

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.9

Развитие исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу в России в 2005 году

И. А. Гришина, В. А. Иванов, Л. М. Коврижных, М. Л. Нагаева
Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

Дан обзор научных работ и проведен анализ развития основных направлений исследований, представленных в докладах на ежегодной XXXIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (г. Звенигород 13—17 февраля 2006 г.). Сформулированы основные тенденции развития физики плазмы в России.

На конференции было представлено 304 научных доклада из 74 российских и 30 иностранных и международных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу (УТС), плазменным и лучевым технологиям. Общее число авторов докладов составило более 800.

Были представлены доклады сотрудников следующих российских научных организаций:

1. Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва.
2. Институт ядерного синтеза Российского научно-го центра "Курчатовский институт", Москва.
3. Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва.
4. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва.
5. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.
6. Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ИТЭС ОИВТ РАН), Москва.
7. Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва.
8. ФГУП «Государственный научный центр Российской Федерации "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований"» (ТРИНИТИ), г. Троицк, Московская обл.
9. Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва.
10. Институт математического моделирования Российской академии наук, Москва.
11. Государственный политехнический университет, Санкт-Петербург.

12. Московский физико-технический институт (Государственный университет), г. Долгопрудный, Московская обл.

13. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук, Москва.

14. Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород.

15. Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск.

16. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва.

17. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург.

18. ФГУП "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова", г. Металлоострой, Ленинградская обл.

19. ФГУП "Красная звезда", Москва.

20. Российский федеральный ядерный центр "Все-российский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Нижегородская обл.

21. Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Москва.

22. ФГУП «Научно-производственное предприятие "Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики"» (НПП ВНИИЭМ), Москва.

23. Российский федеральный ядерный центр "Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е. И. Забабахина" (РФЯЦ ВНИИТФ), г. Снежинск, Челябинская обл.

24. Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

25. Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва.

26. Санкт-Петербургский институт машиностроения (ВТУЗ-ЛМЗ), Санкт-Петербург.
27. Государственный научный центр Российской Федерации "Институт экспериментальной и теоретической физики им. А. И. Алиханова" (ГНЦ РФ ИТЭФ), Москва.
28. ФГУП "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума", Москва.
29. Казанский государственный университет, г. Казань.
30. Казанский государственный технологический университет, г. Казань.
31. Московский государственный авиационный институт, Москва.
32. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук, Москва.
33. Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва.
34. Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва.
35. Иркутский государственный университет, г. Иркутск.
36. Московский энергетический институт (Технический университет), Москва.
37. Санкт-Петербургский государственный технический университет, Санкт-Петербург.
38. Томский государственный университет, г. Томск.
39. ГНУП РЭКОМ, Москва.
40. Институт прикладной механики Российской академии наук, Москва.
41. Дагестанский государственный университет, г. Махачкала.
42. Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.
43. Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, Москва.
44. Институт лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.
45. ФГУП "Московский радиотехнический институт РАН", Москва.
46. ГНИИ химии и технологий элементо-органических соединений, Москва.
47. Институт астрономии Российской академии наук, Москва.
48. Филиал Института энергетических проблем химической физики (ФИнЭПХФ) Российской академии наук, г. Черноголовка, Московская обл.
49. ОАО "Радиотехнический институт им. академика А. Л. Минца", Москва.
50. Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ), г. Нижний Новгород.
51. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобелева Московского государственного университета, Москва.
52. Владимирский государственный университет, г. Владимир.
53. Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. Менделеево, Московская обл.
54. Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина, Москва.
55. ВНИИ ГеоИнформСистем, Москва.
56. Институт высоких плотностей энергии РАН, Москва.
57. Институт неорганических материалов им. А. А. Бочвара, Москва.
58. Институт органической химии им. Зелинского РАН, Москва.
59. Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск.
60. ООО "Иоффе Фьюжн Текноложи", Санкт-Петербург.
61. Институт химии растворов РАН, г. Иваново.
62. Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург.
63. МАТИ — Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского, Москва.
64. Московский государственный университет леса, Москва.
65. Московский научно-исследовательский онкологический институт им. П. А. Герцена, Москва.
66. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск.
67. НейрОК Техсофт, г. Троицк.
68. ООО "Радиационная безопасность и экология", Москва.
69. Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская обл.
70. Физико-технологический институт РАН, Москва.
71. ФГУП "ЦНИИ машиностроения Роскосмоса", г. Королев, Московская обл.
72. Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского, Москва.
73. Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону.
74. Multicharged Ions Spectra Data Center, ВНИИФТРИ, г. Менделеево, Московская обл.

На конференции были представлены также доклады сотрудников иностранных и международных научных организаций:

1. Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина.
2. Институт физики плазмы Национального научного центра "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина.
3. Научно-исследовательский институт прикладной физики Национального университета Узбекистана им. М. Улугбека, г. Ташкент, Узбекистан.
4. EURATOM/UKAEA Fusion Association, Culham Science Center, Abington, OX14 3DB, United Kingdom.
5. Институт теоретической физики и астрофизики, г. Киль, Германия.
6. Auburn University, Auburn, Alabama, USA.
7. Технический университет, г. Кемнитц, Германия.
8. Европейский университет, Николаевский филиал, г. Николаев, Украина.
9. Николаевский государственный университет, г. Николаев, Украина.
10. Национальный университет кораблестроения, г. Николаев, Украина.

11. Институт импульсной и микроволновой техники, г. Карлсруэ, Германия.
12. Институт физики Университета Сан-Паулу, Бразилия.
13. Институт ядерной физики УНАМ, г. Мехико, Мексика.
14. Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызская Республика.
15. НИИ экспериментальной и теоретической физики при Казахском Национальном университете им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан.
16. Национальный институт термоядерных исследований, г. Токио, Япония.
17. Национальный институт термоядерного синтеза, г. Токио, Япония.
18. Национальный центр термоядерных исследований, г. Тэджон, Южная Корея.
19. Технический университет, г. Эйнховен, Нидерланды.
20. Факультет физики университета Альберты, г. Эдмонтон, Канада.
21. Университет Висконсин-Мэдисон, Мэдисон, США.
22. Университет Нагои, Чикуза-ку, г. Нагоя, Япония.
23. Университет Прованса, г. Марсель, Франция.
24. Физический институт, г. Прага, Чехия.
25. Чешский Технический университет, г. Прага, Чехия.
26. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.
27. FOM-Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, Association EUROATOM/FOM, partner in the Trilateral Euregio Cluster, Nieuwegein, the Netherlands.
28. Japan Atomic Energy Agency, Naka Fusion Research Establishment, Naka, Japan.
29. Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, USA.
30. Сухумский физико-технический институт, г. Сухуми.

На конференции были заслушаны доклады по четырем важнейшим направлениям физики плазмы:

- магнитное удержание высокотемпературной плазмы.
- инерциальный термоядерный синтез.
- физические процессы в низкотемпературной плазме.
- физические основы плазменных и лучевых технологий.

Состоялось четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 17 обзорных докладов об отечественных и мировых результатах 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 70 устных и 234 стендовых доклада.

Конференция традиционно открывалась обзорными докладами, представленными от коллективов крупнейших научных центров России и Украины.

- В докладе академика В. П. Смирнова "Управляемый термоядерный синтез: перед решающими собы-

тиями" (ИЯС РНЦ "Курчатовский институт") был проведен анализ состояния международных исследований по управляемому термоядерному синтезу накануне начала сооружения первого экспериментального термоядерного реактора ИТЭР.

