронной физики и реакторных технологий, Карлсруэ, Германия — 1.
15. Лаборатория физики плазмы ERM/KMC, Брюссель, Бельгия — 1.
16. Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза, Варшава, Польша — 1.
17. Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова, Национальная академия наук Украины, Киев, Украина — 1.
18. Институт Экспериментальной и Теоретической Физики, г. Алматы, Казахстан — 1.
19. Centre de Physique Theorique, CNRS, Ecole Polytechnique, Palaiseau Cedex, France — 1.
20. Ecole Polytechnique, Palaiseau Cedex, France — 1.
21. Laboratoire Physique Gaz et Plasmas CNRS — Université Paris-Sud 11, Orsay, France — 1.
22. Princeton University, Princeton, USA — 1.
23. Лаборатория физики плазмы, Королевская Военная Академия, Ассоциация ЕВРОАТОМ-Бельгия, Брюссель, Бельгия — 1.
24. Университет науки и технологии, г. Оран, Алжир — 1.
25. Университет Оттавы, Оттава, Канада — 1.
26. Университет Тель-Авива, Лаборатория электрических разрядов и плазмы, Тель-Авив, Израиль — 1.
27. Эйндховенский технологический университет, Эйндховен, Нидерланды — 1.

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

1. ITER Organization, Cadarache, France — 5.
2. Университет Альберты, Эдмонтон, Канада — 4.
3. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь — 3.
4. Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины, г. Харьков, Украина — 3.

В рамках конференции работала сессия по проблемам ИТЭР, а также состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 20 обзорных докладов об отечественных и мировых результатах исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза,

плазменным и лучевым технологиям. Этим же направлениям исследований были посвящены соответствующие секции, на которых обсуждались 76 устных и 295 стендовых доклада.

### **Актуальные направления развития исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу в 2010 г.**

Конференция традиционно открылась обзорными докладами, представленными от коллективов крупнейших научных центров России, Европы и Америки. Обзорные доклады по существу подводили итоги работ, проведенных за последний год по физике 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.

Анализ состояния экспериментальных работ по токамакам с учетом тенденций развития термоядерных исследований и ядерной энергетики в мире был дан в докладе **Э. А. Азизова** "Работы по УТС с магнитным удержанием в России в 2011—2020 гг." (НИЦ "Курчатовский институт"). Отмечалось, что российская программа исследований по УТС прежде всего должна поддерживать стратегическое направление — "чистую" термоядерную энергетику. Вместе с этим, на основе прогресса в термоядерных исследованиях необходимо развивать гибридные (синтез-деление) системы для решения задач ядерной энергетики XXI века. Участники конференции были ознакомлены с предложениями по развитию научно-технологической базы термоядерной энергетики России до 2020 г., разработанными НИЦ "Курчатовский институт" совместно с ГК "Росатом". Наиболее актуальной задачей, обозначенной в этих предложениях, было создание современного токамака Т-15МД в НИЦ "КИ" и модернизация токамака Глобус-М, успешно работающего во ФТИ РАН. Отмечалось, что токамак Т-15МД должен стать базой не только для поддержки программы ИТЭР, но и водородным прототипом источника термоядерных нейтронов (ТИН). К 2020 г. планируется не только проведение исследований в квазистационарном режиме плазмы с реакторными параметрами, но и создание демонстрационного ТИН с соответствующей стационарной технологией.

Обзор состояния исследований по инерциальному термоядерному синтезу в мире был дан в докладе **В. П. Смирнова** "Инерционное удержание: статус, путь к энергетике" (ОИВТ РАН). Отмечалось, что современный этап развития исследований по инерционному удержанию характеризуется завершением строительства в США круп-

ных установок по лазерному синтезу и Z-пинчам. Энергетика этих установок, по ожиданиям, достаточна для зажигания мишени с  $Q > 10$  (NIF) или для проведения экспериментов вблизи зажигания (ZR). Именно поэтому исследования вступают в критическую фазу, когда переход на новый уровень мощности позволяет проверить физические и технические основы, заложенные в проекты. В Европе, России и Китае также идет подготовка проектов и кое-где начато строительство масштабных установок по лазерному и Z-пинчевому синтезу. В докладе были рассмотрены наиболее существенные результаты исследований, известные к настоящему времени, их направления и содержание национальных программ. Приоритет в докладе был отдан материалам по пинчам. Обсуждались энергетические возможности инерционного удержания с точки зрения практической реализуемости. В этой связи и в лазерном, и в пинчевом подходах идет активный поиск новых схем использования повторяющихся взрывов мишени. Кратко затронуты были схемы гибридных реакторов, наиболее часто упоминаемые в литературе.

Объединенный европейский токамак JET является крупнейшим действующим токамаком в мире и единственным токамаком, где возможна работа в режимах с тритием и бериллием. Параметры установки позволяют проводить эксперименты, в которых могут быть смоделированы в уменьшенном масштабе процессы, которые будут происходить на строящемся токамаке ИТЭР. Доклад **Франческо Романелли** "The Role of JET in the ITER Preparation" (JET Facility, Culham, UK) был посвящен итогам работ, проводимых на JET в течение последних трех лет и направленных на существенную модернизацию установки. В качестве материала первой стенки камеры был использован бериллий, а поверхность дивертора покрыта вольфрамом. Именно такую комбинацию материалов предполагается использовать в рабочих режимах ИТЭР. Мощность пучка нейтральной инжекции повышена с 20 МВт в коротком импульсе до 30 МВт в удлиненном импульсе (~20 с). Система ЭЦР-нагрева и система удержания плазмы были модернизированы и уже протестированы во время экспериментальной кампании 2009 г. Диагностический комплекс JET также был значительно улучшен. Результаты работы последних трех лет будут протестированы в рабочих режимах JET в течение ближайших нескольких лет. А в 2015 г. планируется экспериментальная сессия с использованием дейтерия и трития в качестве рабочего вещества. Эти эксперименты позволят воссоздать режимы, в которых должно будет работать оборудование, и элементы конструкции ИТЭР, максимально приближенные к ожидаемым.

**Доклад Л. Н. Химченко и А. В. Красильникова** "Первая стенка и дивертор-критическая проблема при создании ИТЭР" (Учреждение Госкорпорации Росатом "Проектный центр ИТЭР") был посвящен ключевым проблемам взаимодействия "плазма — стенка", начиная с конструкции первой стенки и дивертора и выбора материалов, описания физических явлений, влияющих на этот выбор, и заканчивая достижениями в этой области, которые ожидаются в годы, предшествующие получению первой плазмы на ИТЭР. Отмечалось, что материалы, соприкасающиеся с плазмой, должны выдерживать импульсные нагрузки, энергия которых несопоставима с нагрузками на существующих плазменных установках, но при этом должны иметь достаточный ресурс, чтобы избежать частой замены компонентов. Учитывая низкую степень выгорания трития, на ИТЭР придется организовать эффективный оборот откачанного трития в системе подпитки топливом, обеспечивая одновременно поглощение дорогого трития в камере на очень низком уровне. Кроме того, материалы должны устойчиво работать одновременно в нейтронных потоках и при больших импульсных тепловых плазменных нагрузках. Уровень проработки этих задач показывает, что взаимодействие плазмы с материалами в ИТЭР является ключевой проблемой при достижении условий зажигания и поддержания термоядерной реакции в течение сотен секунд или больше. Решение ряда проблем ИТЭР, таких как оценка удельной энергии, поглощаемой материалами стенки, соприкасающимися с плазмой, на стационарной стадии разряда, во время ЭЛМ и срывов, оценка "времени жизни" этих материалов, миграция распыленного материала по камере, поглощение трития в материалах и продуктах эрозии, создание методов очистки камеры от трития, образования пыли — все это находится за пределами возможностей и опыта современных токамаков. Однако стратегия движения к успеху состоит в том, что ИТЭР как экспериментальная установка будет иметь достаточную гибкость в выборе материалов, учитывая результаты их испытаний вне и внутри ИТЭР, а также в ходе принятия решений по управлению физическими процессами в пристеночной плазме. По мере накопления данных во время работы ИТЭР возможны изменения в конструкции отдельных систем дивертора и первой стенки.

Пленарный доклад **В. Н. Лукаша** "Космологическая Стандартная Модель (далее СМ) и ее экстраполяция в прошлое" (ФИАН) был посвящен обзору имеющихся представлений о процессах, приведших к образованию наблюдаемой структуры Вселенной. Одна из основных позиций доклада состояла в утверждении о необходимости включе-

ния в модель инфляционной стадии. Такая необходимость, по мнению автора, следует не только из размерных соображений, но и из того факта, что задание начальных условий на инфляционной стадии естественным образом приводит к формированию квазиаббловского потока в пределах наблюдаемой части Вселенной. Согласно модели инфляция+ОТО+СМ, основным механизмом, отвечающим за возникновение как массивных, так и безмассовых полей, можно считать их рождение из вакуума гравитационными полями. Происхождение темной материи, по одной из гипотез, может быть связано с барионной асимметрией и нарушением СР-четности при сильных взаимодействиях. Однако этот вопрос, наряду с вопросом о происхождении темной энергии, возможно, родственной полю, ответственному за инфляцию, пока выходит за рамки СМ физики высоких энергий.

Анализ экспериментальных результатов, полученных на установке JET в 2010 г., был представлен в докладе **Дж. Онгена** (Лаборатория физики плазмы ERM/KMC, Брюссель, Бельгия; JET Facility, Culham, UK). Отмечалось, что эксперименты на JET имели своей целью в основном выработку рекомендаций по оптимизации рабочих сценариев ИТЭР и принятию решений относительно конструкции его элементов. Были получены интересные результаты, среди которых хотелось бы далее отметить следующие позиции:

(i). Получен H-режим при токе омического нагрева 4,5 МА.

