

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.9

Исследования по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу в России в 2004 г.

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 анализ развития основных направлений исследований, представленных в докладах на ежегодной XXXII международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, состоявшейся в г. Звенигороде с 14 по 18 февраля 2005 г. Сформулированы основные тенденции развития физики плазмы в России.

Ежегодная XXXII Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде с 14 по 18 февраля 2005 г.

На конференции было представлено 300 научных докладов из 78 российских и 25 иностранных и международных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее количество авторов докладов составило более 800.

На конференции были представлены доклады сотрудников следующих российских научных организаций:

1. Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва.

2. Институт ядерного синтеза Российского научного 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. 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 космических исследований Российской академии наук, Москва.

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

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

16. Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск.

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

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

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

20. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург.

21. ФГУП "Красная звезда", Москва.

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

23. Московский инженерно-физический институт (государственный университет), Москва.

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

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

26. Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Томская обл.

27. Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва.
28. Санкт-Петербургский институт машиностроения (ВТУЗ-ЛМЗ), Санкт-Петербург.
29. Государственный научный центр Российской Федерации "Институт экспериментальной и теоретической физики им. А. И. Алиханова" (ГНЦ РФ ИТЭФ), Москва.
30. Институт высоких температур Российской академии наук, Москва.
31. ФГУП "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума", Москва.
32. Казанский государственный университет, г. Казань.
33. Казанский государственный технологический университет, г. Казань.
34. Московский государственный авиационный институт, Москва.
35. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук, Москва.
36. Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва.
37. Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва.
38. Иркутский государственный университет, г. Иркутск.
39. Московский энергетический институт (Технический университет), Москва.
40. Лаборатория "ПЕЛИН", Москва.
41. Санкт-Петербургский государственный технический университет, Санкт-Петербург.
42. Томский государственный университет, г. Томск.
43. ГНУП РЭКОМ, Москва.
44. Научно-исследовательский институт физики Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург.
45. Институт прикладной механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва.
46. Институт прикладной механики Российской академии наук, Москва.
47. Дагестанский государственный университет, г. Махачкала.
48. Институт химической кинетики и горения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.
49. Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.
50. Институт теоретической и прикладной механики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.
51. Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор", пос. Кольцово, Новосибирская обл.
52. Институт молекулярной генетики Российской академии наук, Москва.
53. Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.
54. Закрытое акционерное общество ЭВС, Санкт-Петербург.
55. Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, Москва.
56. Институт лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.
57. ФГУП "Московский радиотехнический институт РАН", Москва.
58. Институт физики Санкт-Петербургского университета, Санкт-Петербург.
59. Центральный физико-технический институт Министерства обороны РФ, г. Сергиев Посад.
60. Институт прикладной химической физики Российской академии наук, г. Черноголовка, Московская обл.
61. Закрытое акционерное общество "Техносистема-ЭКО", Москва.
62. Институт элементоорганических соединений Российской академии наук, Москва.
63. Химический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва.
64. Московская государственная академия ветеринарной медицины и биотехнологий, Москва.
65. Институт астрономии Российской академии наук, Москва.
66. Филиал Института энергетических проблем химической физики (ФИнЭПХФ) Российской академии наук, г. Черноголовка, Московская обл.
67. Костромской государственный университет, г. Кострома.
68. Научно-исследовательский и конструкторский институт радиоэлектронной техники, г. Заречный, Пензенская обл.
69. ОАО "Радиотехнический институт им. академика А. Л. Минца", Москва.
70. Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С. П. Королева, г. Самара.
71. Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ), г. Нижний Новгород.
72. Закрытое акционерное общество "ОВИОНТ-ИНФОРМ", Москва.
73. Научно-исследовательский институт им. Д. В. Скобельцина Московского государственного университета, Москва.
74. Институт радиотехники и электроники Российской академии наук, Фрязинское отделение, г. Фрязино, Московская обл.
75. Владимирский государственный университет, г. Владимир.
76. Казанский физико-технический институт, г. Казань.

77. Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики, Москва.

78. ВНИИ электромеханики, Москва.

На конференции были представлены доклады сотрудниками из следующих иностранных и международных научных организаций:

1. Max-Planck Institute für Plasmaphysik, Sub-Institute Graefswald, EUROATOM Association, Graefswald, Germany.

2. Институт теоретической физики Университета Дюссельдорфа, г. Дюссельдорф, Германия.

3. Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина.

4. Институт физики плазмы Национального научного центра "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина.

5. Institute of plasma physics and laser microfusion, Warsaw, Poland.

6. Laboratoire des Plasmas Denses, Université P. & M. Curie, Paris, France.

7. Institute of Plasma Physics CAS, Prague, Czech Republic.

8. Университет им. Джона Хопкинса, Лаборатория прикладной физики, США.

9. Научно-исследовательский институт прикладной физики Национального университета Узбекистана им. М. Улугбека, г. Ташкент, Узбекистан.

10. The University of Milano, Physics Department, Milano, Italy.

11. Centre d'Etude Recherchers Rayonnements, Toulouse, France.

12. EURATOM/UKAEA Fusion Association, Culham Science Center, Abington, OX14 3DB, United Kingdom.

13. Institute of Advanced Studies, Vienna, Austria.

14. Institute for Plasma and Atomic Physics, Ruhr University Bochum, Bochum, Germany.

15. Институт теоретической физики и астрофизики, г. Киль, Германия.