Проект ИТЭР, инициированный Россией и основанный на установке "Токамак", разработанной в ИЯС РНЦ "Курчатовский институт", является результатом совместных усилий Европы, Японии, США и России. Несмотря на тяжелое положение науки с 90-х годов прошлого столетия, Россия внесла достойный вклад в научную и инженерную проработку проекта. Китай и Южная Корея присоединились к проекту на фазе его реализации. Практически решен вопрос о вступлении Индии в проект. Проектом предусмотрено, что термоядерная мощность реактора достигнет 500 МВт, что на порядок превышает мощность, затрачиваемую на поддержание плазмы. Установлены закономерности поведения плазмы с термоядерным горением, отработаны основные технологии будущих энергетических реакторов. Вместе с тем на ИТЭРе нет возможности провести полномасштабные испытания материалов, способных выдерживать потоки энергии на стенку будущих энергетических комплексов. Работу предполагается выполнять на создаваемых испытательных стендах и реакторах деления на быстрых нейтронах.

Ожидаемый успех ИТЭРа будет знаменовать переход к строительству демонстрационной термоядерной электростанции, за которой последует промышленное освоение термоядерной энергии.

В докладе были отмечены знаменательные сдвиги в другом направлении исследований по управляемому термоядерному синтезу — в инерционном удержании плазмы. Ожидается, что в 2009 г. будет введен лазерный комплекс NIF (США), на котором возможно зажигание термоядерной мишени с $Q \geq 10$. Очень впечатляющие результаты по выходу нейтронов из мишени получены на Z-пинчах (лайнерах) (США), а модернизация ведущей установки "Z" в 2006 г. приблизит ее к возможности поджига мишени. Демонстрация зажигания мишени с $Q \geq 10$ послужит основой для более реалистичных оценок энергетических перспектив инерционного удержания.

- В докладе Б. В. Кутеева "Результаты исследований и программа развития токамаков ИЯС РНЦ КИ" (Институт ядерного синтеза РНЦ "Курчатовский институт") представлен обзор основных результатов экспериментов на токамаке Т-10 в 2005 г. Обсуждены также возможности технического перевооружения токамаков Т-10 и Т-15, направленного на расширение диагностических возможностей установок, получение новых рабочих режимов, создание диверторной конфигурации в токамаке Т-15, существенное увеличение ионной температуры плазмы. Успешная реализация предлагаемой программы позволит создать на базе ИЯС центр коллективного пользования, ориентированный на развитие термоядерных технологий и обеспечивающий технологическую и кадровую поддержку проекта ИТЭР.

- В докладе В. М. Кулыгина "D-³He термоядерный реактор — состояние дел и перспективы" (ИЯС РНЦ "Курчатовский институт") рассмотрены возможные

преимущества и существующие трудности использования $D-^3\text{He}$ топлива в энергетических термоядерных реакторах.

Термоядерная энергетика, рассматриваемая в качестве базовой энергетики будущего, в наибольшей степени удовлетворяет требованиям эффективности, безопасности и экологической чистоты. Использование безнейтронных реакций синтеза значительно повысило бы ее привлекательность. Рассмотрена возможность реализации $D-^3\text{He}$ термоядерной реакции в системе магнитного удержания плазмы. Дан анализ дополнительных (по сравнению с $D-T$) трудностей на пути ее осуществления. В частности, отмечено, что необходимо обеспечить увеличение значения "тройного произведения" примерно в 15 раз по сравнению с тем, что планируется для установки ИТЭР: поднять температуру плазмы до 70 кэВ, а значение давления плазмы по отношению к давлению магнитного поля β необходимо обеспечить на уровне более 30 %. Для решения этой проблемы важно также организовать добычу ^3He на Луне и доставку его на Землю. В докладе отмечалось также, что термоядерный реактор, работающий на $D-^3\text{He}$ -топливе, мог бы иметь целый ряд преимуществ по сравнению с реактором, работающим на смеси $D-T$. В частности, при работе на $D-^3\text{He}$ -топливе резко снижаются радиационные повреждения, при этом отпадает необходимость замены первой стенки в течение всего времени эксплуатации реактора; нет нужды в бланкете для воспроизводства горючего, что влечет за собой упрощение конструкции; значительно понижается радиационная опасность, так как уменьшается наведенная радиоактивность; нет больших количеств циркулирующего трития и упрощается обращение с конструкциями выведенных из эксплуатации реакторов. В этих условиях появляется принципиальная возможность использовать прямое преобразование термоядерной энергии в электричество с высоким КПД. Разворачивание работ, направленных на разработку реакторов синтеза, использующих безнейтронные реакции, по-видимому, явится следующим шагом термоядерных исследований после осуществления $D-T$ -реакции. Основные направления этой активности заключаются в разработке систем магнитного удержания плазмы с большим значением β , разработке технологии добычи ^3He на Луне и доставки его на Землю, разработке слабоактивируемых материалов. Сюда же следует добавить и разработку устройств прямого преобразования энергии заряженных частиц и СВЧ-излучения в электричество.

• В докладе "Развитие многопробочной ловушки ГОЛ-3" большого коллектива авторов из Института ядерной физики СО РАН, Института вычислительных технологий СО РАН и Новосибирского государственного университета приводились результаты исследования плазмы в 12-метровой гофрированной магнитной ловушке в диапазоне плотностей $(0,2-10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Плазма нагревается релятивистским электронным пучком ($\sim 1 \text{ МэВ}$, $\sim 30 \text{ кА}$, $\sim 8 \text{ мкс}$). Обсуждались особенности нагрева ионной компоненты плазмы до температуры 1—2 кэВ, вопросы устойчивости плазмы в длинной магнитной ловушке с продольным током. Приводились также данные по закономерностям удержания плазмы в гофрированной ловушке. Для открытых ловушек с тер-

моядерными параметрами важным является вопрос о взаимодействии плазмы с торцами ловушки. В докладе содержались экспериментальные данные о формировании и распространении холодной поверхностной плазмы, обсуждались пути уменьшения ее влияния на нагрев и удержание горячей плазмы, приводились сравнения с диверторной плазмой в установке ИТЭР, обсуждались также перспективы развития многопробочной ловушки.

• Доклад С. Л. Недосеева "Z-пинчи высокой мощности для импульсного термоядерного синтеза" (РНИИ "Курчатовский институт") явился кратким аналитическим обзором современного состояния исследований по применению сверхтераваттных Z-пинчей для иницирования термоядерного микровзрыва. Были обсуждены результаты экспериментальных, теоретических и концептуальных исследований в этой области. Проанализированы два подхода: излучающий Z-пинч как средство возбуждения хольраума с термоядерной сферической мишенью и Z-пинч в дейтерий-тритиевой смеси, непосредственно инициирующий ее термоядерное горение. Во всех случаях энергетической базой Z-пинча служит генератор электрических импульсов мощностью в сотни тераватт при длительности масштаба 100 нс. Эта мощность концентрируется на Z-пинч со стартовым радиусом порядка сантиметра по металлическим вакуумным транспортирующим линиям с магнитной самоизоляцией. В докладе делается вывод о высокой эффективности и перспективности драйвера термоядерного микровзрыва на основе быстрого Z-пинча в режиме разовых повторяющихся микровзрывов.

Обсуждены также проблемы энергоустановок с Z-пинчевым драйвером, которые должны работать в частотном режиме. Уничтожение транспортирующих линий и необходимость их замены после каждого микровзрыва составляют основную проблему этой энергоустановки. Проанализированы концептуальные схемы энергоустановок с учетом необходимости рециклирования транспортирующих линий, импульсного энерговыделения в объеме реакторной камеры и мгновенного изохорического нейтронного прогрева внутрикамерных конструкционных элементов и бланкета.