(ii). При одновременном нагреве (NBI + ICRF) удержание плазмы в H-режиме не зависело от соотношения мощностей систем нагрева. Этот гибридный сценарий был осуществлен при высокой треугольности и длительности импульса нагрева, сопоставимой с резистивным временем.

(iii). Сценарий с оптимизированным широм также был отработан, при одновременном достижении стационарных условий для всех других параметров ИТЭР.

(iv). Был продемонстрирован эффективный контроль пилообразных колебаний с помощью быстрых ионов, создаваемых при ICRF-нагреве.

(v). Исследования по ELM-контролю с использованием внешних возмущений магнитного поля с  $n = 1$  и  $m = 2$  показали резонансное подавление ELM-частот для некоторых значений  $q_{95}$ . Полное подавление ELM, однако, не наблюдалось, даже с параметром Чирикова больше 1.

(vi). Было показано, что для создания ELM пеллеты должны быть достаточно большими и быстрыми, чтобы достигнуть верхней части пьедестала.

(vii). При исследовании срыва плазмы было показано, что интенсивный напуск газа ведет к тому,

что радиационные потери на стадии до срыва могут составить до 50 % тепловой энергии, а во время срыва — 20 %. Halo-токи могут быть уменьшены на 60 % при использовании смеси аргон—дейтерий или неон—дейтерий, и при этом можно избежать образования убегающих электронов.

(viii). Во время экспериментальной кампании, посвященной ICRH-антенне ИТЭР были достигнуты следующие результаты: протестированы системы контроля и настройки антенны, проверена ELM-устойчивость системы, опробован новый метод регистрации искрений в антенне, опробованы режимы ее эксплуатации при высокой плотности RF-мощности ( $6,2 \text{ МВт/м}^2$ ) и высоком напряжении на антенне ( $> 40 \text{ кВ}$ ). Результаты измерений параметров антенны находятся в очень хорошем согласии с результатами моделирования при помощи кода TOPICA.

В докладе **С. В. Мирнова** "Имеют ли сферические токамаки термоядерное будущее?" (ТРИНИТИ) был дан критический обзор некоторых ключевых экспериментальных результатов, полученных на современных сферических токамаках ( $R/a < 1,5$ ). В свете его оценивался ряд концептуальных проектов УТС-реакторов на основе подобных систем. В частности, обращалось внимание на то, что принятые в некоторых из них предельные тороидальные токи иногда в несколько раз превышают те, которые следуют из простейшего закона подобия, полученного на основе имеющихся экспериментальных фактов. А именно,  $J_{p\text{max}} = 1,55 \pm 0,1 \varepsilon a B_0 (1,17 - 0,65\varepsilon)/(1 - \varepsilon^2)^2$  [в единицах МА], где  $a$  — малый радиус [м],  $B_0$  — тороидальное поле [Тл],  $\varepsilon = a/R$ . Анализировались причины таких завышений и их возможные последствия. Обсуждалась экспериментальная программа физических исследований, которую необходимо было бы реализовать в опытах на будущих сферических токамаках, чтобы стало возможным рассматривать их в качестве реальных претендентов на роль реактора УТС или термоядерного источника нейтронов.

В докладе **В. К. Гусева**, представляющего коллектив сотрудников ФТИ РАН, "Исследование воздействия пучков частиц и ЭМ-волн на плазму сферического токамака Глобус-М" обсуждались результаты исследований по взаимодействию пучков частиц и ВЧ-волн с различной энергией и частотой с плазмой сферического токамака Глобус-М. Были приведены данные экспериментов по вводу топлива с помощью водородной плазменной пушки. Пушка с улучшенными параметрами генерировала струю плазмы с плотностью до  $3 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$  и энергией частиц до 300 эВ. Было показано, что существуют режимы инжекции, в которых струя слабо возмущает плазму, но инжектирует замет-

ное количество частиц в центральную зону плазменного шнура. Обсуждались результаты экспериментов по нагреву плазмы с помощью инжекции пучка атомов высокой энергии до 30 кэВ. Было показано, что даже при относительно высоком уровне потерь быстрых частиц удается эффективно использовать инжекцию нейтралов для достижения режима с "перегретыми" ионами ( $T_i > T_e$ ) при значении  $T_i$  около 1 кэВ. Обсуждались полученные новые режимы нагрева плазмы с ранней инжекцией пучка атомов высокой энергии и быстрым ростом тока, в которых формируются широкие профили электронной температуры ( $T_{\text{max}}/ \langle T \rangle \sim 1,6$ ). Отмечалось, что численное моделирование с использованием профилей лазерного рассеяния показывает провал коэффициента электронной температуропроводности на радиусе  $r/a \sim 0,6$ , что связывается с формированием внутреннего транспортного барьера.

Электронный циклотронный (ЭЦ) нагрев плазмы хорошо зарекомендовал себя в экспериментах на стеллараторах и токамаках. В токамаке-реакторе ITER также планируется использование ЭЦ-нагрева, в частности, для подавления неоклассической тиринг-моды. Согласно современным представлениям, распространение ЭЦ-волн и их поглощение в плазме хорошо описываются в рамках линейной теории и являются детально предсказуемыми. Вместе с тем в последнее время накопилась критическая масса наблюдений явлений, не укладывающихся в рамки линейной теории. В первую очередь, к ним относится так называемый нелокальный электронный транспорт, состоящий в быстром изменении температуры электронов вдали от области ЭЦР-нагрева и наблюдаемый как при подаче СВЧ-импульса, так и при воздействии на плазму в стационарной фазе нагрева. Другим аномальным эффектом является ускорение и нагрев ионов и формирование хвоста на ионной функции распределения. Наконец, наиболее ярким эффектом является обнаруженное в прошлом году на токамаке TEXTOR индуцированное рассеяние греющего излучения. В докладе **А. Ю. Попова и Е. З. Гусакова** "Аномальные явления при ЭЦР-нагреве плазмы в тороидальных ловушках и низкороговые параметрические распадные неустойчивости" (ФТИ РАН) был сделан обзор аномальных эффектов, наблюдавшихся в токамаках T-10, TCV, TEXTOR и на стеллараторах TJ-II, LHD. Было предложено их объяснение, связанное с возбуждением низкороговых распадных параметрических неустойчивостей индуцированного рассеяния назад. Обсуждалась возможная роль процессов индуцированного рассеяния в энергобалансе при ЭЦР-нагреве в современных установках и на ИТЭР. Были предложены способы подав-

ления неустойчивости как за счет выбора геометрии эксперимента, так и с помощью модуляции волны накачки.

Процессы, влияющие на формирование тепловых спектров нейтронных звезд, регистрируемых телескопами, рассматривались в **докладе А. Ю. Потехина "Плазма в оболочках нейтронных звезд и их тепловое излучение"** (ФТИ РАН). Как отмечалось в докладе, нейтронные звезды можно рассматривать как природные лаборатории для изучения вещества в экстремальных физических условиях. В ядре нейтронной звезды плотность вещества достигает  $10^{15}$  г/см<sup>3</sup> и выше, а температура — сотен миллионов градусов Кельвина. Ядро окружено корой, представляющей собой кулоновский кристалл, снаружи от которой находится океан, состоящий из кулоновской жидкости, и атмосфера. Спектры теплового электромагнитного излучения нейтронных звезд формируются в самых внешних оболочках, как правило, в слабо вырожденных атмосферах с температурами порядка  $10^6$  К. Было подчеркнуто, что объяснение результатов современных наблюдений теплового излучения нейтронных звезд, получаемых при помощи рентгеновских и оптических телескопов нового поколения, требует лучшего понимания формирования этого излучения. В докладе было освещено современное состояние теории вещества в оболочках изолированных нейтронных звезд и формирование их тепловых спектров. Был дан краткий обзор имеющихся моделей теплоизолирующих оболочек и атмосфер нейтронных звезд. Наибольшее внимание было уделено случаю, когда магнитное поле в оболочках является квантующим для электронов. Рассмотрена зависимость характерных особенностей спектров теплового излучения от физических параметров звезды, в особенности, от величины магнитного поля на поверхности. Кратко обсуждались актуальные проблемы, связанные с интерпретацией наблюдений теплового излучения изолированных нейтронных звезд.

Большой интерес вызвал **доклад И. М. и А. И. Подгорных "Нагревание и удержание высокотемпературной плазмы в солнечной короне"** (ИНАСАН, ФИАН). В докладе были представлены известные к настоящему времени сведения о солнечных вспышках. Отмечалось, что солнечная вспышка представляет собой универсальное явление, происходящее на многих звездах. Вспышка возникает в короне, где температура водородной плазмы составляет  $\sim 100$  эВ, а концентрация плазмы  $\sim 10^8$  см<sup>-3</sup>. Выделяемая при мощной вспышке энергия превосходит  $10^{32}$  эрг. Длительность существования горячего плазменного образования составляет около 10 мин при концентрации  $\sim 10^{11}$  см<sup>-3</sup> и температуре  $\sim 3$  кэВ. Полное число удерживаемых

магнитным полем частиц около  $10^{39}$ . Эти данные были получены в рентгеновских измерениях на борту космических аппаратов. Были представлены результаты численного трехмерного МГД-моделирования предвспышечного состояния, которое показало, что энергия для вспышки медленно (2—3 сут) запасается в магнитном поле токового слоя, который образуется при фокусировке возмущений в окрестности особой линии магнитного поля над активной областью фотосферы. Поле активной области создается магнитными пятнами (солнечными пятнами) различной полярности. Величина поля в пятнах достигает 3000 Гс. Мощные вспышки возникают, когда магнитный поток активной области возрастает до  $10^{22}$  Мкс. Помимо образования облака горячей плазмы, вспышка сопровождается выбросом вещества со сверхзвуковой скоростью и ускорением протонов. Релятивистские протоны, приходящие к Земле вдоль линий межпланетного поля, имеют экспоненциальный спектр. Анализ спектра релятивистских протонов показал, что их ускорение в токовом слое происходит под действием силы Лоренца, направленной вдоль особой линии магнитного поля в токовом слое.