16. Атырауский инженерно-гуманитарный институт, Казахстан.

17. Институт молекулярной и атомной физики Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь.

18. Могилевский государственный университет им. А. А. Кулешова, г. Могилев, Беларусь.

19. Auburn University, Auburn, Alabama, USA.

20. Технический университет, г. Кемnitz, Германия.

21. Колледж науки и технологий, Нихон Университет, г. Токио, Япония.

22. Инженерный факультет, Шизуока Университет, г. Хамаматацу, Япония.

23. Резерфордская лаборатория, Хилтон, Дидкот, Великобритания.

24. Zanjan University, Zanjan, Iran.

25. Международный научный центр "Объединенный институт ядерных исследований", г. Дубна, Россия.

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

1. Магнитное удержание высокотемпературной плазмы.

2. Инерциальный термоядерный синтез.

3. Физические процессы в низкотемпературной плазме.

4. Физические основы плазменных и лучевых технологий.

Состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 15 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 66 устных и 219 стендовых докладов.

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

Программа совместных экспериментов на больших токамаках в поддержку программы разработки и создания международного экспериментального токамака-реактора (ИТЭР) была изложена в докладе Н. В. Иванова (РНЦ "Курчатовский институт"). В докладе приведены результаты скоординированных исследований на ведущих токамаках. Эти исследования, рекомендованные тематическими группами ИТРА (International Tokamak Physics Activity), вносят существенный вклад в развитие физики плазмы в токамаке и нацелены главным образом на развитие работ по программе ИТЭР. Совместные эксперименты проводятся по следующим основным тематикам:

базы данных по удержанию и моделированию процессов в высокотемпературной плазме;

физика транспортных процессов в плазме токамаков;

физика периферийной плазмы и пьедесталов;

физика дивертора и SOL;

МГД-процессы, срывы и магнитное управление удержанием плазмы;

стационарные режимы удержания плазмы.

В докладе были подведены итоги развития программы на данном этапе, а также даны прогнозы дальнейших работ по заданным направлениям.

Международная кооперация стран (Россия, Евросоюз, Япония, США, Китай и Республика Корея), разрабатывающая проект ИТЭР, приняла важное политическое решение о месте строительства ИТЭР — Ядерный центр на юге Фран-

ции (Кадараш). Однако это решение фактически не о самом строительстве установки, а о месте будущего строительства, т.е. если решение о самом строительстве будет принято и финансирование всеми участниками состоится, то место строительства уже согласовано и определено. Тем самым мировое термоядерное сообщество сумело преодолеть серьезные разногласия и выработать ключевое решение, которое существенно продвинуло проект ИТЭР в направлении его реализации.

Результаты работ большого научного коллектива Института ядерного синтеза РНЦ "Курчатовский институт" проанализированы в докладе Д. А. Кислова "Современное состояние исследований на установке Т-10". Приведены основные экспериментальные результаты, полученные по исследованию физики транспортных процессов и механизмов формирования внутренних транспортных барьеров, инициированию разрядов при помощи СВЧ-волн, разработки методов контроля МГД-неустойчивостей, исследования эффектов, связанных с надтепловыми электронами, а также исследования периферийной плазмы и взаимодействия плазмы с поверхностью. В заключение приведен ряд слайдов общего информационного характера. В настоящее время на установке продолжают исследования механизмов переноса энергии и частиц в условиях доминирующего электронного нагрева, роли различных видов турбулентности в транспортных процессах в широком диапазоне операционных режимов токамака, ведется поиск режимов улучшенного удержания, включая режимы с внутренними транспортными барьерами. Проводится разработка методов контроля МГД-неустойчивостей, в том числе при помощи СВЧ-нагрева и возбуждения тока в плазме. Исследуются эффекты, связанные с генерацией ускоренных электронов, в ряде операционных режимов. Ведется изучение механизмов транспорта в периферийных областях плазменного шнура и взаимодействия плазмы с поверхностью. В ряде экспериментов используется инжекция дейтериевых и примесных макрочастиц с диагностическими целями или с целью воздействия на распределения плазменных параметров.

"Прогресс исследований на сферических токамаках и последние результаты с Глобуса-М" — тема доклада В. К. Гусева и Н. В. Сахарова из Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН. В докладе обсуждаются результаты исследований на сферических токамаках за последний год. Традиционно важными являются проблемы, связанные с особенностями геометрии плазмы, магнитного поля и с реакторными аспектами сферических токамаков — разгон и поддержание тока при ограниченных запасах магнитного потока в индукторе или вовсе без него, нагрузка на первую стенку, порог перехода

в Н-моду, взаимодействие ВЧ-волн с плотной плазмой в слабом неоднородном магнитном поле.