• Доклад С. В. Лебедева "Транспортные барьеры в токамаке: физика, проблемы, перспективы исследований" (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН) посвящен сложным и многообразным процессам, с которыми приходится иметь дело при рассмотрении взаимного влияния барьеров и окружающей плазмы, а также заметному выигрышу в качестве удержания плазмы при наличии барьеров. Последнее обстоятельство, в частности, привело к рассмотрению режимов, использующих транспортные барьеры, в качестве основных рабочих сценариев экспериментального термоядерного реактора ИТЭР.

Со времени открытия явления формирования транспортных барьеров в токамаке прошло более 20 лет. Тем не менее исследования по физике барьеров остаются актуальными и привлекают внимание как теоретиков, так и экспериментаторов до настоящего времени.

Большинство моделей, описывающих возникновение периферийного транспортного барьера (Edge

Transport Barrier, H -mode), основаны на механизме подавления аномального переноса в результате радиально-неоднородного вращения плазмы в скрещенных полях ($E \times B$ shear flow). На формирование барьера во внутренних областях плазмы (Internal Transport Barrier) помимо shear flow влияют и другие факторы, такие как радиальные распределения коэффициента запаса устойчивости q и магнитного шира \hat{s} , сдвиг внутренних магнитных поверхностей (α -stabilization), отношение электронной и ионной температур T_e/T_i и др.

Разнообразие факторов затрудняет создание универсальной картины формирования ИТВ, однако не препятствует использованию этих барьеров для оптимизации нагрева плазмы.

К числу проблем, стоящих на пути использования периферийного транспортного барьера в реакторе, следует отнести необходимость получения H -режима при высокой плотности, неопределенность пороговой мощности L — H -перехода, а также возможность повреждения приемных пластин дивертора в результате поглощения значительной мощности, выделяющейся при развитии периферийных неустойчивостей ELM. Сложности применения внутреннего барьера в ИТЭР обусловлены ограниченностью возможностей управления профилями вращения и коэффициента запаса устойчивости, выравниванием электронной и ионной температур из-за преимущественного нагрева электронов термоядерными α -частицами, необходимостью сочетания ИТВ с H -режимом. Демонстрация "гибридного" сценария работы в современных токамаках свидетельствует о возможности преодоления некоторых из перечисленных трудностей, а также о перспективности применения барьеров в реакторе.

Несомненно, наиболее актуальной задачей исследований на настоящем этапе является демонстрация применимости режимов с транспортными барьерами, и в том числе гибридного H -mode/ИТВ, в экспериментальном реакторе ИТЭР.

Исследования последних лет обнаружили ряд новых интересных явлений, требующих понимания и интерпретации. Такими явлениями стали режимы с малыми ELM (grassy, type II, EDA, quiescent H -mode.....), зональные потоки (zonal flows) — нелинейный режим стабилизации турбулентности, проникновение турбулентности сквозь барьеры (turbulence spreading), сложность достижения электронных ИТВ, транспортные барьеры в стеллараторах и их отличия от барьеров в токамаках и др.

• Доклад В. Л. Вдовина "Моделирование электронно-циклотронного нагрева в токамаках полным волновым кодом" (Институт ядерного синтеза РНЦ "Курчатовский институт") посвящен первым результатам моделирования сценариев электронно-циклотронного нагрева, выполненных с новым 3-мерным полным волновым кодом STELEC. Код включает всю базовую волновую физику как интерференция, диффракция, туннелирование волн, конверсия мод при верхнем гибридном резонансе в электронные бернштейновские волны и соответствующие граничные условия. Важность использования кода трудно переоценить для плотной и сверхплотной плазмы токамаков и стеллараторов.

• В докладе И. Ю. Костюкова "Сильнонелинейный режим взаимодействия лазерного излучения с плазмой: генерация излучения и ультрарелятивистских электронов" (Институт прикладной физики РАН) была представлена полуфеноменологическая теория сильнонелинейного режима взаимодействия мощного лазерного импульса с плазмой. Найдено распределение электромагнитного поля в плазменной полости и получены оценки ее размера.

Исследованы условия захвата плазменных электронов и динамика ультрарелятивистских электронов в полости. Рассмотрено спонтанное и вынужденное излучение ультрарелятивистских электронов, совершающих бетатронные колебания в плазменной полости. Спектр излучения таких электронов квазидискретный и близок к спектру синхротронного излучения. Получено выражение для углового распределения и частотного спектра электромагнитного излучения. Предложена схема компактного и мощного источника рентгеновского излучения, основанного на взаимодействии мощного лазерного излучения с плазмой. Обсуждается возможность усиления электромагнитной волны в результате бетатронных колебаний. Исследовано влияние силы радиационного торможения на ускорение электронов. Показано, что при высоких энергиях электронов потери энергии на излучение могут превысить приращение энергии в результате ускорения.

Для исследования сильнонелинейного режима взаимодействия разработан двухмерный аксиально-симметричный гибридный численный код, использующий метод частиц в ячейках. В качестве упрощающего предположения использовалось "квазистатическое" приближение (плазменная волна медленно меняется в системе отсчета, связанной с лазерным импульсом). Данный код учитывает обратное влияние силы реакции излучения на динамику электронов. Проведено сравнение с результатами моделирования с помощью полностью трехмерного электромагнитного кода, использующего метод частиц в ячейках. Код хорошо моделирует ускорение электронов и генерацию излучения и в то же время не требует больших вычислительных ресурсов, необходимых для других существующих кодов.

• В докладе Е. Р. Корешевой "Состояние проблемы криогенных мишеней в программе инерциального синтеза" (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН) дан сравнительный анализ результатов, полученных в различных странах при решении проблемы реакторных криогенных мишеней в программе инерциального термоядерного синтеза (ИТС).

Более полувека тому назад перед учеными была поставлена задача использования для практических целей энергии термоядерного синтеза, которая выделяется при слиянии легких ядер (D и T , D и D , D и 3He и пр.). Два основных подхода к решению поставленной задачи — магнитный термоядерный синтез (МТС) и инерциальный термоядерный синтез (ИТС) — находятся сейчас на такой стадии развития, когда актуальными проблемами становятся разработка реакторных технологий и построение демонстрационного реактора. Эти исследования ведутся на

основе национальных программ отдельных стран, а также в рамках международных проектов.

Для получения положительного выхода энергии за счет сжатия и нагрева мишеней в реакторе ИТС необходимо, чтобы топливо подавалось в центр реакторной камеры с частотой ~6 Гц. Для выполнения этого требования необходимо, чтобы количество топливных мишеней, изготовленных в течение суток, достигало ~500 тыс. шт.

Структура и параметры мишени существенно зависят от энергии излучения, а также от схемы взаимодействия лазерного излучения с мишенью (прямое или непрямое облучение, прямой поджиг), в результате чего достигается высокая плотность сжатия и нагрев ДТ-топлива. Однако различные конструкции мишеней имеют общий элемент — топливное ядро, т. е. сферическую капсулу с расположенным на ее внутренней поверхности твердым слоем топлива (или криослоем). Требования к качеству криослоя для мишеней прямого облучения являются наиболее жесткими: однородность по массе, сферичность и концентричность $\leq 2\%$, возмущения свободной поверхности $< 0,1$ мкм.

Экспертиза, проведенная в 2004 г. в рамках координационного научного проекта МАГАТЭ "Элементы конструкции энергетической станции на основе ИТС", позволила определить весь спектр актуальных проблем в технологии и доставке топливных мишеней, решение которых позволит значительно продвинуть идею термоядерной энергетики на основе ИТС к ее реальному воплощению.