**Доклад "Фазовые превращения в водороде при мегабарных давлениях", представленный А. Л. Хомкиным от имени коллектива авторов** (ОИВТ РАН, ИПМ РАН), был посвящен исследованию поведения водорода при мегабарных давлениях. Отмечалось, что эта проблема является одной из главных в физике высоких давлений, физике планет и астрофизике. Измерения температуры плавления при рекордно высоких давлениях ( $\sim 300$ — $400$  ГПа) в алмазных наковальнях и обнаружение диссоциации в плотных молекулярных газах при ударно-волновом воздействии позволили получить новые представления о фазовом состоянии водорода. Оказалось, что температура плавления водорода при давлениях  $\sim 100$  ГПа достигает максимума  $\sim 900$  К и затем при дальнейшем росте давления уменьшается до нулевых значений. Наличие заметной диссоциации при давлениях 30—150 ГПа и температурах (5—8) кК не укладывается в рамки традиционного термического механизма, поскольку энергии диссоциации молекул (5—7 эВ) велики по сравнению с температурой. Для описания этих особенностей плавления и диссоциации авторами была использована модель электронейтральных ячеек Вигнера—Зейтца. Для расчета кривой плавления была найдена полная энергия электрона в ячейке с учетом всех взаимодействий, а также вклад вырожденных протонов, дающий основную температурную зависимость. На основе развитой модели была найдена область перехода в диссоциированное состояние и рассчитана кривая плав-

ления, где температура плавления спадает с ростом давления. Показано, что переход в диссоциированное состояние имеет характер фазового перехода первого рода, а именно, молекулярный флюид превращается в атомарную жидкость. Найдены критические параметры перехода:  $P_c = 72$  ГПа,  $T_c = 10\,500$  К,  $\rho_c = 0,5$  г/см<sup>3</sup>. Обнаружена возможность метастабильного существования атомарной жидкости водорода в диссоциирующем молекулярном флюиде при разгрузке давления. Отмечалось, что полученные результаты согласуются с имеющимися данными физических и численных экспериментов.

**А. Д. Беклемишев в докладе «Проект открытой ловушки нового поколения в ИЯФ "Ловушка с турбулентными пробками"»** (ИЯФ СО РАН) ознакомил участников конференции с проектом новой установки, которую предполагается создать в ИЯФ СО РАН. Отмечалось, что на действующих в институте открытых ловушках ГОЛ-3 (многопробочная ловушка) и ГДЛ (пробкотрон) за последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс. В настоящее время обе установки ИЯФ достигли своих исходных целей, и необходимо сделать следующий шаг. Этот шаг должен быть общим для двух направлений исследований как из-за недостатка ресурсов, так и по причине естественной конвергенции обеих программ. Оказалось, что центральный пробкотрон с "плещущимися" ионами и большим  $\beta$  идеально подходит в качестве активной зоны с термоядерными реакциями, но имеет слабое место – плохое продольное удержание. Многопробочные системы, хотя и не обладают достаточным объемом плазмы и пределом по  $\beta$ , но замечательно подавляют продольные потери и допускают нагрев с помощью электронных пучков — дешевой альтернативы атомарному нагреву. Эти качества естественно дополняют друг друга. Поэтому решено создать ловушку в виде большого пробкотрона (типа ГДЛ) с многопробочными участками по краям для подавления продольных потерь. Нагрев плазмы будет осуществляться как атомарной инъекцией, так и двухсторонней инъекцией электронных пучков из расширителей вдоль магнитного поля. Предполагаемые параметры создаваемой установки: длина центрального пробкотрона — 10 м, радиус плазмы — 10 см, плотность  $\sim 3 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup>, средняя энергия ионов — 20 кэВ, электронная температура  $> 400$  эВ, время разряда  $\sim 1$  с, мощность нагрева — по 10 МВт в атомарных и электронных пучках.

Вопросам, связанным с применимостью понятия "амбиполярная диффузия", был посвящен доклад **Л. Д. Цендина и А. А. Кудрявцева "Когда в плазме бывает амбиполярная диффузия?"**. В докладе подчеркивалось, что свойство амбипо-

лярности (т. е. возможность описания эволюции с помощью линейного уравнения, следующего из условия  $\vec{j}_e = \vec{j}_i$ ) имеет весьма специальный характер и является следствием того, что в простой плазме с постоянными подвижностями и в отсутствие магнитного поля точно компенсируется ряд нелинейных эффектов. В общем случае даже 1D-плазмы, задача является существенно нелинейной, так что из системы уравнений баланса концентраций и потоков невозможно исключить электрическое поле и свести его к линейному уравнению для концентрации. При этом эволюция происходит по-разному в зависимости от того, протекает или нет сквозь неоднородность плазмы глобальный ток, каковы граничные условия на стенках и т. п. Таким образом, был сделан вывод, что концепция амбиполярной диффузии неприменима практически в любом случае, кроме простой плазмы с постоянными коэффициентами переноса и температурами. Поэтому она описывает исключительный случай и не может быть парадигмой для описания переноса в плазме.

В докладе **В. Л. Вдовина "Классические и новые сценарии внеосевого поддержания тока быстрыми волнами и волнами конверсии в активных и неактивных режимах больших установок синтеза и ИТЭР. Предложение контроля ЭЛМ на альфвеновском резонансе"** (НИЦ "Курчатовский институт") были изложены результаты трехмерного моделирования ИЦР-сценариев для неактивной плазмы (H-He<sup>3</sup>) токамака JET. Сценарии высоких ИЦ-гармоник, фундаментальной второй гармоники и конверсионные режимы моделировались полным волновым кодом PSTELION для JET, DIII-D и ныне проектируемого в России токамака T-15MD. Была проведена оценка их возможностей для нагрева ионов и электронов, а также возможности генерации тока с широким и локализованным профилями. Эти сценарии важны для планируемой неактивной плазменной операционной фазы. Приведены примеры сценариев доминирующего нагрева ионов в неактивной фазе ИТЭР. В докладе обсуждался также альтернативный RMP-метод контроля активности ЭЛМ, базирующийся на использовании альфвеновского резонанса. Конверсия в медленные волны обеспечивает высокие эффективность и локализацию генерации тока для контроля неустойчивости типа peeling/ballooning. Для возбуждения волн на альфвеновских частотах предложено использовать ИЦ-антенну, работающую одновременно на двух частотах.

Доклад **Н. В. Змитренко с соавторами "Неодномерное сжатие и горение термоядерных мишеней"** (ИММ РАН, ФИАН, ЦНИИМАШ) был посвящен проблеме развития гидродинамических неустойчивостей при лазерном сжатии термоядер-

ной мишени и связанного с этим снижения нейтронного выхода. Был дан обзор существующих представлений об экспериментальном и теоретическом изучении этой проблемы, о роли математического моделирования и о полноте представлений, которую может дать вычислительный эксперимент. Были изложены принципы и построена теория эволюции зоны перемешивания в лазерных мишенях, соответствующая специфическим условиям, проявляющимся в задачах ЛТС, а именно, кратковременное действие тормозящего ускорения, сферическая геометрия схождения оболочек, сжимаемость вещества. Основные выводы теории были проиллюстрированы примерами прямого численного моделирования ряда актуальных задач ЛТС. Среди них предсказания снижения нейтронного выхода в экспериментах со стеклянными оболочками на установке "Искра-5" и в экспериментах по прямому несимметричному облучению мишеней в виде газонаполненных стеклянных оболочек ( $\sim 10^9$  частиц за вспышку) по сравнению с нейтронным выходом, предсказанным в 1D-моделировании ( $\sim 10^{11}$ ). Эти результаты представляются особенно интересными в контексте работ по проекту HiPER, согласно которому число лазерных пучков этой установки (48) должно быть меньше, чем на установке OMEGA (60 пучков), и существенно меньше, чем на установке NIF (192 пучка). Были также представлены результаты моделирования особенностей сжатия криогенных мишеней, связанные с возможностью расплавления твердого топлива в процессе доставки мишени в камеру. Отмечалось, что прямое численное моделирование было выполнено на основе разработанных авторами трехмерных гидродинамических кодов.

Вопросам, которые являются одними из наиболее острых при разработке термоядерного реактора с магнитным удержанием, а именно, вопросам, связанным с проблемой выбора обращенных к плазме материалов (ОПМ) и условий их эксплуатации, был посвящен доклад **В. А. Курнаева** "Современное состояние проблемы взаимодействия плазмы с поверхностью в токамаках" (НИЯУ МИФИ). К этим вопросам, прежде всего, относятся проблемы накопления трития в элементах реактора, предел накопления по которому в ИТЭР составляет 700 г и может быть быстро достигнут, если в нем будут использоваться химически активные к водороду углеродосодержащие материалы. Альтернативой углеродосодержащим материалам является использование на установках вольфрама. Главные достоинства  $W$  — малый захват трития, высокая теплостойкость и высокий порог для распыления ионами водорода и гелия — неожиданно был дополнен новым его свойством, а

именно, возникновением на его поверхности при облучении в гелиевой плазме при высокой температуре своеобразного "пуха" из волосков нанометровых размеров. Оказалось, что при этом не только уменьшается распыление, но и растет стойкость к плазменным потокам высокой мощности. К недостаткам  $W$  следует отнести хрупкость, приводящую к растрескиванию при больших тепловых нагрузках, и, в некоторых случаях, проникновение  $W$  в центральную зону. В докладе также обсуждались результаты исследования поведения ОПМ под действием потоков плазмы высокой мощности. Это весьма актуально потому, что локализованные на периферии моды приводят к оплавлению, растрескиванию материала, являются основным источником примесей и ведут к накоплению пыли в установках. Отмечалось, что проблема образования пыли в ИТЭР входит в число наиболее обсуждаемых тем.