Все большее внимание уделяется исследованиям фундаментальных проблем физики высокотемпературной плазмы и термоядерного синтеза. Турбулентность и транспорт, глобальная и локальная устойчивость плазмы, физика пограничного слоя становятся чрезвычайно важными направлениями исследований. Не остаются без внимания и проблемы безындукционного поддержания тока и подачи рабочего вещества в токамаке, что имеет определяющее значение для успешной работы любого прототипа токамака-реактора. Подобно традиционным тороидальным токамакам, в сферических токамаках предпринимаются усилия по реализации интегрированных сценариев разряда с одновременным достижением высокой устойчивости, хорошего удержания и большой доли неиндукционного тока. Исследования плазмы на сферических токамаках за последний год позволили существенно продвинуться как в вопросах понимания физических процессов в плазме, так и в области достижения предельных параметров. Получение режимов с ранним переходом в Н-моду позволило поддерживать квазистационарные условия на протяжении нескольких времен диффузии тока при большой величине нормализованного бета при высокой плотности плазмы и хорошем удержании. Зафиксированы рекордные времена удержания энергии в плазме при контринжекции нейтрального пучка. Предложена и реализуется новая методика подачи рабочего вещества в разряд. Обсуждаются также и другие важные результаты.

Большой коллектив авторов из Института ядерной физики СО РАН представил доклад "Нагрев и удержание плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3", где обсуждаются результаты экспериментов на установке ГОЛ-3, которая недавно была переведена в режим с гофрировкой магнитного поля на всей длине 12-метрового соленоида. Созданная многопробочная ловушка состоит из 55 ячеек длиной 22 см каждая с магнитными полями $B_{\max}/B_{\min} = 4,8/3,2$ Тл. В такой системе время продольного разлета плазмы существенно меньше, чем в обычном пробкотроне. Быстрый нагрев плазмы осуществляется релятивистским электронным пучком (энергия электронов ~1 МэВ, ток пучка ~30 кА, длительность импульсного электронного пучка ~8 мкс). Эксперименты по нагреву и удержанию плазмы проводились в диапазоне плотностей $(0,2-10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В докладе приводятся данные о нагреве электронной компоненты плазмы во время инжекции пучка в плазму, возникновении аномально низкой продольной электронной теплопроводности и проводимости плазмы, обсуждаются вопросы устойчивости системы релятивистский электронный пучок—плазма, связанные с токами в плазме. В докладе обрача-

ется внимание на быстрый нагрев ионной компоненты плазмы, обсуждаются особенности генерации потока нейтронов. В экспериментах показано, что ионная температура достигает величины 2 кэВ при плотности плазмы $\sim 10^{15}$ см⁻³ и времени удержания ~ 1 мс.

В обзорном докладе Е. П. Велихова, Л. Г. Голубчикова и А. В. Каракина рассмотрены возможности применения методов электрофизики для прогноза и воздействия на неглубокие землетрясения, которые представляют достойную альтернативу статистическим методам прогнозирования землетрясений, занимающим центральное место в современной сейсмологии. Анализ физических процессов в окрестности очагов землетрясений на глубинах верхней коры приводит к выводу о том, что при упругохрупком разрушении разломных и трещиноватых зон значительную роль играют дилатансионные процессы и фильтрация флюидов в окрестности очагов землетрясений. В результате становится возможным определять вероятные направления, в которых происходит понижение прочности участков земной коры. В докладе представлены также экспериментальные исследования по мониторингу и воздействию на очаги землетрясений. Оказалось, что мощные электрические импульсы, создаваемые МГД-генераторами, влияют на характер, частоту и амплитуду естественных мелких землетрясений. Большую эффективность в отслеживании миграции флюидов показал так называемый дифференциально-нормирующий метод, который позволяет проводить геоэлектрические измерения в режиме реального времени.

В обзорном докладе, представленном Б. А. Князевым от имени коллектива авторов из шести научных институтов г. Новосибирска, сообщается о результатах первых экспериментов, проведенных после запуска первой очереди лазера на свободных электронах. Лазер генерирует когерентное излучение в виде непрерывной последовательности 70-пс импульсов, следующих с частотой от 2,8 до 11,2 МГц, с плавной перестройкой длины волны в диапазоне 100—200 мкм при относительной ширине линии 0,3 %. Средняя мощность излучения при частоте 5,6 МГц достигает 200 Вт, пиковая — 600 кВт. Дифракционные эксперименты подтвердили высокую степень когерентности пучка, что позволило начать эксперименты по голографии в субмиллиметровом диапазоне. При фокусировке излучения параболическим зеркалом получен непрерывный оптический разряд в аргоне и воздухе при атмосферном давлении. Ведутся эксперименты по абляции материалов, исследованию пропускания органических и неорганических материалов и реальных сложных объектов, планируются эксперименты в различных областях фундаментальной физики, химии, биологии, минералогии, аэродинамики, атмосферной оп-

тики, а также прикладные исследования в интересах различных отраслей промышленности. Спроектированы элементы второй очереди лазера, которые позволят генерировать излучение высокой мощности в диапазоне длин волн 3—30 мкм.

Результаты крупномасштабного кинетического моделирования процессов формирования плазменных структур при неадиабатическом ускорении ионов в геомагнитном хвосте земной магнитосферы представлены в обзорном докладе Л. М. Зеленого, Е. Е. Григоренко и А. О. Федорова. Как показало моделирование, в результате неадиабатического взаимодействия заряженных частиц с токовым слоем в областях вблизи сепаратриссы, разделяющей замкнутые силовые линии магнитного поля и еще открытые линии, в зависимости от локальных условий могут формироваться узкие пучки ионов (называемые бимлетами), движущихся с большой скоростью к Земле вдоль силовых линий магнитного поля. Результаты численного моделирования были подтверждены экспериментальными наблюдениями бимлетов спутниками "Интербол" и "CLUSTER". Многоспутниковые измерения "CLUSTER" позволили получить дополнительную информацию о структуре бимлетов. Удалось оценить характерные размеры бимлета и установить, что бимлет представляет собой вытянутую вдоль магнитного поля динамическую плазменную структуру, продольный размер которой в сотни раз превышает поперечный.