Докладчик обозначил следующие проблемы: разработка и реализация научных основ технологии массового производства незакрепленных мишеней, содержащих криогенный слой требуемого качества; сохранение параметров криогенного слоя в процессе доставки мишени; доставка мишеней в зону горения с требуемой частотой; быстрый контроль параметров мишени; контроль и управление траекторией движения мишени; стыковка элементов: модуль формирования/инжектор, инжектор/камера реактора.

В настоящее время исследования по перечисленным направлениям проводятся в ведущих лабораториях США, Японии и России и в определенном смысле дополняют друг друга. Если научная программа США касается в основном проблем снабжения топливом реактора, работающего по схеме прямого либо непрямого облучения мишеней, то исследования, проводимые в Японии, сосредоточены на реакторных мишенях для схемы прямого поджига. Исследования, проводимые в России (ФИАН), касаются технологии производства топливного ядра внутри незакрепленных движущихся микросфер, проблем частотной доставки мишеней и сохранения параметров топливного слоя в процессе ускорения и инжекции.

• В докладе В. Б. Гильденбурга, А. М. Быстрова, Н. В. Введенского "Преобразование и генерация электромагнитного излучения при оптическом пробое среды" (Институт прикладной физики РАН) был представлен обзор последних теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию явлений модовой конверсии и преобразованию частотных спектров элек-

тромагнитного излучения в процессе его взаимодействия с нестационарной плазмой оптического разряда, создаваемого в газах или конденсированных средах лазерными импульсами высокой интенсивности. Рассматриваемые явления обусловлены процессами возбуждения собственных колебаний и волн в нестационарной ограниченной плазме, образующейся в процессе ионизации среды, и их последующим переизлучением в окружающее пространство. Рассмотрены процессы трансформации как самого ионизирующего излучения, создающего плазму, так и сторонних волн других частотных диапазонов (в том числе и статических полей) в собственные волны плазменных объектов различной конфигурации, образующихся в результате оптического пробоя однородной среды или тел малых размеров ("вытекающие" и поверхностные волны в ионизированном слое или нити, объемные и поверхностные плазмоны в сферическом кластере, ленгмюровские колебания в прикаустической области лазерного импульса, фокусируемого сферической или аксиконной линзой). Определены основные типы пространственно-временной эволюции поля и плазмы в рассматриваемых процессах и проанализированы возможности их использования для разработки новых (основанных на коллективных свойствах плазмы) принципов преобразования электромагнитного излучения в недостаточно хорошо освоенных областях его частотного спектра и, в частности, для создания генераторов излучения терагерцового диапазона.

• В обзорном докладе В. Е. Фортова "Ударные волны и экстремальное состояние вещества" (ИТЭС ОИВТ РАН) представлено современное состояние исследований в области сильных ударных волн и экстремальных состояний вещества. Большое внимание уделено области параметров, при которых в водородной плазме экспериментально наблюдается резкий рост электропроводности. Расчеты термодинамических параметров водорода, выполненные для этих условий квантовым методом Монте-Карло, указывают на наличие аномалии термодинамических функций. Эта аномалия может трактоваться как плазменный фазовый переход первого рода. Обращено внимание, что при сжатии некоторых диэлектриков имеет место не увеличение их электропроводности, а уменьшение. Эти эффекты связаны с перестройкой структуры диэлектриков при высоких давлениях. В целом в докладе было дано представление об этом интересном направлении современной физики плазмы.

• В обзорном докладе А. А. Орликовского, К. В. Руденко, С. Н. Аверкина "Прецизионные плазменные технологии в микро- и нанoeлектронике" (Физико-технологический институт РАН) отмечается, что главной тенденцией развития современной твердотельной микроэлектроники стало непрерывное уменьшение минимальных размеров интегральных приборов. Сейчас они близки к 0,1 мк, это 500 атомных размеров.

Таким образом, произошла трансформация в области наноразмеров, поэтому технологии, обеспечивающие изготовление таких приборов, требуют качественно нового подхода.

В настоящее время методы практической реализации нанотехнологий активно разрабатываются в веду-

щих лабораториях и промышленных компаниях мира. В связи с этим разрабатываются экспериментальные и конструкторские работы по созданию технологических процессов и оборудования для нанотехнологий в России является настоятельной необходимостью.

Плазменные технологии в современной микроэлектронике и будущей наноэлектронике используются более чем в 50 % технологических операций. Поэтому разработка плазменных нанотехнологий является важнейшим приоритетом среди комплекса всех технологических проблем. В докладе были представлены достижения в этой области Физико-технологического института РАН.

- В докладе В. Н. Очкина "Лазерная штарковская спектроскопия плазмы" (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН) рассматривается состояние возможностей спектроскопических измерений электрических характеристик плазмы. Рассмотрены общие черты и ограничения классических эмиссионных и абсорбционных методов, основанных на эффекте Штарка, возможные пути их преодоления с применением частотно-перестраиваемых лазеров. Проанализированы высокочувствительные лазерные методы поглощения и индуцированной флуоресценции, в том числе для оптических переходов, происходящих с участием ридберговских состояний атомов, переходов в полярных молекулах, флуоресценции при многофотонном возбуждении. Проанализированы как существенные достижения последних лет, так и принципиальные ограничения классических и лазерных методов по плотности частиц плазмы, связанные с некогерентностью практически всех используемых схем оптических переходов.

Обсуждался переход к когерентным схемам. С этой целью изучаются свойства комбинационно-рассеянного излучения, возникающего на дипольно-запрещенном молекулярном переходе при невырожденном четырехволновом взаимодействии. Приведены примеры измерений полей с высоким пространственным и временным разрешением в газовых разрядах вплоть до атмосферного и более высокого давления.

- Доклад В. И. Манько "Стандартная квантовая механика с вероятностью вместо волновой функции" (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН) вызвал большой интерес. В нем сделан обзор новой формулировки квантовой механики, называемой "вероятностным представлением" или "томографическим представлением". В этом представлении квантовое состояние описывается распределением вероятностей вместо волновой функции. Математическим приемом построения томографического представления является использование преобразования Радона матрицы плотности в форму функции Вигнера. Квантовая эволюция описывается уравнением типа обобщенного уравнения Фоккера-Планка. Обсуждалась связь "вероятностного представления" с обычной формулировкой и остальными известными в литературе, включая интеграл по путям. Показаны формулы сложения вероятностей, объясняющая интерференцию, и возможности вероятностного представления в решении новых задач.

На секции "Магнитное удержание высокотемпературной плазмы. Теория и эксперимент" (председа-

тель секции — А. И. Мещеряков) было представлено 76 докладов (из них 18 на устных и 58 на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками более чем 15 российских научных организаций, 7 докладов выполнены совместно с сотрудниками зарубежных научных центров (Японии, Великобритании, США, Нидерландов, Франции, Украины).

Повышенный интерес исследователей по-прежнему обращен к проблемам внутренних и внешних транспортных барьеров в плазме токамаков и стеллараторов.

- В докладе С. В. Неудачина "Динамика формирования и свойства переноса внутренних транспортных барьеров в плазме установок JT-60, LHD и T-10" (РНИЦ "Курчатовский институт") приведен анализ данных с трех крупных установок по явлениям переноса при $L-H$ -переходах.

На этих установках был обнаружен нелокальный перенос энергии в широкой области изменения параметра $0,3 < \tau_{\text{ар}} < 1$ за времена порядка нескольких миллисекунд, в то время как энергетические времена жизни плазмы в установках JT-60 и LHD измеряются сотнями миллисекунд. Автор утверждает, что природа переноса в тороидальных магнитных ловушках имеет двойной характер: нелокальный и локальный.