В обзорном докладе **А. В. Недоспасова** и **А. Ф. Александрова** "О создателях московской школы физики газовых разрядов" (ОИВТ РАН, МГУ) кратко описывается научная, педагогическая и организационная деятельность ученых, основавших московскую школу физики газовых разрядов: Н. А. Капцова, В. Л. Грановского, Б. Н. Клярфельда, В. А. Фабриканта, Г. В. Спивака, Э. М. Рейхрудела, А. А. Зайцева.

Большой интерес вызвал доклад **Д. С. Горбунова** "Физика темной материи и темной энергии" (ИЯИ РАН). В докладе отмечалось, что анализ астрофизических и космологических данных показал, что современная Вселенная в основном заполнена неизвестными компонентами: темной материей и темной энергией. Были описаны наиболее важные в этом контексте астрономические наблюдения и соответствующие характерные явления в современной и ранней Вселенной. Затем был дан обзор теоретических моделей темной материи и темной энергии и обсуждались возможности их проверки на действующих экспериментальных установках.

• На секции "Магнитное удержание высокотемпературной плазмы" (председатель секции А. И. Мещеряков) было представлено 96 доклада (из них 20 на устных и 76 на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками 24 российских научных центров, 8 докладов выполнены совместно с сотрудниками научных центров Франции, Бельгии, Германии, Белоруссии и Украины.

Одним из вопросов, широко обсуждаемых в последнее время, в частности, на двух предыдущих Звенигородских конференциях по физике плазмы и УТС, является вопрос о возможности использования магнитных ловушек в качестве термоядерного источника нейтронов (ТИН). Даль-

нейшее развитие исследований в этом направлении можно было найти в докладе, представленном **Б. В. Кутеевым** "*Статус и перспективы разработки термоядерных источников нейтронов*" (НИЦ "Курчатовский институт"). В докладе отмечалось, что будущие термоядерные реакторы, предназначенные для производства энергии, потребуют коэффициента усиления по мощности  $Q > 30$ , тогда как в реакторах для производства нейтронов достаточно иметь коэффициент  $Q \ll 1$ . Это обстоятельство существенно снижает требования к достижению высоких параметров в термоядерных реакторах и, соответственно, может ускорить выход термоядерных установок на стадию использования последних в промышленности. Так, промышленное использование энергетических термоядерных реакторов предполагается начать в 2050 г. после проверки решений некоторых вопросов по физике УТС в экспериментах на токамаке ITER (создание в 2020 г.) и решения ряда технических проблем на установке DEMO (создание в 2035 г.). В то же время источник термоядерных нейтронов, востребованный атомной промышленностью для дожигания ядерных отходов, можно создать, по мнению автора, уже в ближайшие 5—7 лет. В докладе подробно рассматривался проект токамака с малым аспектным отношением, т. е. прототипа источника термоядерных нейтронов в виде токамака FNS ST.

Интерес слушателей вызвал доклад **Ю. Н. Дневстровского** "*Смысл одномашинного и многомашинного скейлингов для токамака*" (НИЦ "Курчатовский институт"). В докладе анализировались три типа скейлингов (скейлинги отличаются наборами переменных, в нем участвующих): инженерный, физический и безразмерный. Причем скейлинги могут быть одномашинные, т. е. проверенные на одной установке, и многомашинные, т. е. созданные на основе базы данных нескольких установок. Оказывается, что безразмерные скейлинги, выполненные на одной установке, противоречат скейлингу, построенному для ITER на основе данных многих токамаков. Причина такого противоречия, по мнению автора доклада, заключается в том, что в многомашинной базе данных такие переменные, как ток плазмы  $I$  и вложенная мощность  $P$ , нельзя считать независимыми от малого радиуса плазмы  $a$  в том смысле, что размер плазмы ограничивает возможные на данной установке значения этих параметров. Поэтому задача определения показателей для переменных скейлинга оказывается некорректной. Соответственно, многомашинный скейлинг, записанный с использованием любого из указанных наборов переменных, может не совпадать с одномашинными скейлингами. Для регуляризации задачи было использовано

требование отсутствия дебаевского радиуса в многомашинном скейлинге. Проведенный анализ показал также, что многомашинный скейлинг дает надежный прогноз лишь для тех импульсов ИТЭР, в которых отношения  $I/a^2$  и  $P/a^2$  совпадают со средними по базе данных значениями этих отношений. Для установки ИТЭР  $a = 2$  м, поэтому скейлинг будет разумно предсказывать энергетическое время для импульсов с током  $I \sim 12$  МА и мощностью нагрева  $P \sim 80$  MW. В то же время одномашинные скейлинги в инженерных и физических переменных эквивалентны в том смысле, что существуют формулы перехода от одного скейлинга к другому, а после исключения одного из пяти безразмерных параметров скейлинга в безразмерных и физических переменных становятся также эквивалентными.

В докладе **Д. Г. Василькова** "*Эксперименты с новым гиротронным комплексом на стеллараторе Л-2М*" представлены результаты экспериментов на стеллараторе Л-2М с использованием первой очереди нового комплекса трехэлектродных гиротронов фирмы "ГИКОМ" с рекуперацией энергии электронного пучка для нагрева плазмы на второй гармонике гирочастоты электронов (75 ГГц). Эксперименты в режиме ЭЦР-нагрева плазмы выполнялись при уровне вводимой мощности, достигающем значений  $P_0 = 500$  кВт, а уровень удельной поглощаемой мощности нагрева при этом составлял  $P_{\text{НН}}/n_e = 1,5$  МВт/м<sup>3</sup>. В данных экспериментах были достигнуты максимальные для стелларатора Л-2М значения энергии плазмы  $W = 850$  Дж. При этом значения энергетического времени жизни соответствовали международному стеллараторному скейлингу ISS04. В пределах статистического разброса было установлено соответствие энергии плазмы численному счету, выполненному в рамках модели переноса, основанной на неоклассической теории с учетом аномальных потерь при существенном влиянии на перенос локально запертых частиц. Обнаружена также корреляция между низкочастотными модуляциями мощности гиротрона и модуляциями излучения, рассеянного на флуктуациях плотности турбулентной плазмы.

Были представлены также доклады о последних результатах, полученных на открытых ловушках Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН. В докладе **А. В. Бурдакова** "*Многопробочная ловушка: недавние результаты*" подчеркивалось, что в настоящее время целью экспериментальных и теоретических усилий сотрудников является создание экспериментальной модели многопробочного реактора. А направления исследований определяются наличием критических проблем для создания многопробочного реактора,

каковыми являются: высокие потери по электронному каналу на стадии удержания, низкая эффективность нагрева плотной плазмы, существенные поперечные потери, отсутствие термоядерных материалов и технологий. В экспериментах с помощью спектроскопии в ультрафиолетовом диапазоне (линия OV 76,0 нм — излучение из плазмы с температурой 15—25 эВ) было обнаружено, что размер излучающей области соответствует зоне, нагреваемой электронным пучком. Кроме того, была получена верхняя оценка коэффициента поперечной диффузии в плазме —  $2 \text{ м}^2/\text{с}$  и показано, что потери энергии плазмы за счет диффузии не являются доминирующими. На установке проводились также исследования стойкости материалов ТЯ-реакторов к облучению плазмой (вольфрам, углероды), которые показали, что даже при небольших нагрузках в падающем плазменном потоке (5 выстрелов по  $2 \text{ МДж}/\text{м}^2$ ) вольфрам под поверхностью вскипает, и на вольфрамовой мишени формируются глубокие кратеры и трещины. В докладе также излагались ближайшие планы экспериментов на установке ГОЛ-3: создание миллисекундного электронного пучка и достижение электронной температуры плазмы  $\sim 1 \text{ кэВ}$ , а также проведение экспериментов с инжектором нейтральных атомов.

В докладе **В. В. Приходько** "Обзор результатов по изучению удержания плазмы в газодинамической ловушке" (ИЯФ СО РАН) были представлены эксперименты по нагреву плазмы ГДЛ с помощью инжекции нейтральных атомов. В теплую плазму с плотностью  $2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и температурой 200 эВ был инжектирован пучок нейтралов длительностью 5 мс с энергией 22—25 кэВ и суммарной мощностью 5 МВт. В результате нагрева средняя энергия ионов достигла значения 1 кэВ, а электронная температура плазмы 200 эВ. Измерения высокочастотных компонент электромагнитного поля  $B_z$ ,  $B_r$ ,  $B_\phi$  показали, что в плазме развивается альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость. Отмечалось, что на установке ГДЛ планируется создание системы СВЧ-нагрева, а именно, будут смонтированы два гиротрона с частотой СВЧ-излучения  $f = 54,45 \text{ ГГц}$  и мощностью 450 кВт каждый.

На стендовой секции были представлены доклады, отражающие основные направления исследований по магнитному удержанию высокотемпературной плазмы. В большей части докладов были представлены результаты работ, выполненных на тороидальных магнитных ловушках-токамаках, сферических токамаках, стеллараторах. Интерес вызвали доклады группы авторов под руководством В. И. Позняка с токамака Т-10 (НИЦ "Курчатовский институт"). Были представлены резуль-

таты спектральных измерений высокочастотных плазменных шумов. Было показано, что длительное наблюдение динамики спектральных характеристик показывает, что потенциальные плазменные волны могут играть важную роль в транспорте продольного импульса электронов и быть определяющим механизмом, приводящим к снижению тока плазмы, т. е. к неустойчивости.