В обзорном докладе М. А. Мокульского рассмотрены различные прикладные применения результатов геномики — науки, возникшей после успешного решения проблемы расшифровки генома человека и некоторых видов животных. С информационной точки зрения, геном, т. е. совокупность наследственных данных организма, представляет собой линейный текст, написанный так называемым "четырёхбуквенным алфавитом". Носителями текста являются молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Геном человека содержит около трех миллиардов букв, и определение их последовательности и было названо расшифровкой генома. Уже на ранней стадии работы стала ясна огромная ценность генетических текстов для решения самых разных задач — от установления личности или родства и обнаружения врожденных болезней до проблем эволюции живой природы, происхождения человечества и истории его распространения по Земле. Построено генетическое древо человечества и установлено, что предки современного человека появились в Южной Африке примерно 130 тыс. лет назад; были нанесены на карту потоки первых миграций человеческих племен и датированы основные этапы глобальной миграции, в частности разделение 60—70 тыс. лет назад исходной популяции на три группы, давшие начало трем расам —

африканской, монголоидной и европеоидной. Получено множество других данных о деталях переселений, слияний и исчезновений популяций вплоть до Нового Времени.

Доклад, представленный группой авторов Института математического моделирования РАН и Физического института им. П. Н. Лебедева РАН "Прямое численное моделирование и нейроматематический вейвлет-анализ турбулентного перемешивания" (докладчик Н. В. Змитренко), посвящен исследованиям, проведенным на материале более чем 250 численных расчетов развития неустойчивостей Релея-Тейлора и Рихтмайера-Мешкова. Создана обширная база данных. Она включает такие характеристики турбулентных течений, как поля гидродинамических величин (плотности, скорости и др.), законы изменения со временем ширины зоны перемешивания, массы тяжелой жидкости или газа, внедренной в зону перемешивания, кинетической энергии, компонент импульса и ряд других. В докладе получаемые характеристики турбулентности обсуждаются применительно к проблеме развития гидродинамических неустойчивостей в мишенях лазерного термоядерного синтеза.

Доклад представляет собой результат работы большого количества людей в течение трех лет. Эта работа проводилась в рамках проекта Международного научно-технического центра (МНТЦ), который посвящен гидродинамическим расчетам в идеальной модели и анализу неустойчивости. В постановки задачи авторы исходили из потребностей лазерного термоядерного синтеза — одной из возможностей изучения устойчивого или неустойчивого сжатия мишени в конкретных ситуациях.

Основными целями работ являлись формулировка задачи на гидродинамическом языке, постановка чисто гидродинамических задач, которые могли бы служить основанием для вывода в отношении лазерных мишеней, их исследование и обработка. В результате этой работы была создана большая база данных, включающая результаты около трехсот расчетов. Был предложен некий способ емкой и хорошей обработки результатов для получения конечных выводов.

Концепция ускорителей нового поколения, основанная на ускорении заряженных частиц кильватерными полями, излагалась в докладе И. Н. Онищенко из Национального научного центра "Харьковский физико-технический институт" (г. Харьков, Украина). В этом обзоре излагались физические принципы возбуждения интенсивных кильватерных полей в плазме и других средах мощным коротким лазерным импульсом или последовательностью электронных сгустков для высокоградиентного ускорения заряженных частиц с целью разработки концепции будущих компактных ускорителей для

физики высоких энергий и ряда высокотехнологичных приложений. Представлены последние результаты теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в США, Франции, Великобритании, Японии, Китае, России, Украине и других странах, по лазерному ускорению частиц в вакууме, ускорению электронов в плазме мощным лазерным импульсом и получению пучков с малым угловым и энергетическим разбросом, ускорению частиц кильватерными полями в диэлектрических средах. В докладе рассмотрена перспективная программа исследований схем лазерного ускорения в плазме, разработанная и выполняемая Сообществом новых ускорителей в Азии (AAAC — Asian Advanced Accelerators Community).

В обзорном докладе Г. М. Олейника изложены результаты экспериментов, проведенных на установке Ангара-5-1 в конце 2003 г. и в 2004 г. Основная часть экспериментов посвящена исследованию физики токовой имплозии многопроволочных сборок. Это исследование сжатого состояния Z-пинча и исследование динамики токового сжатия вложенных проволочныхборок. Другая часть экспериментов была посвящена исследованию взаимодействия излучения тераваттной мощности с веществом.