- В докладе Ю. Д. Павлова "Транспортные барьеры в режимах с инжекцией дейтериевой пеллеты при ЭЦР-нагреве на T-10" (РНИЦ "Курчатовский институт") представлены результаты экспериментов по формированию внутренних транспортных барьеров при инжекции пеллет. Инжекция дейтериевой пеллеты приводит к резкому изменению профиля плотности с образованием областей с высокими градиентами (большими, чем 10^{13} см^{-4}), характерными для H -режима. Обязательным условием для получения режима с пьедесталом плотности при инжекции дейтериевой пеллеты на T-10 является наличие дополнительного ЭЦР-нагрева. При этом величина мощности в 5—10 раз меньше пороговой мощности $L-H$ -перехода, рассчитанной по скейлингу ITER. Инжекция дейтериевой пеллеты приводит к изменению профиля электронной температуры. В областях рациональных поверхностей с малыми значениями m и n образуются "ступеньки", характерные для транспортных барьеров. Использование многократной инжекции дейтериевых пеллет при дополнительном ЭЦР-нагреве позволяет в условиях улучшенного удержания (H -режим) сохранить линейную зависимость энергетического времени жизни от величины плотности плазмы.

На стеллараторе Л-2М продолжены эксперименты по исследованию режимов с низкими радиационными потерями. Эти режимы получаются после проведения боронизации вакуумной камеры. Применение боронизации позволило расширить диапазон плотности плазмы ($n_e = (0,3-3,0) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) и мощности СВЧ-им-пульса нагрева ($P = 50-300 \text{ кВт}$), существенно уменьшить мощность излучения из плазмы, которая для режима с плотностью $n_e = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ не превышает 10 % от вводимой мощности.

- В докладе Г. С. Воронова "Зависимость радиального профиля T_e в стеллараторе Л-2М от мощности нагрева и параметров плазмы" (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН) показано, что при ЭЦР-

нагреве в условиях низких радиационных потерь, реализуемых после проведения боронизации вакуумной камеры, на границе плазмы в районе сепаратрисы, возникает резкий градиент температуры, около 100 эВ на 0,5 см радиуса. При этом мощность ЭЦР-нагрева составляет 200 кВт, что превышает пороговую для $L-H$ -перехода в несколько раз. Уменьшение вводимой мощности уменьшает величину скачка электронной температуры на границе. А при $P = 100$ кВт высокий градиент T_e на краю практически отсутствует.

• В докладе Д. Г. Василькова "Исследование свободного распада ECRH плазмы в стеллараторе Л-2М" (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН) показано, что энергетическое время жизни в этих режимах хорошо описывается международным стеллараторным скейлингом ISS 95. При мощности нагрева 250 кВт и плотности плазмы $n_e = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ энергосодержание плазмы составляет величину $W = 650$ Дж. Но в то же время отдельно зависимость от мощности для плотности 10^{19} и $2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ существенно отличается. Такой вывод можно сделать по анализу свободного распада плазмы после выключения ЭЦР-нагрева.

Как и в предыдущие годы, значительное число работ посвящено экспериментам на открытых ловушках: ГДЛ, ГОЛ-3, АМБАЛ-М.

Исследования на этих установках направлены на то, чтобы повысить параметры плазмы и показать возможность осуществления мощного источника термоядерных нейтронов на основе открытых ловушек. Такой источник будет востребован в ближайшее время для испытания конструкционных материалов, стойких по отношению к длительному воздействию на них мощных потоков нейтронов с энергией 14 МэВ.

• В докладе В. В. Поступаева "Работы по инжекции макрочастиц в плазму на установке ГОЛ-3" (ИЯФ СО РАН) приведены результаты исследований по нагреву плазмы релятивистским электронным пучком и ее удержанию в многопробочном магнитном поле. При этом для повышения плотности плазмы используется углеродная пеллета. Графитовая мишень диаметром 2 мм помещается в центр камеры. Размер мишени больше пробега электронов, т. е. процессы испарения и образования мишенной плазмы идут так же, как и для большего образца. Начальная стадия: сферическое расширение столкновительной мишенной плазмы. Поперечный размер плазменной струи определяется процессами столкновительного расширения поперек поля вблизи мишени и диффузии в замагниченной струе.

В целом работа секции "Магнитное удержание высокотемпературной плазмы. Теория и эксперимент" была успешной и продемонстрировала способность российских ученых внести существенный вклад в международные проекты по исследованию высокотемпературной плазмы. Возросло по сравнению с прошлым годом число молодых ученых, принимавших участие в работе секции.

По секции "Инерциальный термоядерный синтез" (председатель секции — Г. В. Иваненков) на конференции было заслушано 16 устных и 47 стендовых докладов. Тематика докладов отвечала основным направ-

лениям исследований в области ИТС, связанным с применением в качестве драйверов лазерных пучков, Z-пинчей и ускоренных пучков тяжелых ионов. К ним примыкала группа докладов, посвященных родственным вопросам развития плазменных методов лазерного ускорения заряженных частиц. Представленные материалы существенно дополняли и наполняли конкретными сведениями пленарные доклады В. П. Смирнова, Е. Р. Коршевой, С. Л. Недосеева и И. Ю. Костюкова.

Наибольший интерес среди сообщений по теме лазерного ИТС вызвали устные доклады сотрудников группы С. Г. Гаранина (РФЯЦ — ВНИИЭФ, Саров) А. Н. Маначинского "Компенсация аберраций волнового фронта на лазерной установке "Луч" с помощью адаптивной системы" и В. Н. Деркача «Фокусирующая система установки "Луч", однородное облучение мишени». Они были посвящены оптимизации оптических систем установки, позволяющей повысить эффективность сжатия лазерных мишеней, и содержали результаты как проведенных расчетов, так и экспериментов.

Другие доклады, также вызвавшие большую дискуссию, были посвящены технике изготовления мишеней. Это стендовые доклады А. И. Громова (ФИАН), посвященные экспериментальным исследованиям взаимодействия излучения с различными типами пористых мишеней, сравнительным расчетам разных типов мишеней, устный доклад Н. Г. Карлыханова и др. «Оптимизация мишеней с непрямым воздействием для зажигания на установке "Искра-6"» (РФЯЦ — ВНИИТФ, Снежинск) и стендовые доклады сотрудников ФИАН и ИМАМОД, в которых рассматриваются физические процессы в топливных мишенях (термоядерное горение, турбулентное перемешивание в ходе сжатия).

В обширной группе сообщений излагались последние результаты теоретических исследований процессов в лазерной плазме: интересные попытки анализа процессов пинчевого типа в магнитоактивной плазме, подвергшейся действию субпикосекундного импульса (В. С. Беляев "Результаты исследований магнитоактивной лазерной плазмы" (ФГУП "ЦНИИМАШ" Роскосмоса)), нелинейный перенос тепла (С. Г. Бочкарев и др. "Исследование неравновесных нестационарных распределений электронов и нелинейной модели переноса тепла в столкновительной плазме" (ФИАН)); генерация ударных волн при воздействии сверхсильных полей фемтосекундного импульса (И. Ю. Косарев "Взаимодействие пикосекундных лазерных импульсов с тонкой мишенью" (РФЯЦ — ВНИИЭФ)) и инициирование в плазме ядерных реакций в таких полях (А. П. Матафонов "Инициирование ядерных реакций в сверхсильных полях лазерной плазмы" (ФГУП "ЦНИИМАШ"))).