Вызвали интерес работы, выполненные в последний год на стеллараторе Л-2М. В 2010 г. на стеллараторе Л-2М вступил в строй новый гиротронный комплекс МИГ-3, использование которого позволило увеличить мощность ЭЦР-нагрева до  $P_{\text{ECRH}} = 500 \text{ кВт}$ . В режимах с высокой плотностью плазмы  $n_e = 3,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  удалось достичь рекордных для стелларатора Л-2М значений энергосодержания плазмы  $W = 850 \text{ Дж}$ . В представленных докладах были исследованы параметры плазмы в режимах со столь высоким энергосодержанием. Так, в докладе **И. Ю. Вафина, А. И. Мещерякова, С. Е. Гребенщикова** "Шафрановский сдвиг магнитных поверхностей в стеллараторе Л-2М в условиях высокого удельного энерговклада ЭЦР-нагрева" (ИОФ РАН) приведены результаты измерений сдвига магнитной оси, который был измерен многоордовой диагностикой мягкого рентгеновского излучения. Обнаружено, что при значительном увеличении энергосодержания плазмы  $W$  сдвиги магнитной оси возрастают несильно. По-видимому, это связано с изменением профиля давления плазмы по мере роста энергосодержания в этих экспериментах.

На стендовых заседаниях были также широко представлены результаты, полученные в последний год на открытых ловушках в ИЯФ СО РАН. Несколько докладов посвящены применению новых диагностик для исследования плазмы открытых ловушек. Например, в докладе **А. В. Львовского** "Изучение удержания плазмы в ГДЛ в экспериментах с компактным пробкотроном при помощи дисперсионного интерферометра" (ИЯФ СО РАН) говорилось, что для исследования процесса запираия ионов в центральной части ловушки был использован дисперсионный интерферометр (ДИ). Важной особенностью схемы ДИ являлось то, что разделение опорной и рабочей волн производилось не в пространстве, а по частотам. Это позволяло исключить влияние вибрации на результаты измерений. В ходе экспериментов при помощи двухканального ДИ было установлено, что инжекция атомарных пучков в компактный пробкотрон вызывает в нем накопление быстрых частиц, что, в свою очередь, приводит к увеличению плотности и времени жизни плазмы в ГДЛ.

Несколько докладов было посвящено развитию исследований по моделированию работы термоядерного источника нейтронов (ТИН) на основе

токамака. Доклад **А. Ю. Днестровского** "Подъем тока в ТИИ" посвящен численной разработке сценария подъема тока и выхода на стационарный режим в термоядерном источнике нейтронов на основе сферического токамака (ТИИ-СТ). Расчеты проводились с помощью кода DINA-ASTRA, объединявшего в себе описание эволюции двухмерного равновесия со свободной границей во внешнем магнитном поле кодом DINA и графический интерфейс кода ASTRA. Модель также учитывала перенос энергии в ионной и электронной компоненте, нагрев и генерацию тока пучком быстрых нейтральных атомов, ввод в плазму СВЧ-мощности, генерацию полоидального магнитного потока соленоидом и управляющими витками. В результате проведенного анализа были получены требования к критическим параметрам сценария подъема тока до необходимых значений, такие как вводимая мощность, время удержания энергии, скорость подъема тока. Был предложен базовый сценарий старта разряда в ТИИ-СТ, описывающий изменение токов разряда, в управляющих обмотках, плотности плазмы и мощности нагрева.

В целом работа *секции "Магнитное удержание высокотемпературной плазмы"* была успешной и продемонстрировала высокий уровень работ, проводимых в российских научных центрах в данной области исследований.

• В рамках секции *"Инерциальный термоядерный синтез"* (председатель секции Р. В. Степанов) было представлено 2 доклада на пленарных заседаниях конференции, 12 докладов на двух устных сессиях и 33 доклада на двух стендовых сессиях.

На заседаниях по лазерно-плазменной тематике ряд докладов был посвящен анализу перспектив магнитно-инерциального ТЯ-синтеза и различных аспектов этого подхода.

В докладе **А. Ф. Настоящего** (ТРИНИТИ), главным образом, рассматривалась возможность замагничивания плазмы спонтанными (в том числе самоподдерживающимися) полями, а в докладе **С. В. Рыжкова** (МГТУ им. Баумана) был дан обзор схем с внешним замагничиванием. Несмотря на известные проблемы, связанные, в том числе, с циклотронным излучением, подавление теплопроводности в таких схемах, в принципе, способно увеличить время удержания плазмы и, следовательно, увеличить степень выгорания.

В докладе **В. Е. Шермана** (ЛМЗ-ВТУЗ) были представлены результаты теоретического исследования влияния инертных примесей легких атомов в плазме DT-горючего на зажигание и горение мишеней ИТС. Наиболее важный результат состоит в предложении использовать гидриды изотопов водорода, например, соединение BeDT в качестве твердого горючего некриогенных мишеней ИТС.

В частности, показано, что использование такого топлива может обеспечить достаточный для гибридной схемы (синтез-деление) коэффициент усиления мишени 5—10 при энергии лазера около 10 МДж.

Эксперименты на мощных лазерных установках были представлены единственным докладом коллектива ВНИИЭФ (докладчик **Н. А. Петражицкая**), который был посвящен исследованиям на установке "Луч", призванным пополнить и уточнить базы данных по ударной сжимаемости и изэнтропическому расширению различных веществ.

Работы в области физики и технологии создания мишеней ИТС были представлены **докладами Е. В. Коршевой** (ФИАН) и **А. А. Белолипецкого** (ВЦ РАН), где, в том числе, были приведены результаты работы макета модуля формирования криогенных мишеней для лазерной установки проекта HiPER.

Традиционно много докладов было посвящено процессам, протекающим при взаимодействии мощного короткого лазерного импульса (в том числе ультрарелятивистской интенсивности) с веществом. Среди этих докладов следует отметить серию совместных работ исследователей из ФИАН (докладчики **А. В. Брантов**, **С. Г. Бочкарев** и **Е. А. Говрас**) и канадских Университетов Альберты и Оттавы, где были, в том числе, указаны оптимальные условия генерации пучков ионов с максимально возможной энергией, найдены диапазоны параметров слоистых мишеней, позволяющие уменьшить спектральную ширину пучков ускоренных легких ионов, и указаны границы устойчивости плазменных конфигураций, обеспечивающих полную эвакуацию электронов из канала. Исследования проводились с помощью численного моделирования (PIC-коды).

В докладе **А. И. Фролова** (ОИВТ РАН) был предложен новый механизм генерации терагерцового излучения мегаваттной мощности при воздействии короткого лазерного импульса на слой разреженной плазмы, т. е. явления, открывающего перспективы для создания компактных источников терагерцового излучения.

Отдельные аспекты развития параметрических плазменных неустойчивостей рассматривались в **работах, представленных А. В. Брантовым** (ФИАН) и **В. А. Туриковым** (РУДН).

Доклады, представленные на сессиях по электроразрядной тематике, были, в основном, посвящены сильноточным импульсным установкам.

В докладе **В. В. Вихрева** (РНЦ "Курчатовский Институт") был дан теоретический анализ спектров DD-нейтронов, наблюдаемых в разрядах Z-пинчей и токамаков. Показано, что, в отличие от комбинации "ускорительного" и "термоядерного"

механизмов, учет немаксвелловского ( $\sim 1/E_d^3$ ) высокоэнергетического хвоста в распределении дейтонов, возникающего при быстром нагреве ионов, позволяет согласовать расчетные спектры с экспериментальными. Этот механизм несколько снижает температурный порог реакции, хотя и не приводит к увеличению нейтронного выхода.

Существование немаксвелловского хвоста в функции распределения дейтонов (при энергиях  $E_d > 100$  кэВ) и уширение спектра нейтронов было отмечено в экспериментах на установке С-300, результаты которых были представлены в докладе **В. Д. Королева** (РНЦ "Курчатовский Институт"), посвященном исследованию параметров нейтронного излучения из  $CD_2$ -перетяжки пространственно профилированного Z-пинча.

Два доклада были представлены ИСЭ СО РАН. Доклад **В. И. Орешкина** был посвящен исследованиям крупномасштабных неустойчивостей, вызванных нелинейной диффузией магнитного поля при электровзрыве проводников на генераторе МИГ. В докладе, представленном **А. Г. Русских**, рассмотрен новый метод создания плазменного лайнера с высокой исходной проводимостью (установка ИМРИ-5).

Большое количество работ было посвящено методике эксперимента на электроразрядных установках. Коллективы ТРИНИТИ (доклады **Г. М. Олейника**, **Г. С. Волкова** и др.) и РНЦ "Курчатовский институт" (доклады **Е. О. Бароновой**, **А. М. Степаненко** и др.) продолжают совершенствование методов диагностики высокотемпературной импульсной плазмы, включая измерения с временным и/или пространственным разрешением в оптическом, рентгеновском и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазонах, и успешно применяют эти разработки для исследования физических процессов в многопроволочных сборках. Так, в работе **Г. М. Олейника** и др. впервые в России получены ВУФ-спектры с пространственным разрешением вдоль оси пинча, позволившие доказать трехмерность сжатия квазисферической сборки (АНГАРА-5-1). В экспериментах на установке С-300 с цилиндрическими сборками (доклад **Е. Д. Казакова**, РНЦ "Курчатовский Институт"), было зарегистрировано сверхжесткое ( $>600$  кэВ) рентгеновское излучение (РИ), сопровождавшее появление горячих точек, в структуре свечения которых наблюдались также быстрые (характерное время  $< 0,5$  нс) изменения. Последнее может указывать на наличие дополнительного гидродинамического механизма трансформации энергии. Нужно также отметить работу, представленную **А. Ю. Кошелевым** (ТРИНИТИ), в которой впервые экспериментально измерен радиальный профиль магнитного поля

внутри проволочныхборок на установке АНГАРА-5-1. Эти результаты и предложенный метод МГД-расчета скорости токнесущей плазмы позволили указать на предпочтительность модели затянутого плазмообразования. Такой же вывод был сделан независимо в работе **Б. Г. Репина** (ВНИИЭФ) на основе результатов прямого численного моделирования.