В обзорном докладе Г. И. Долгачева обсуждались вопросы, связанные с возможностью использования плазменного прерывателя тока (ППТ) в качестве выходного каскада сверхмощного импульсного генератора для инерциального УТС на основе ударного генератора с последовательным обострением мощности. В рамках программы "Байкал" создается установка "МОЛ", моделирующая основные узлы будущего генератора. В работе приведены схема экспериментального модуля плазменного прерывателя тока установки "МОЛ" и результаты экспериментов по решению специфических задач, возникающих при использовании плазменного прерывателя тока в конечном каскаде генератора "МОЛ". Показано, что применение внешнего магнитного поля позволяет подавить электронную бомбардировку электродов ППТ в момент замыкания его зазора плазмой и предотвратить наработку вторичной плазмы. Для предотвращения повторного замыкания ППТ предложено использование разделительного разрядника, что позволяет сначала выделить в ППТ энергию, необходимую для ускорения ионов, т. е. эрозии плазмы и создания вакуумного зазора, и только после этого перебросить ток в нагрузку. Для решения проблемы предимпульса предложено программируемое заполнение зазора ППТ плазмой. Погонная плотность пропускаемого через ППТ заряда увеличена до 20 мКл/см.

В докладе А. В. Елецкого представлен обзор современных методов получения фуллеренов, углеродных нанотрубок и других поверхностных углеродных наноструктур в неравновесной плазме. Рассмотрены эмиссионные, сорбционные и другие физико-химические свойства таких структур. Анализируются возможности прикладного использования углеродных наноструктур в электронике, энергетике, электрохимии и других высокотехнологичных направлениях. Обсуждаются пути развития методов получения углеродных наноструктур в значительных количествах.

В обзорном докладе А. Н. Старостина и В. К. Рериха приводится подробный независимый вывод уравнения состояния слабонеидеальной водородной плазмы. Мотивацией работы является требование высокой точности к уравнению состояния солнечной плазмы в связи с задачами современной гелиосейсмологии, позволяющей из результатов оптических измерений восстанавливать локальную скорость звука на Солнце с точностью, лучшей, чем 10^{-4} . Существующие выражения для второго вириального коэффициента в разложении термодинамического потенциала Гельмгольца для системы электронов и протонов по степеням активностей этих частиц содержат определенные процедуры устранения возникающих расходимостей, которые вызывают вопросы и нуждаются в независимой проверке. Представленное в докладе уравнение состояния используется для качественного выяснения точности различных физических и химических моделей. Приведены рассчитанные значения скорости звука и показателя адиабатической сжимаемости вдоль солнечной траектории для модельной водородной плазмы. В расчетах учитываются релятивистские поправки, влияние вырождения электронов, давление излучения в плазме, кулоновское взаимодействие в приближении Дебая-Хюккеля с дифракционными и обменными поправками, а также сходящиеся вклады от связанных состояний и состояний рассеяния.

Обзорный доклад Э. Е. Сона связан с мезоскопическим (гидродинамическим) описанием неоднородной плазмы. Рассматриваются различные методы описания ламинарного и турбулентного движения, исследования неустойчивостей и других задач, описания макроскопических движений многофазной плазмы: *a* — гидродинамическое описание каждой из фаз с учетом поверхностных явлений и граничных условий; *b* — методы теории обобщенных функций для описания гидродинамики многофазной плазмы в электромагнитных и гравитационных полях; *c* — методы функционала плотности для сквозного описания многофазной гидродинамики плазмы. По каждому из них даются математические постановки задач, методы решения, примеры.

На секцию "Магнитное удержание высокотемпературной плазмы" (председатель секции — А. И. Мещеряков) были представлены доклады (91 — из них 18 на устных и 73 на стендовых заседаниях), выполненные сотрудниками 15 российских научных организаций; 7 докладов подготовлены совместно с сотрудниками зарубежных научных центров из Германии, Франции, Италии, Великобритании и Узбекистана. На конференции были представлены результаты экспериментов, выполненных на действующих российских термоядерных установках: токамаках Т-10 (ИЯС РНЦ "Курчатовский институт"), Т-11М (ТРИНИТИ), ТУМАН-3М, ФТ-2, Глобус-М (ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН); стеллараторе Л-2М (ИОФ им. А. М. Прохорова РАН) и открытых ловушках АМБАЛ-М, ГДЛ и ГОЛ-3-П (ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН), а также на зарубежных токамаках и стеллараторах: ASDEX, TORESUPRA, W7-AS (ФРГ).

Исследователи проявили большой интерес к проблемам внутренних и внешних транспортных барьеров. В докладе К. А. Разумовой "Связь между внутренними транспортными барьерами и самосогласованными профилями в токамаках" (ИЯС РНЦ "Курчатовский институт") выдвинуты три гипотезы. Первая из них: в токамаках в *H*- и *L*-режимах профиль давления меняется слабо, несмотря на то что профили концентрации и электронной температуры изменяются значительно. В частности, в экспериментах на Т-10 при центральном ЭЦР нагреве профиль электронной температуры обостряется, и в то же самое время профиль плотности уплощается, так что профиль давления не меняется. Такого же рода эффекты наблюдаются в экспериментах на установке RTP, где профили плотности и электронной температуры изменяются в противофазе как при центральном, так и при нецентральной нагреве. Второе положение заключается в том, что на рациональных магнитных поверхностях с низкими значениями параметров *m* и *n* (характеризующие моды магнитогидродинамических колебаний плазменного шнура в тороидальном токамаке) наблюдается зона пониженного переноса, ширина которой обратно пропорциональна ширине (логарифмической производной величины запаса устойчивости плазменного шнура в токамаке). Это связано с отсутствием других рациональных поверхностей с высокими *m* и *n*, которые могут перекрываться и создавать зоны повышенного переноса. Если при этом вблизи рациональных поверхностей с низкими *m* и *n* создается профиль с малым широм, то образуется достаточно широкая зона с пониженным переносом, т. е. внутренний транспортный барьер. Третье утверждение предполагает, что плазма подобна квантовой системе с квантовыми числами *m* и *n*, совпадающими с модами МГД-колебаний. Это положение находит под-

тверждение в экспериментах на установке RTP, где после выключения ЭЦР-нагрева плазма существовала в состоянии со значениями параметров $m = 2$, $n = 1$, а после двух внутренних срывов спонтанно перешла в другое состояние, которое можно характеризовать "квантовыми числами" $m = 1$, $n = 1$.