К этой теме близко примыкала группа докладов об ускорении заряженных частиц до релятивистских энергий при воздействии на плазму лазерного излучения.

В тематике группы докладов, связанных с применением в ИТС Z-пинчей, доминировало создание плазмы при электрическом взрыве многопроволочных сборок. Важность этого направления связана с ожиданием уже после 2010 г. де-

монстрации осуществления в таких устройствах термоядерного микровзрыва с положительным балансом вложенной и полученной энергии. Основу данной группы сообщений составили устные доклады Е. В. Грабовского, Ю. Г. Калинина и др., в которых доложено о последних работах в ТРИНИТИ по сжатию многопроволочных мишеней. Подробно рассказано об основных физических процессах сжатия плазмы, механизмах генерации мощных рентгеновских импульсов, проанализированы тенденции увеличения выхода мягкого рентгена с ростом тока установки. Приведены экспериментальное доказательство возрастания генерации при переходе от сплошной мишени к многопроволочной сборке, результаты многокадровой X-пинч-диагностики, давшей последовательные рентгеновские изображения сжатия сборки в ходе электрического импульса, приведены данные о динамике длительного плазмообразования в связи с существованием структур типа керн-корона, возникающих на месте проволочек, а также данные о характере движения возникающей плазмы к оси.

Большой интерес вызвали сведения о временной эволюции пространственно-неоднородной структуры излучения пинча в приосевой зоне. В докладах освещены проблемы, возникающие в ходе разработок проекта будущего реактора на основе Z-пинча, а также совместные исследования большой группы, представляющей ряд институтов России (ИФЭ, ТРИНИТИ, ИТЭС) и лаборатории "Сандия" (США).

МГД-моделирование динамики проволочныхборок стало темой доклада В. А. Гасилова и др. "Моделирование электровзрыва микронных проволочек и динамики Z-пинчей, образованных проволочными сборками" (Институт математического моделирования РАН). Наряду с важными методическими проблемами здесь рассмотрены конкретные примеры 2-мерных расчетов, а также состояние перспективных работ по созданию 3-мерной модели.

Большую дискуссию вызвало стендовое сообщение А. А. Чернова и Е. В. Грабовского "Модель излучения горячей плазмы Z-пинча" (ТРИНИТИ) о процессах неустойчивости и обрушения быстрых магнитозвуковых ударных волн, ответственных за излучение плазмы Z-пинча многопроволочныхборок.

Интересны также доклад Ю. Т. Синякина "К вопросу о пространственном распределении продуктов электрического взрыва уединенной проволочки" (РФЯЦ—ВНИИЭФ) и устное сообщение С. И. Ткаченко с соавторами "Моделирование электровзрыва микронных проволочек и динамики Z-пинчей, образованных проволочными сборками" (ФИАН, ИТЭС ОИВТ РАН), посвященные процессам "холодного старта" разряда через проволочки, отвечающие за распределение продуктов взрыва и затягивание плазмообразования в сборках.

Эти и другие доклады, посвященные разработке мишеней, экспериментам по взрыву проволочек и исследованию традиционных плазмофокусных систем, пользовались повышенным вниманием участников.

В качестве альтернативы пинчевому направлению ИТС, находящемуся все же на несколько более ранней стадии развития, был представлен доклад С. Ф. Гаранина и др. "Система МАГО: современное состояние"

(РФЯЦ—ВНИИЭФ, Саров) о современном состоянии работ по системе МАГО.

Удивительно слабо отражена тематика ИТС на ускоренных пучках тяжелых ионов. По ней был представлен лишь стендовый доклад А. Г. Аксенова и др. "Волна горения в цилиндрической мишени" (ИТЭФ), посвященный процессам при распространении волны термоядерного горения в естественной для этого подхода цилиндрической мишени.

Следует отметить, хотя и небольшой, но все же рост числа молодых докладчиков. Также проявилось большее, чем прежде, желание представить доклады в устной форме.

Секция "Физические процессы в низкотемпературной плазме" (председатель секции — В. С. Воробьев) проводилась совместно с Научным советом РАН по проблеме "Физика низкотемпературной плазмы". В данной секции было представлено 27 устных докладов и 67 стендовых сообщений.

Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям:

- различные виды разрядов;
- фазовые превращения, уравнения состояния и транспортные и радиационные свойства;
- физико-химические процессы в низкотемпературной плазме.

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

В первой группе следует отметить доклады Ю. А. Лебедева, П. В. Соломахина, В. А. Шахатова "Электродный разряд в азоте; структура и газовая температура" (Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН), В. П. Гавриленко "Методы измерения электрических полей в плазме с помощью лазерной спектроскопии атомов аргона" (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН); А. Г. Франк "Эксперименты по динамике токовых слоев в замагниченной плазме и моделирование явлений вспышечного типа" (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН); Э. М. Базеляна и др. "Иницирование молнии от объектов в атмосфере" (ЭНИИ им. Г. М. Кржижановского).

Ко второй группе относятся доклады П. Р. Левашова, С. И. Ткаченко, К. В. Хищенко, М. Е. По-варницына "Анализ измерений электропроводности вольфрама с помощью численного моделирования с различными моделями теплофизических свойств" (ИТЭС ОИВТ РАН), И. А. Муленко и др. "Энергетический спектр простейших квантовых систем с модельными потенциалами" (Николаевский государственный университет, Украина); В. П. Крайнова "Процессы рекомбинации в атомарном

кластере при облучении сверхсильным фемтосекундным лазерным импульсом" (Московский физико-технический институт) и др.

К третьей группе можно отнести доклады И. М. Подгорного, А. И. Подгорного "Новые доказательства сценария электродинамической модели солнечной вспышки" (Институт астрономии РАН, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН),

С. А. Майорова с соавторами "Броуновское движение пылинки в плазме" (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН) и др.

Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России, применительно к новым аспектам физики низкотемпературной плазмы, связанным с развитием нанотехнологий. Получены новые экспериментальные данные по пылевой плазме. Исследовались динамические процессы при воздействии электронного пучка на пылевое облако. При включении электронного пучка наблюдалось изменение таких параметров плазменно-пылевой структуры, как межчастичное расстояние, скорость частиц, параметр неидеальности. Использование электронного пучка с варьированной частотой развертки позволяет проводить воздействие как на всю пылевую структуру в целом, так и на ее отдельные части.

В докладе П. Р. Левашиова, В. С. Филинова, М. Боница, Е. М. Анфельбаума, В. Е. Фортова "Изучение связанных состояний в низкотемпературной кулоновской плазме на основе расчетов квантовым методом Монте-Карло" (ИТЭС ОИВТ РАН) представлен анализ результатов расчетов водородной и электронно-дырочной плазмы квантовым методом Монте-Карло. Ранее в расчетах для водородной плазмы были зафиксированы различные связанные состояния, в частности, атомы и молекулы, а также многочастичные кластеры. Выводы о существовании таких состояний были сделаны на основе качественного анализа корреляционных функций, а также посредством визуального изучения ячеек Монте-Карло.

Интересные результаты представлены в докладах И. А. Муленко с соавторами, где приведены выполненные расчеты электронных кинетических коэффициентов неидеальной полностью и частично ионизованной плазмы в отсутствие и при наличии магнитного поля на основе решения кинетического уравнения Больцмана.