Вычислительному моделированию плазмы электроразрядных установок вообще было уделено большое внимание (доклады **Г. В. Иваненкова** из ФИАН, **В. В. Вихрева** из РНЦ "Курчатовский Институт" и др.). Следует отметить доклады **В. А. Гасилова** и **О. Г. Ольховской** (ИПМ РАН), в которых был представлен 3D-PMGD код MARPLE (совместная работа с Исследовательским Центром Грама, Франция) и результаты его физического тестирования на модельных задачах, соответствующих экспериментам на различных установках, в том числе на установке АНГАРА-5-1. Анализу начальной и стационарной стадий наносекундного вакуумного разряда в схемах с электростатическим удержанием был посвящен доклад **Ю. К. Куриленкова** (ОИВТ РАН).

В рамках работы секции около 10 докладов, несколько меньше, чем в прошлом году, были представлены молодыми учеными.

Основываясь на материалах конференции, по-прежнему приходится констатировать совершенно недостаточный объем экспериментальных исследований в области инерциального термоядерного синтеза (ИТС). Работа по созданию новых мощных установок в практическом плане не ведется. За неимением средств деятельность в этом направлении ограничивается только обсуждением технических проектов. Уже многие годы эксперименты в области ЛТС проводятся только на двух установках "Искра-5" и "Луч", а в области сильноточных пинчей — на установках АНГАРА-5-1 и С-300. Не проводятся эксперименты в области импульсного электростатического удержания плазмы, т. е. направления, которое активно развивается во многих странах. Недостаточный уровень развития экспериментальных исследований в области ИТС наглядно иллюстрируется тем фактом, что подавляющую часть докладов в этой области составляют теоретические исследования. Понятно, что сложившаяся ситуация является следствием современных трудностей развития науки в нашей стране. Однако, как и в предыдущих отчетах по конференции, следует отметить, что исследования в области инерциального термоядерного синтеза, которая имеет важнейшее значение не только для решения энергетической проблемы, но и обороноспособности страны, должны быть поддержаны национальной программой, как это сделано в США, Франции, Японии и Китае. Причем необхо-

димо, чтобы эта программа была сформирована в самое ближайшее время.

### Физика низкотемпературной плазмы

- На конференции в рамках Совета РАН по проблеме "Физика низкотемпературной плазмы" работала секция "**Физические процессы в низкотемпературной плазме**" (председатель секции В. С. Воробьев). Было заслушано четыре обзорных доклада, 24 устных доклада и 102 стендовых сообщения.

Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям:

элементарные процессы и кинетические свойства низкотемпературной плазмы (В. П. Крайнов, Ф. И. Высикайло, Б. А. Векленко и др.);

различные виды разрядов (А. В. Шелоболин, К. Н. Ульянов, С. А. Лебедев, С. А. Майоров и др.);

пылевая и плазма, возникающая в импульсных процессах (Л. М. Василяк, 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** "*Об особенностях эволюции температуры в ультрахолодной плазме*". В докладе отмечалось, что одним из наиболее интересных результатов проводившихся в последние годы экспериментальных исследований свойств холодной ( $\sim 1\text{--}10\text{ К}$ ) разреженной плазмы стало измерение временной зависимости температуры электронов  $T_e$  в плазменных сгустках, выпущенных из магнито-оптической ловушки и свободно расширяющихся в пространстве. Вопреки интуитивно ожидаемому асимптотическому спадающему по степенному закону  $T_e \propto t^\alpha$  с показателем  $\alpha = -2$ , соответствующему идеальному газу без внутренних степеней свободы на инерционной стадии разлета, измеренный показатель степени оказался лежащим в диапазоне от  $-1,1$  до  $-1,3$ . Расчеты автора показали, что существенно замедленный закон спада температуры может быть хорошо объяснен специфическими особенностями динамики ультрахолодной плазмы с сильными кулоновскими корреляциями; в то время как эффекты тепловыделения за счет неупругих процессов (в частности, трехчастичной ре-

комбинации) оказываются в первом приближении несущественными.

В докладе **Э. Е. Сона** "*Супердиффузия в неидеальной плазме*" были рассмотрены различные ситуации, когда стандартные представления о диффузионном характере переноса теряют смысл и для его описания необходимо применять более общие методы.

Дискуссию вызвал доклад **Б. А. Векленко** "*Квантование ленгмюровских волн и сверхпроводимость*", в котором автору на основе уравнений квантовой электродинамики удалось проквантовать ленгмюровские колебания и получить поправки к энергии электронов. В ходе дискуссии было отмечено, что такой подход заслуживает внимания, однако полученные результаты требуют дополнительного физического обоснования.

Значительное число докладов (102) было представлено на двух заседаниях стендовой секции. Ошутимая часть из них была связана с технологическими применениями низкотемпературной плазмы. Например, **А. Н. Веселовзоров, Е. Д. Длугач, А. А. Погорелов, Э. Б. Свирский, В. А. Смирнов** "*Колебания ионного тока и проводимость электронов в канале стационарного плазменного двигателя*".

Другая часть докладов была связана с исследованием свойств и процессов в низкотемпературной плазме. В частности, таких как расчет электронных транспортных коэффициентов в плазме инертных газов при высоких давлениях (**Е. М. Апфельбаум**).

Третья группа связана с исследованиями специфических форм разрядов в низкотемпературной плазме. Сюда можно отнести, например, доклад **Н. А. Дятко и др.** "*Влияние примеси азота на характеристики тлеющего разряда в неоне при средних давлениях*" и др.

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

### Плазменные и лучевые технологии

- В рамках секции "**Физические основы плазменных и лучевых технологий**" было проведено два устных заседания, на которых были заслушаны 13 докладов, и 2 стендовых заседания, на которых были представлены 63 доклада. На секции были представлены результаты работы ведущих научных центров России. Большое число докладов было доложено представителями научных коллективов ведущих учебных заведений России.

В устном докладе **Н. А. Попова** "*Исследование быстрого нагрева воздуха атмосферного давления наносекундным сильноточным разрядом*" (НИИЯФ МГУ) отмечалось, что в последнее время наблюдается повышенный интерес к исследовани-

ям наносекундных сильноточных разрядов, что связано с использованием этих разрядов для воспламенения горючих смесей, решения задач плазменной аэродинамики и др. В докладе были представлены результаты моделирования параметров разрядного канала при наносекундной длительности разряда. Расчеты проводились в рамках одномерной осесимметричной модели. Кинетический блок модели включал систему процессов, описывающих изменение концентраций основных заряженных и нейтральных компонент азотно-кислородной смеси, колебательное возбуждение и нагрев газа в зоне действия разряда. Отмечалось, что результаты проведенных расчетов адекватно описывают данные экспериментов по динамике населенности возбужденных состояний азота. В то же время расчетные скорости нагрева газа ( $\Delta T = 600\text{—}800\text{ К}$  через  $10\text{—}20\text{ нс}$ ) оказываются существенно меньше измеренных ( $\Delta T = 2000\text{ К}$ ).

В докладе **О. А. Синкевича** "Генерация вихрей в атмосфере земли при разряде линейной молнии" (МЭИ (ТУ)) была проанализирована возможность развития винтовой неустойчивости в плазме канала молнии, способной привести к закручиванию окружающего разряд атмосферного воздуха. Показано, что если направление закрутки совпадет с направлением общего вихревого движения, уже существующего в грозовом облаке, то за время существования разряда образовавшийся вихрь может стать центром локализации. Получено дисперсионное уравнение, позволяющее выяснить условия возникновения винтовой неустойчивости — значение критического электрического числа Рэлея, зависящее от силы тока. В работе были определены зависимости критического электрического числа Рэлея, определяющего начало возникновения винтовой неустойчивости, от силы тока. Рассчитаны характерные времена развития вихревой неустойчивости и коэффициенты усиления возмущений за время существования разряда молнии. Было установлено, что наиболее вероятным механизмом генерации вихрей может являться винтовая неустойчивость, развивающаяся за счет собственного магнитного поля электрического разряда молнии.

В докладе **Д. К. Ульянова** с соавторами "Импульсно-периодический режим работы плазменного релятивистского СВЧ-генератора" (ИОФ РАН) обсуждалась работа плазменного релятивистского генератора в режиме периодического следования импульсов. Были экспериментально исследованы спектры отдельных СВЧ-импульсов и динамика их изменения в течение  $70\text{ нс}$  длительности импульса. Показано, что частота излучения может уменьшаться вследствие вытеснения электронов плазмы электростатическим полем релятивистского элек-

тронного пучка. Зарегистрированное увеличение частоты до  $1,5\text{ ГГц}$  происходило вследствие ионизации газа в сильных СВЧ-полях и роста концентрации плазмы, заранее созданной в газе специальным электронным пучком микросекундной длительности.

**Е. А. Филимонова** представила устный доклад "Удаление  $\text{NO}_x$  низкой концентрации импульсной короной: тесты на полупромышленной установке и результаты численного моделирования" (ОИВТ РАН). Данная работа была направлена на разработку полупромышленной установки на основе импульсного коронного разряда для очистки малых примесей загрязняющих веществ ( $\text{NO}_x$  и пыль) и больших объемов пропускаемого воздуха. Эта задача актуальна, например, при вентиляции воздуха тоннелей на скоростных трассах, а также для очистки воздуха на животноводческих фермах. Моделирование конверсии  $\text{NO}_x$  было выполнено на основе подхода, учитывающего неоднородное распределение компонент в реакторе. В соответствии с особенностью экспериментальной установки, химические превращения рассматривались как в реакторе, так и в тракте, соединяющем реактор и место забора газа для измерения. Результаты моделирования хорошо описывают экспериментальные данные.