На токамаке T-11M продолжаются эксперименты с литиевой диафрагмой. В докладе С. В. Мирнова "Эксперименты на токамаке T-11M с литиевой диафрагмой и перспективы использования литиевой КПС технологии в УТС" (ТРИНИТИ) представлен обзор экспериментов с литиевой диафрагмой в течение 1998—2004 гг. на токамаке T-11M. В результате проделанной работы стало возможным увеличить длительность импульса установки до 250 мс и добиться эффективного заряда плазмы, близкого к единице в центре плазменного шнура. Показано, что с помощью литиевой диафрагмы можно защитить первую стенку от срывов и от периферийной неустойчивости типа ELM, поскольку при больших тепловых потоках на такую структуру возникает плотное облако холодной плазмы, способное поглотить и переизлучить до 98 % приходящей энергии. В докладе предложен вариант структуры первой стенки токамака реактора DEMO с использованием капиллярно пористых структур, наполненных литием.

Как и в предыдущие годы, значительное число работ, представленных как на устной, так и на стендовой секциях, 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. Значительное продвижение на этом пути достигнуто на многопробочной ловушке ГОЛ-3. Так, в докладе В. В. Поступаева "Радиальная структура тока в многопробочной ловушке ГОЛ-3" (ИЯФ СО РАН) приведены результаты экспериментов с нагревом плазмы электронным пучком. В плазму инжектировался пучок с силой тока до 30 кА, при этом в линейной ловушке создается винтовое магнитное поле с широм. В результате наблюдаются многие явления, характерные для плазмы с током в токамаках, а именно, транспортировка пучка возможна, если запас устойчивости больше единицы, центральная зона оказывается неустойчивой по отношению к моде МГД-колебаний с $m = 1$ (аналог пилообразных колебаний). На ГОЛ-3 выполнены также измерения профиля запаса устойчивости, исследованы тиринг-неустойчивость и влияние шира маг-

нитного поля на желобковые моды в линейных магнитных ловушках.

На стеллараторе Л-2М (ИОФ РАН) 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-импульса 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. Энергетическое время жизни в этих режимах хорошо описывается международным стеллараторным скейлингом ISS95. При мощности нагрева 250 кВт и плотности плазмы $n_e = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ энергосодержание плазмы составляет величину $W = 650 \text{ Дж}$.

На стеллараторе Л-2М (ИОФРАН) был измерен также спектр мягкого рентгеновского излучения в режимах с низкой плотностью плазмы $n_e = (0,3-0,5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и мощностью импульса нагрева 200 кВт, который оказался немаксвелловским во всем диапазоне измеряемых энергий от 1 до 12 кэВ, что свидетельствует об отклонении функции распределения электронов по скоростям от максвелловского. В докладе Д. Г. Василькова "Исследование энергетического скейлинга на стеллараторе Л-2М" (ИОФ РАН) выполнен анализ базы данных на основании международного стеллараторного скейлинга ISS95. На основании этого анализа предложен скейлинг Sc04, наиболее полно описывающий экспериментальные данные стелларатора Л-2М.

По секции "Инерциальный термоядерный синтез" (председатель секции — Г. В. Иваненков) в программе конференции было заслушано 13 устных и 49 стендовых докладов из 21 научной организации России, двух научных организаций ближнего зарубежья и пяти — из зарубежных стран. Было проведено два устных и два стендовых заседания, на которых председательствовали С. Ю. Гуськов, Н. В. Змитренко, Г. В. Иваненков и Н. Г. Карлыханов.

Наибольший интерес среди устных сообщений вызвал доклад, представленный молодым сотрудником РФЯЦ-ВНИИТФ М. Н. Чижевским "Изучение генерации нейтронов в $D(d,n)^3\text{He}$ и $T(d,n)^4\text{He}$ реакциях на 10 ТВт пикосекундной лазерной установке СОКОЛ-П". Среди стендов повышенным вниманием пользовались сообщения И. Н. Косарева (РФЯЦ-ВНИИЭФ) "Генерация быстрых протонов при взаимодействии релятивистских лазерных импульсов с тонкой фольгой", Г. Г. Зукакишвили (ТРИНИТИ) "Радиационное сжатие пространственно неоднородной плазмы, образованной при имплозии многопроволочных лайнеров", а также доклады сотрудников ФИАН и ИТЭС ОИВТ, посвященные экспериментам по взрыву проволочек.