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

В рамках секции "Физические основы плазменных и лучевых технологий" (председатель секции А. Ф. Александров) было проведено 2 устных заседания, на которых были заслушаны 12 докладов, и 1 стендовое заседание, на котором было представлено 43 доклада. На секции обсуждались результаты работ ведущих научных центров России, таких как институты РАН (ИВТ РАН, ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, ИПРИМ РАН, ИПФ РАН, ИСЗФ СО РАН, ИТЭС ОИВТ РАН, ИЭФ УрО РАН, ИЯФ СО РАН, ОИВТ РАН, ФИАН, МРТИ, РНЦ "Курчатовский институт", РТИ, ВНИИ ГеоИнформСистем, ООО "Радиационная безопасность и экология).

Большое число докладов было доложено представителями научных коллективов ведущих учебных заведений России, а именно: Дагестанского государственного университета, Иркутского государственного университета, Казанского государственного технического университета, Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,

Московского физико-технического института, Московского энергетического института (Технический университет). Три доклада представлены научными коллективами Узбекистана (НИИ Прикладной физики Национального университета Узбекистана им. М. Улугбека). Соавтором одного доклада был представитель Германии (Институт импульсной и микроволновой техники).

Ряд докладов на устных и стендовых заседаниях был посвящен решению задач, связанных с применением газоразрядной плазмы и плазменных струй в сверхзвуковой аэродинамике. Так, в докладе А. Ф. Александрова, В. М. Шибкова и др. "Влияние комбинированного СВЧ-разряда на горение пропан-бутан-воздушного высокоскоростного потока" (физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова) рассмотрено влияние комбинированного СВЧ-разряда на горение пропан-бутан-воздушного высокоскоростного потока. Изучение процесса воспламенения и горения водородсодержащих смесей в условиях низкотемпературной плазмы важно как с точки зрения фундаментальных исследований механизмов и кинетики атомно-молекулярных превращений при наличии сильных электрических полей, так и с точки зрения оптимизации плазмохимических процессов и ряда прикладных аспектов. Одной из таких проблем является разработка физических принципов горения высокоскоростных потоков горючих газов. В этих условиях необходимо обеспечить быстрое объемное воспламенение углеводородного топлива, для чего необходимо максимально сократить время иницирования воспламенения.

В докладе представлены результаты исследований влияния низкотемпературной неравновесной плазмы комбинированного СВЧ-разряда на воспламенение высокоскоростного потока углеводородного горючего. Комбинированный разряд предложен в целях уменьшения периода индукции и увеличения интенсификации горения высокоскоростного потока углеводородного топлива. Разряд представляет собой комбинацию импульсно-периодического поверхностного СВЧ-разряда и разряда постоянного тока, создаваемых в застойной зоне аэродинамического канала. При этом поверхностный СВЧ-разряд служит для нескольких целей. Во-первых, он способствует инициации разряда постоянного тока. Во-вторых, в условиях СВЧ-разряда имеет место эффективный вклад энергии в плазму. Это ведет к эффективному созданию активных радикалов, возбужденных и заряженных частиц, а также к интенсивному объемному облучению газового потока ультрафиолетовым излучением. Эти факторы приводят к быстрому воспламенению газообразного топлива. Разряд постоянного тока служит для вклада тепловой энергии в газ и стабилизации горения высокоскоростного потока углеводородного топлива. Экспериментально реализовано стационарное горение высокоскоростного пропан-бутан-воздушного потока с числом Маха $M=2$ в условиях комбинированного СВЧ-разряда, создаваемого в различных застойных зонах аэродинамического канала.

В докладе В. А. Битюркина, Е. А. Филимоновой и др. "Особенности кинетики воспламенения и горения ме-

тановоздушной системы в присутствии NO" (ИВТ РАН) рассмотрены особенности кинетики воспламенения и горения метановоздушной системы в присутствии NO. В работе в одномерной постановке проведены расчеты по влиянию NO на предел воспламенения холодного метана при взаимодействии с относительно горячим воздухом, содержащим NO (0—2%) при давлении 1 атм. Построена кинетическая схема для описания низкотемпературного воспламенения и горения в присутствии NO. Показано, что при наличии NO порог воспламенения существенно снижается, при этом сжигание смеси происходит при более низкой температуре, однако скорость волны горения в этом случае уменьшается.

В докладе Н. А. Попова и др. "Поверхностный микроволновой разряд как инициатор горения газовой смеси" (Институт общей физики РАН, НИИ Ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ) проанализированы возможности поверхностного микроволнового разряда как инициатора горения газовой смеси. Для поджига стехиометрических смесей (водород/кислород и метан/кислород) использовался импульсный безэлектродный СВЧ-разряд, возбуждаемый у поверхности металлодиэлектрической мишени, помещенной в центр сферической колбы диаметром 20 см. Длина волны СВЧ-излучения — 2,5 см, длительность импульса — 10 мкс. Воспламенение смесей происходило вблизи поверхности мишени. Затем формируется волна горения, которая распространяется на периферию реактора со скоростью до 50 м/с, что значительно больше нормальной скорости горения для данных условий. Отмечается, что природа и механизм формирования первичной волны горения (с температурой за фронтом, превышающей 1500 К) требуют дополнительных исследований.

Исследованию электрического разряда над поверхностью воды — объект, представляющий интерес как в связи с его природными проявлениями (молнии, "бьющие" в воду, влажную землю), так и в связи с применением в современных технологиях (например при электроразрядной очистке воды), посвящена работа Э. М. Бархударова и др. "Одноканальный завершённый и незавершённый разряды на поверхности воды. Электрические и спектральные характеристики" (ИОФ РАН). В зависимости от величины высоковольтного импульса на поверхности воды формировался одноканальный незавершённый или завершённый лидерно-стримерный разряд. Показано, что переход в стадию завершённого разряда сопровождается заметным уширением разрядного канала и увеличением тока в 3—4 раза. На основе эффекта Штарка в плазменных электрических полях по уширению линии H_{α} определена концентрация электронов в различных точках разрядного канала. Как в одном, так и в другом случае, концентрация электронов по длине лидера существенно не меняется и равна $(1,5—3,0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, при этом температура электронов $T_e = 1,0—1,5 \text{ эВ}$.

Интересный доклад, посвященный исследованию способности распространения подкритического микроволнового разряда путем непрерывного ветвления стримера, был представлен К. В. Ходатаевым.

Теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов, возникающих при ударноволновом воздействии на тяжелую воду (содержащую вакуумированные пузырьки дейтерия), генерируемом кольцевым разрядом при взрыве проволоочки, посвящен доклад В. Ю. Великодного и др. Определены условия для воздействия на микропузырьковую среду, близкие к однородному сжатию в адиабатическом режиме без разрушения микропузырьков. Были измерены потоки нейтронов при обжати ударной волной тяжелой воды, барботированной дейтерием, в условиях форвакуума. Зарегистрированы абсолютные величины выхода нейтронов $\Phi \cong 10^8—10^{10}$ в импульсе в телесном угле 4π.

Доклад Н. В. Введенского, В. Б. Гильденбурга и др. "Генерация мощного терагерцового излучения при аксиконном пробое газа низкого давления" (Институт прикладной физики РАН) посвящен исследованию быстрой ионизации газа в присутствии внешнего (постоянного или переменного) электрического поля, что сопровождается возбуждением собственных колебаний в образующейся ограниченной плазме и последующим переизлучением запасенной в этих колебаниях электромагнитной энергии в окружающее пространство. Представлены новые результаты исследований генерации терагерцового излучения в рамках схемы, использующей явление трансформации внешнего электрического поля в собственные плазменные колебания, возбуждаемые на фронте сверхсветовой волны ионизации, создаваемой в результате аксиконной фокусировки фемтосекундных лазерных импульсов тераваттной мощности. С использованием преобразования Лапласа рассчитаны амплитуды и частоты возбуждаемых собственных волн, найдена энергия и мощность порождаемого ими излучения. Обсуждаются возможности достижения гигаваттных значений пиковой мощности генерируемого излучения (с частотой ~1 ТГц).