**Л. М. Василяк** в докладе "Современные источники бактерицидного УФ-излучения" (ОИВТ РАН) рассматривает основные факторы, определяющие эффективность источников УФ-излучения, которые влияют на возможность их применения в различных технологиях: мощность лампы, КПД, полезный и полный ресурс, падение бактерицидного потока к концу срока службы лампы, компактность и стоимость электронного блока запуска и питания, безопасность и технологичность использования источника, стоимость.

В стендовых секциях было представлено 63 доклада.

В работе **Н. Л. Александрова** с сотрудниками "Пучково-плазменные технологии моделирования воздействия кислородной плазмы на космические летательные аппараты" (МФТИ) описывался экспериментальный стенд, на котором исследуется взаимодействие активного кислорода с поверхностью космических летательных аппаратов. Плазма генерировалась инжекцией непрерывного или импульсно-периодического электронного пучка в молекулярный кислород. В облако электронно-пучковой плазмы помещались образцы материалов, что позволяло исследовать их стойкость к воздействию кислородной плазмы и быстрых электронов. Изучались условия, при которых наблюдалась химико-термическая модификация поверхности образца. Модельным материалом был выбран титан (сплав ВТ1-00). Скорость синтеза

оксидов исследовалась в зависимости от условий генерации плазмы и длительности экспозиции. Построена кинетическая схема для моделирования электронно-пучковой плазмы в рассматриваемых условиях. Выполнены расчеты состава плазмы, плотностей активных частиц, нарабатываемых в плазме электронным пучком, и пространственного распределения газовой температуры. Результаты численного моделирования кислородной плазмы сравнивались с экспериментальными данными. Приведено обсуждение возможностей использования рассматриваемого экспериментального стенда и развитых численных подходов для моделирования взаимодействия плазмы с космическими летательными аппаратами на больших высотах.

В докладе **В. М. Шибкова с соавторами** "Стабилизация с помощью программированного СВЧ-разряда горения жидкого спирта, инжектируемого в капельной фазе в трансзвуковой воздушный поток" (МГУ) отмечалось, что для стационарной работы гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя при использовании для воспламенения воздушно-углеводородных смесей низкотемпературной плазмы необходимо оптимизировать режим инициации разряда, т. е. величину вкладываемой в плазму энергии, длительность и частоту следования импульсов. Это можно осуществить при создании разряда в режиме программированного импульса, когда пробой газа и создание плазмы осуществляется с помощью мощного короткого импульса или пачки коротких мощных импульсов, а поддержание плазмы и вклад энергии в плазму происходит в течение длительного маломощного импульса, следующего с некоторой временной задержкой после первого импульса или после пачки импульсов. В докладе исследуется влияние низкотемпературной нестационарной плазмы программированного разряда на эффективность горения жидкого спирта, инжектируемого в капельной фазе в трансзвуковой  $M \sim 1$  воздушный поток. Показано, что полнота сгорания в условиях эксперимента достигает 80 %.

В докладе **А. С. Сахарова, В. А. Иванова с соавторами** "Мультипакторный разряд на поверхности диэлектрика в прямоугольном волноводе: 2D3V численное моделирование методом частиц в ячейке" (ИОФ РАН) были представлены результаты разработки математического кода для моделирования развития мультипакторного разряда (МПР) на поверхности диэлектрика, помещенного в прямоугольный металлический волновод. Код основан на решении уравнений движения электронов в самосогласованном электростатическом поле пространственного заряда и поля СВЧ-волны с учетом генерации вторичных электронов с поверхности диэлектрика и стенок волновода, ко-

нечной температуры вторичных электронов, а также упругого и неупругого отражения электронов. Рассчитывались пороги возбуждения МПР на поверхности диэлектриков с различными вторично-эмиссионными характеристиками, функция распределения электронов по энергии, потоки электронов на поверхность диэлектрика и на стенки волновода, а также исследовалось влияние отраженных электронов и вторично-эмиссионных свойств стенок волновода на развитие МПР. Показано, что порог развития МПР на диэлектрике, помещенном в волновод, повышается по сравнению со случаем неограниченной диэлектрической поверхности в результате потерь электронов на стенках волновода.

В работе **А. Ф. Александрова, Е. А. Кралькиной с сотрудниками** "Влияние внешней цепи разряда на энерговыход в гибридный ВЧ-разряд низкого давления" (МГУ) экспериментально изучаются закономерности энерговыхода в плазму новой модификации ВЧ-разряда — гибридного ВЧ-разряда, поддерживаемого системой токов и зарядов, генерируемых на внешней поверхности источника плазмы. Узел ввода ВЧ-мощности выполнен в виде параллельно соединенных спиральной антенны и обкладок конденсатора, расположенных на боковой и торцевых поверхностях источника плазмы, соответственно. Между антенной и обкладками конденсатора включена переменная разделительная емкость. Показано, что, в отличие от чисто индуктивного разряда, эквивалентное сопротивление плазмы гибридного разряда зависит не только от закономерностей проникновения ВЧ-полей в плазму и механизма поглощения мощности, но и от параметров внешней цепи разряда. В работе представлены данные, полученные при изучении влияния величины разделительной емкости в диапазоне 10—1000 пФ на способность плазмы поглощать ВЧ-мощность. Измерения проводились в аргоне при давлении 1—10 мТорр.

**А. А. Быков, В. Ю. Великодный, А. И. Крикунова** в своем докладе "Исследование влияния электрического разряда, ударно-волновых и акустических процессов в пузырьковой жидкости на реологические свойства нефтей и нефтепродуктов" (МФТИ) сообщили, что по данным на 2006 г. в России было добыто 480 млн т нефти. Из них около 330 млн т составляют парафинистые и высокопарафинистые нефти, которые обладают высокой вязкостью и застывают при положительных температурах. По этой причине их транспортировка на большие расстояния является дорогостоящей. Традиционный метод уменьшения вязкости — нагрев. Он требует значительного повышения температуры нефти, что практически нереализуе-

мо. Поэтому поиск новых методов уменьшения вязкости является актуальным. Авторами данной работы был предложен метод, в котором нефть обрабатывалась последовательно ударными и акустическими волнами, а затем плазмой. Первым фактором, уменьшающим вязкость, является интенсивное акустическое и ударно-волновое воздействие в устройстве типа свистка Гартмана. Вторым — является плазменная обработка в ячейке. Проведены предварительные испытания работы установки на высоковязкой нефти из месторождений республики Татарстан. Показано, что, начиная с некоторого момента времени, ударно-кавитационная обработка становится неэффективной. Тем не менее, получен значительный эффект снижения вязкости в 2—3 раза. При плазменной обработке вязкость снижается непрерывно с течением времени.

**И. А. Косый с сотрудниками представили доклад "Микроволновый импульсный поверхностный разряд в моносилане как способ получения наноразмерного кремния"** (ИОФ РАН), в котором рассматривается возможность применения микроволнового поверхностного разряда типа микроволновой дуги для пиролиза моносилана с последующей конденсацией кремния в виде наноразмерных частиц. Эксперименты проводились в смеси моносилана с аргоном при давлениях газа от 100 Торр до атмосферного давления. Разряд имеет вид нескольких шнуровидных каналов, возникающих в течение одного импульса. Являясь источником УФ-излучения, эти каналы создают вокруг себя область фотоплазмы, в которой, по мнению авторов, идет основное разложение моносилана. Образующийся при этом кремний конденсируется в наноразмерные частицы и под действием акустических волн от разряда выносятся в объем камеры. Для удобства сбора частиц в камеру вводился электрод, на который подавался электрический потенциал. В статическом электрическом поле происходила поляризация наночастиц, в результате чего они нарастали на электроде в виде нитей.

В целом, работу секции можно оценить как успешную, а также отметить некоторый рост числа работ, посвященных изучению и развитию плазменных и лучевых технологий, по сравнению с прошлыми годами при одновременном устойчиво высоком их качестве.

### Сессия "Проект ИТЭР"

На ставшую уже традиционной сессию "Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего" в этом году было представлено 22 доклада, из них 8 были доложены на устном заседании, 14 — на стендовом.

Большая часть докладов была посвящена работам по диагностическим системам ИТЭР. Обзор работ по этим системам, проводящимся в Российской Федерации (активная спектроскопия, рефлектометрия плазмы со стороны сильного магнитного поля, спектроскопия водородных линий, анализаторы атомов перезарядки, нейтронные диагностические, томсоновское рассеяние в диверторе и лазерная флюоресценция), представил К. Ю. Вуколов. Он отметил, что условия работы диагностик ИТЭР существенно отличаются от условий их применения на существующих машинах. Возрастают требования к надежности систем в значительно более жестких условиях, поэтому диагностические системы должны быть протестированы на стендах, а критические элементы испытаны на токамаках. Необходимо завершить изучение воздействия условий ИТЭР на функционирование элементов диагностики до начала изготовления рабочих систем параллельно с уточнением проектов диагностик и развитием необходимых технологий. Следует отметить, что технологии изготовления уникальной аппаратуры становятся решающим условием успеха.

В докладе **М. И. Миронова "Исследование возможностей диагностики по потокам атомов для различных режимов работы установки ИТЭР"** были представлены результаты численного моделирования потоков атомов дейтерия и трития из плазмы ИТЭР для двух основных режимов работы установки: индуктивного (*inductive scenario*) и гибридного (*hybrid scenario*). Ранее было показано, что диагностика способна измерять D/T-изотопное соотношение в режиме стационарного горения плазмы ИТЭРа (*steady state scenario*) с необходимой точностью и временным разрешением. Представленные результаты позволяют сделать вывод о возможности диагностики изотопного соотношения и в этих режимах работы ИТЭР.