Секция "Физические процессы в низкотемпературной плазме" (председатель секции В. С. Воробьев) работала в рамках Совета РАН по проблеме "Физика низкотемпературной плазмы". Было представлено три обзорных доклада, 24 устных доклада и 56 стендовых сообщений из 42 научных организаций России, двух научных организаций ближнего зарубежья и пяти — из зарубежных стран. Было проведено два устных и два стендовых заседания.

Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям: 1 — различные виды разрядов (Лебедев, Гавриленко, Богданкевич, Рухадзе и др.); 2 — фазовые превращения, уравнивания состояния, транспортные и радиационные свойства (Апфельбаум, Левашов, Шпатаковская, Крайнов и др.); 3 — физико-химические процессы в низкотемпературной плазме (С. М. Стариковская, Подгорный, Майоров, Франк, Яковлев, Крайнов). По этим же направлениям можно разделить и стендовые доклады, хотя был ряд докладов, связанных с технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Результаты работы секции "Физические процессы в низкотемпературной плазме" конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России, применительно к новым аспектам физики низкотемпературной плазмы, связанным с технологией производства фуллеренов и нанотрубок. Наметился также прогресс в описании разрядов, протекающих в существенно неравновесных условиях. Проведено экспериментальное и численное исследование формирования сильноточных импульсных разрядов и эффективности генерации вакуумного ультрафиолетового излучения с помощью наносекундных импульсов с амплитудой до 50 кВ. Проведен термодинамический расчет уравнивания состояния плазмы смеси водорода с гелием и малыми добавками тяжелых элементов в диапазоне термодинамических параметров, соответствующих "траектории" и химическому составу реальной плазмы Солнца. Также достигнут определенный прогресс в описании термодинамических и гидродинамических явлений в конденсированных средах, приводящих к появлению низкотемпературной частицы, а затем и полностью ионизованной плазмы. Здесь речь идет о широкодиапазонных уравниваниях состояния и фазовых переходах во внешних полях. Вместе с тем следует отметить, что на конференции отсутствовали доклады, посвященные исследованиям элементарных процессов в низкотемпературной плазме.

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

На секцию "Физические основы плазменных и лучевых технологий" (председатель секции

проф. А. Ф. Александров) был представлен 51 доклад. Проведены два устных заседания, на которых были заслушаны 11 докладов, и одно стендовое заседание, на котором были доложены 40 докладов. На секции были представлены результаты работы главных научных центров России, таких как ведущие институты РАН (ИВТ РАН, ИММ РАН, ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, ИПРИМ РАН, ИПФ РАН, ИРЭ РАН, ИСЭ СО РАН, ИЯФ СО РАН), ВНИИ Электромеханики, ГНЦ ТРИНИТИ, НИИ Прикладной механики и электродинамики, ОАО "Радиотехнический институт им. академика А. Л. Минца", РНЦ "Курчатовский институт", РФЯЦ-ВИТФ, ЦНИИ Техномаш. Большое число докладов было доложено представителями научных коллективов ведущих учебных заведений России, а именно: Владимирского государственного университета, Дагестанского государственного университета, Иркутского государственного университета, Казанского государственного технического университета, Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, МГТУ им. Н. Э. Баумана, Казанского физико-технического института, НИИ Физики СПбГУ, МИФИ, Российского университета дружбы народов. Ряд работ представлен научными коллективами Украины (ИНЦ "Харьковский физико-технический институт", НАН Украины) и Узбекистана (НИИ Прикладной физики Национального университета Узбекистана им. М. Улугбека). Соавторами ряда докладов являлись представители Великобритании (Резерфордская лаборатория, Хилтон, Дидкот), Италии (Институт физики плазмы, ЕВРОАТОМ-ЕЯЕА-СНР, Милан), США (Университет им. Дж. Хопкинса, Лаборатория прикладной физики) и Ирана (Заньянский университет).

Многие доклады на устных и стендовых заседаниях были посвящены решению задач, связанных с применением газоразрядной плазмы и плазменных струй в сверхзвуковой аэродинамике. В докладе Н. А. Арделяна, В. Л. Бычкова, И. Б. Тимофеева и др. (МГУ им. М. В. Ломоносова) рассмотрено взаимодействие плазменных струй с горючими газами для ускорения воспламенения и улучшения горения в двигателях различного рода. Показана возможность организации воспламенения и горения стехиометрической пропан-воздушной смеси с помощью плазмотрона с мощностью ~15 кВт в потоке, идущем против направления струи и под углом к ней. В докладе А. Ф. Александрова, А. П. Ершова и др. (МГУ) рассмотрено применение магнитоплазменного компрессора для создания импульсной плазменной струи, инжестируемой в сверхзвуковой поток воздуха или смесь воздуха с пропаном. Для диагностики струи использовался автоматизированный измерительный комплекс на основе осциллографических, зондовых и