В докладе А. В. Аржанникова, Н. С. Гинзбурга и др. "Двухстадийная схема генерации импульсов терагерцового излучения на основе планарного лазера с двухмерным брэгговским отражателем с внутррезонаторным стимулированным рассеянием" (ИЯФ СО РАН, ИПФ РАН, Институт импульсной и микроволновой техники, Карлсруэ, Германия) описана концепция генератора субмиллиметрового излучения для диапазона длин волн 0,1—0,3 мм, построенного на принципах двухстадийного лазера на свободных электронах. На первой стадии осуществляется генерация 4-мм излучения в планарном лазере на свободных электронах с килоамперным ленточным РЭП, в котором поперечная компонента скорости электронов накачивается активным магнитным ондулятором. На второй стадии полученное 4-мм излучение по схеме стимулированного обратного рассеяния на плотном пучке релятивистских электронов переводится в терагерцовый диапазон частот. Особенностью предлагаемой двухстадийной схемы является то, что обе стадии генератора будут реализованы в объединенной электродинамической системе, и из генерирующего устройства будет выходить лишь субмиллиметровое излучение.

Доклад А. В. Коновалова и О. А. Синкевича "Численное моделирование состояния катода сильноточной

электрической дуги" (Московский энергетический институт (Технический университет)) посвящен развитию технологий получения новых материалов и их модификаций.

Ресурс работы плазмотронов в основном определяется ресурсом работы катода, и поэтому важным аспектом всей технологии становится проблема работы самого катода. В данной работе предлагаются математическая модель, описывающая распределения электрического тока и температуры в теле катода, и расчет термических напряжений катода. В модели учитываются джоулево тепловыделение в теле катода, термоавтоэлектронная эмиссия электронов с поверхности катода и падающее из плазмы на поверхность излучение. Проведено численное моделирование температурных и электрических полей для цилиндрических катодов простой формы и для составных катодов (Cu, W), используемых в экспериментах. Проведенные исследования позволяют сформулировать направления работ по созданию сильноточных малоэрозийных катодов.

В работе Н. А. Елкиной и др. "Исследование процессов получения фольг интерметаллидов TiAl из многослойных бинарных систем методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза" (МГТУ им. Н. Э. Баумана) представлены результаты исследования новой технологии получения фольг интерметаллидов TiAl и NiAl. Технология включает в себя два основных этапа. Первый — получение многослойных бинарных систем методами плазменного напыления, второй — собственно получение интерметаллида путем инициирования реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В докладе представлены результаты экспериментальных измерений температурных полей СВС-процесса образования интерметаллидов TiAl и NiAl из многослойных наноструктур. Изучено влияние начальной температуры образцов на СВС-процессы. Показано, что при определенной температуре образца происходит так называемый тепловой взрыв, когда реакция протекает во всем объеме фольги.

Интересно сообщение Г. И. Змиевской и др. "Модели самоорганизации в открытых плазмподобных средах" (Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН), в котором рассматриваются примеры самоорганизации, актуальные в вычислительной нанофизике: блистеринг, формирующий пористость поверхности, осаждение паров окислов металла в виде островов монослойных покрытий в зависимости от формы и глубины дефектов, а также в присутствии плазмонов поверхности, структурирование пылевой плазмы вблизи электрода и модель термоэмиссии поверхности в приложении к методике измерений свойств металлической поверхности сканирующим туннельным микроскопом.

В работе А. Б. Мучникова, А. Л. Вихарева и др. "Динамика углеродосодержащих соединений в СВЧ-разряде в водородо-метановой смеси" (ИИФ РАН) исследованы плазмохимические процессы, протекающие в микроволновом CVD-реакторе для напыления алмазных пленок, в водородо-метановой смеси. Эксперименты проводились в непрерывном и в импульсно-периодическом режимах поддержания СВЧ-разряда при следующих пара-

метрах: частота СВЧ-излучения 2,45 ГГц; средняя мощность 2—4 кВт; диапазон давлений 50—150 Торр; содержание метана до нескольких процентов. Проанализировано влияние скорости подачи газовой смеси в реактор на концентрации атомарного водорода и углеродосодержащих радикалов, а также на характерное время установления стационарных значений концентраций различных газофазных компонентов. Выполнен численный расчет химической кинетики углеродосодержащих компонентов, используя нуль-мерную (точечную) модель. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментом.

В целом работа секции показала определенный прогресс в области исследований по плазменным и лучевым технологиям. Наблюдается явный рост числа докладов, повышается качество работ. Увеличивается число молодых участников конференции за счет высших учебных заведений России и СНГ.

Доклады, представленные на конференцию, были опубликованы в сборнике "Тезисы докладов XXXIII Международная Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС", а также в электронном виде на странице в системе "Интернет" по адресу www.fpl.gpi.ru.

Часть полных текстов докладов представлена авторами для опубликования в журналах "Физика плазмы" и "Прикладная физика". Сотрудничество редакционной коллегии журнала "Прикладная физика" и Организационного комитета Звенигородской конференции в публикации материалов конференции является полезным и важным для продвижения достижений и результатов фундаментальной и прикладной физики плазмы на национальном и мировом научно-технологических рынках.

В целом следует отметить, что XXXIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу стала важнейшим событием, оказавшим влияние на развитие научных исследований и их координацию в ведущих научных центрах России и за рубежом.

Финансовую поддержку конференции оказали
Российский фонд фундаментальных исследований,
Российская академия наук,
Федеральное агентство по атомной энергии, ОАО
"Московский комитет по науке
и технологиям".

Организаторами прошедшей XXXIII 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";

- Институт теплофизики экстремальных состояний при Объединенном институте высоких температур РАН;
- Научно-технологический центр ПЛАЗМА-ИОФАН;
- Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

На основании изложенного выше материала 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 проходила уже 33-й раз и собрала на свои заседания значительное число участников из научных центров России и других стран. Конференция имеет международный статус. Участники конференции имеют возможность обмениваться информацией по всем актуальным проблемам физики плазмы, стоящим перед мировой наукой. Проведение конференции имеет большое значение для раз-

вития исследований по физике плазмы в России и целесообразность ее проведения в дальнейшем не вызывает сомнения.

2. Качество экспериментальных работ, выполненных российскими учеными на крупных отечественных установках в области магнитного удержания горячей плазмы, сохраняется высоким, а количество работ растет, несмотря на физическое и моральное старение экспериментального и диагностического оборудования, снижение численности и старение научных коллективов.

3. Увеличивается число работ, посвященных прикладным исследованиям в области физики плазмы, растет интерес к этим научным исследованиям среди молодежи, принявшей участие в работе конференции.

4. Значительное число представленных на конференции работ выполнено российскими учеными в научных центрах за пределами России — Европа, США, Япония. Это указывает на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых остаются высокими, и они востребованы мировым научным сообществом.

Статья поступила в редакцию 18 июля 2006 г.

Scientific researches on physics of plasmas and controlled thermonuclear fusion in Russia in 2005

I. A. Grishina, V. A. Ivanov, L. M. Kovrizhnikh, M. L. Nagaeva

A. M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

In this paper the review of the scientific works and analysis of development of the basic directions of scientific researches presented in the reports of annual XXXIII conference on physics of plasma and controlled thermonuclear fusion was done. This conference was held from February 13 till February 17, 2006 in Zvenigorod-town which is in Moscow region. In the conclusion of the paper the basic tendencies of development of physics of plasma in Russia are formulated.