В докладе **И. Н. Чугунова "Разработка гамма-спектрометрической диагностики высокотемпературной плазмы для ИТЭР"** были представлены результаты магнитных и температурных испытаний прототипа гамма-детектора для спектрометра ИТЭР.

В докладе **А. В. Горбунова "Специфика измерений параметров плазмы методом лазерной индуцированной флуоресценции в диверторе ИТЭР"** отмечено, что роль лазерной индуцированной флуоресценции (ЛИФ) заключается в измерении концентрации атомов гелия и ионной температуры. Поскольку доступ к излучателю (возможность заменить активную среду в лазере на красителях) может оказаться ограниченным, желательно применять такие спектроскопические схемы ЛИФ, для которых рабочие длины волн лазера попадают в

спектральный диапазон перестройки одного и того же красителя. В работе представлен конкретный вариант решения этой проблемы.

**В. С. Лисица** в докладе *"Расчетно-теоретические работы для спектроскопических диагностик плазмы ИТЭР"* представил результаты расчетно-теоретических работ для трех спектроскопических диагностик плазмы ИТЭР: пассивной диагностики пристеночной и диверторной плазмы по спектрам излучения бальмеровских линий изотопов водорода; активной пучковой диагностики примесных ионов в основной плазме и томсоновского рассеяния в диверторной плазме. Более детально расчетные работы по каждой из этих диагностик были представлены на стендовом заседании.

В докладе **Е. Е. Мухина** *"Статус диагностики томсоновского рассеяния плазмы в диверторе ИТЭР"* были приведены результаты расчетов ожидаемых ошибок измерения электронных параметров для базовых режимов работы дивертора ИТЭР с использованием оценок фонового излучения плазмы. Представлены разработанные принципы защиты первого зеркала в системе сбора рассеянного излучения и первого зеркала, направляющего лазерное излучение в плазму, от напыления продуктами эрозии первой стенки.

В докладе **Д. К. Вуколова** *"Развитие конструкции внутрипортового оборудования диагностики спектроскопия водородных линий"* была представлена конструкция диагностической сборки (ДС) экваториальных и верхних каналов диагностики, приведены результаты нейтронно-физического анализа седьмого верхнего плага с расположенной в ней ДС, результаты габаритно-абберационного моделирования и прочностного анализа сборки.

Доклад **И. Б. Семенова** *"Развитие системы управления CODAC в 2010 г."* был посвящен обсуждению основных элементов системы управления этой установкой. Рассмотрена концепция построения системы управления плазмой (как часть CODAC), а также систем блокировок и безопасности. В докладе также рассматривались требования на применяемое оборудование, компьютерные сети, программное обеспечение и электромагнитную совместимость систем, получившие развитие в 2010 г.

На стендовом заседании были представлены три доклада по результатам расчетных работ для спектроскопических диагностик: доклад **М. Б. Кадомцева** *"Возможности пучковой диагностики с лазерной подсветкой"*, доклад **А. Б. Кукушкина** *"Расчетно-теоретические работы для томсоновской диагностики плазмы в диверторе ИТЭР"*, доклад **В. С. Лисицы** *"Численный код BALMER-*

*SZDYN для спектроскопии бальмеровских линий изотопов водорода в сильном магнитном поле"*. Три доклада были посвящены работам, связанным с проблемой первого зеркала: доклад **Е. Н. Андреев** *"Исследование оптических свойств диагностических зеркал в условиях, характерных для ИТЭР"*, доклад **Т. Р. Мухаммедзянова** *"Моделирование процессов образования пленок на поверхности металлических зеркал в лабораторных условиях, близких к ИТЭР"* и доклад **А. Ю. Таранченко** *"Прогресс в разработке узла входного зеркала диагностики спектроскопия водородных линий ИТЭР"*.

В докладе **В. Г. Петрова** *"Рефлектометрия со стороны сильного поля (РСП) для ИТЭР. Тестирование прототипов РСП на токамаке T-10"* описаны эксперименты, проводившиеся на токамаке T-10 в рамках разработки концепции рефлектометрии со стороны сильного поля для ИТЭР. Другой доклад **В. Г. Петрова** *"Двухчастотный импульсный рефрактометр для измерения электронной плотности в токамаках"* содержал предложение новой диагностики, позволяющей определять среднюю электронную плотность (свободную от "перескоков" фазы) в плазме токамака за счет измерения времени распространения микроволнового импульса в плазме.

Два доклада были посвящены использованию в диагностике алмазных детекторов и моделированию их работы: доклад **С. А. Мещанинова** *"Разработка радиометра гамма-излучения на основе синтетического алмазного материала"* и доклад **Н. Б. Родионова** *"Численное моделирование процессов в алмазном детекторе"*.

Остальные доклады были вне рамок диагностических систем.

Доклад **А. Б. Кукушкина** *"О роли потерь на ЭЦ-излучение в стационарном режиме работы токамака ИТЭР"* рассмотрел влияние электронного циклотронного излучения на локальный электронный энергобаланс в центральной части плазменного шнура ИТЭР при высоких температурах.

Доклад **Л. Н. Химченко** *"Испытания при большом энергокладе бериллия, вольфрама и СС-композиата для первой стенки и дивертора ИТЭР"* содержал результаты квалификации материалов и конструкций дивертора и первой стенки ИТЭР при больших вложенных мощности и энергии.

Доклад **А. Н. Романникова** *"Стенд для тепловых, вакуумных и функциональных испытаний порт-плавов — новый вклад Российской Федерации в создание токамака ИТЭР"* описывал цели и первые результаты проектирования испытательных стендов для порт-плавов.

В докладе **А. В. Кривых** *"Методика и предварительные результаты механических испытаний труб-оболочек для токонесущего элемента то-*

роидальной магнитной системы ИТЭР" были приведены результаты механических испытаний суб-образцов сечением 10 и 25 мм<sup>2</sup>, изготовленных из материала различных производителей, и полномасштабных образцов труб-оболочек.

Работа сессии была успешной. Она показала, что ученые России, выполняющие работы по проекту ИТЭР в рамках ответственности российской стороны, являются востребованными. Кроме того, был продемонстрирован существенный прогресс в научно-исследовательских и конструкторских работах в поддержку проекта ИТЭР.

### Заключение

В целом 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 обзорного материала можно сделать следующие выводы.

1. XXXVIII 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 38-й раз и собрала на свои заседания значительное количество участников из научных центров России и других стран. По сравнению с предыдущей конференцией возрос перечень как российских, так и иностранных организаций, представивших доклады.

2. Уровень экспериментальных работ, выполненных российскими учеными на крупных отечественных установках в области магнитного удержания горячей плазмы, пока еще достаточно высок, а количество работ растет, 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, и недостаточное финансирование научных институтов являются факторами, сильно тормозящими проведение исследований в перспективных областях физики плазмы. При сохранении этих негативных тенденций в ближайшем будущем Россия попадет в положение аутсайдера в области научных исследований по физике плазмы на долгие годы.

3. 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 от-

мечали значительные трудности, возникающие при внедрении результатов научных исследований в области создания новых материалов и применения новых технологий.

4. 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.

5. Существует множество проблем, затрудняющих в России реализацию научно-технических разработок, полученных в последнее время в области физики плазмы. Это продолжающаяся тенденция примитивизации российской промышленности и фактически полное отсутствие спроса на инновационную продукцию на рынке товаров и услуг России из-за сильной монополизации крупных промышленных отраслей и, как следствие этого, подавленность реальной экономической конкуренции в крупном бизнесе, который потенциально способен финансировать инновации. В России практически отсутствует сеть научно-производственных малых и средних предприятий инновационной направленности, имеющих материально-техническую базу и финансовые ресурсы для дальнейшей технологической разработки полученных результатов НИР и их трансформацию в конкретные образцы опытных или промышленных технологических установок и продуктов. Слабо развита система технологических фондов, осуществляющих финансовую и материальную поддержку венчурных малых и средних фирм, ведущих инновационную деятельность.

В России существует низкий уровень правовой защиты российских патентов как на территории России, так и за рубежом на технологические изобретения, полезные модели, устройства и другие объекты интеллектуальной собственности. Существуют огромные трудности для экспорта в Россию высокотехнологичной продукции в силу сильной бюрократизации и крайне медленной работы таможенных служб, а также из-за чрезмерно большого количества объектов, включенных в список продукции двойного назначения.

Неблагоприятный налоговый климат в России для венчурных российских и иностранных компаний, неразвитая законодательная база — все это препятствует осуществлению даже слабой поддержки инновационной деятельности венчурных и научно-технических организаций со стороны крупных и средних промышленных предприятий.

Сложившаяся к настоящему времени в России совокупность выше перечисленных негативных

факторов фактически остановила развитие инновационного бизнеса в России на основе внедрения новых научных достижений, в частности, в области физики плазмы, плазменных и лучевых технологий.

Важно в кратчайшие сроки провести комплексные мероприятия по переориентации российской правоприменительной и налоговой систем от ре-

жима подавления инновационного бизнеса на режим благоприятствования. Можно прогнозировать, что в результате комплексного введения благоприятных и стабильных условий для развития инновационного процесса рост экономики России на основе инноваций может составить 5—8 % в год.

## **Applied and fundamental researches on the plasma physics and controlled fusion**

*(On basis of the XXXVIII International (Zvenigorod) Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, February, 2011)*

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

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,

38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia

E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

*The article provides a review of papers presented at the annual XXXVIII International (Zvenigorod) Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion which was held from 14 to 18 February 2011 in the town of Zvenigorod, Moscow region. There are analyzed are the main trends and the complexity of development of scientific research in the field of plasma physics in Russia and the world.*

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

*Keywords:* plasma, conference, physics, thermonuclear fusion, reports, applied research.

Bibliography — 0 reference.

*Received July 1, 2011*