спектроскопических методов. Особое внимание уделено исследованию возможности применения зондового метода для измерения параметров плазменных формирований в сверхзвуковых потоках. В работе Н. А. Попова (НИИЯФ МГУ) представлены результаты численного моделирования параметров разрядного канала поперечного, по отношению к сверхзвуковому потоку газа, разряда. Расчеты проводились с использованием одномерной (осесимметричной) нестационарной модели, включающей достаточно полный набор плазмохимических реакций, а также описание процессов нагрева и газодинамического расширения плазменного канала в воздухе. Расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными результатами, полученными на физическом факультете МГУ при исследовании поперечного электродного разряда в сверхзвуковом потоке воздуха. В докладе А. Ф. Александрова, В. М. Шибкова и др. (МГУ) рассмотрены вопросы, связанные с оптимизацией режима создания низкотемпературной газоразрядной плазмы в сверхзвуковом потоке газа. Исследован процесс воспламенения сверхзвукового потока углеводородного топлива, инициируемый низкотемпературной плазмой объемного и поверхностного СВЧ-разрядов. Экспериментально показана возможность стабилизации горения сверхзвукового пропан-воздушного потока с помощью разряда, создаваемого в застойной зоне аэродинамического канала. В докладе Е. А. Филимоновой, В. А. Битюрина и др. (ИВТ РАН) рассмотрено влияние малой примеси окиси азота на воспламенение водорода и пропана в горячем воздухе в противоточных струях топлива и окислителя. Экспериментальному и теоретическому исследованию электрического разряда в пористой жидкости и анализу его возможных применений посвящен цикл работ Института прикладной механики РАН (В. Ю. Великий и др.). В докладе Н. В. Введенского и В. Б. Гильденбурга предлагается новый метод генерации терагерцевого (в диапазоне частот 1–10 ТГц) излучения, основанный на использовании явления трансформации электромагнитной энергии миллиметрового (субмиллиметрового) излучения при образовании длинного плазменного шнура, который создается в результате оптического пробоя газа внутри диэлектрического капилляра или в каустике аксиконной линзы. Проведено сопоставление полученных результатов с данными работ, в которых рассматривались сходные схемы генерации излучения различных частотных диапазонов при оптическом пробое газа в статическом электрическом поле. Большой интерес вызвало устное сообщение В. С. Седого (Институт сильноточной электроники СО РАН) "Основные закономерности образования нанопорошков при электрическом взрыве". В докладе представлены результаты экспериментального исследования электриче-

ского взрыва проволочек как метода получения наноразмерных порошков. Сопоставлены среднесплошностный размер частиц порошка и средние размеры кристаллитов исходной проволоочки. Показано, что для получения порошков существенную роль играет однородность джоулеа нагрева, а размер частиц зависит от скорости нагрева, уровня введенной энергии, радиуса проволоочки, ее начальной микроструктуры и характеристик окружающей среды. Определенный интерес вызвал доклад У. Юсупалиева (МГУ им. М. В. Ломоносова), посвященный экспериментальному исследованию процесса формирования плазменного тороидального вихря. На основе закона сохранения импульса получено уравнение для определения начальной скорости плазменного образования от длины импульсной струи. Доклад В. А. Иванова и др. (ИОФ РАН) посвящен определению плотности плазмы контрагированного сверхвысококачественного разряда на поверхности полиметилметакрилата по уширению спектральных линий водорода. Показано, что основным механизмом уширения линий водорода является эффект Штарка в электрических микрополях, создаваемых заряженными частицами плазмы СВЧ-разряда, а концентрация электронов в контрагированном СВЧ-разряде превышает 10^{18} см^{-3} . В работе И. Н. Карташова, М. В. Кузелева и А. А. Рухадзе (МГУ им. М. В. Ломоносова) промоделирована нелинейная динамика пучковой неустойчивости в плазме в конечном магнитном поле в условиях совместного влияния эффекта Черенкова и аномального эффекта Доплера. Работа В. С. Курбанисмаилова, О. А. Омарова и др. (Дагестанский государственный университет) посвящена численному моделированию функции распределения электронов по энергиям в плазме объемного разряда в гелии при высоких давлениях. В работе И. М. Минаева и др. рассматривается развитие скользящего разряда по границе раздела диэлектрик–газ в потоке газа, приводящее к образованию тангенциального разрыва скоростей потока на границе холодного и горячего газа и развитию неустойчивостей в потоке. Показано, что скользящий разряд по поверхности жидкого диэлектрика (масло, бензин, керосин и др.) может приводить к воспламенению или взрыву. В работе М. Ф. Федорова и М. А. Яковлева (ИОФ РАН, МГТУ им. Н. Э. Баумана) оценена вероятность возникновения быстрых фотоэлектронов при импульсном лазерном воздействии на металлическую поверхность. Целью работы С. С. Яркого и др. (МИФИ) является исследование проницаемости водорода через мембраны с поврежденным защитным слоем. Актуальность этих исследований связана с использованием для снижения потерь трития барьеров для проницаемости на поверхности blankets и охлаждаемых труб в проекте водоохлаждаемого свинцово-литиевого blankets.

Доклад Н. А. Горбунова (НИИ физики СПбГУ) посвящен исследованию эффективности прямого преобразования концентрированного светового излучения в электрический ток на основе фотовольтаического эффекта в плазме. Анализируется задача о предельном КПД преобразования световой энергии в фотоплазме. В докладе Р. Т. Галаяудинова и др. (Казанский государственный технологический университет) рассмотрены физические основы плазменно-лучевых технологий получения неоднородных оптических покрытий. Показано, что плазменная технология напыления с дальнейшей ионной имплантацией в совокупности с лазерным отжигом позволяет не только управлять оптическими параметрами материала, но и улучшать его эксплуатационные характеристики. В докладе М. Н. Казеева и др. (РНИЦ "Курчатовский институт") представлены характеристики современных высокоэффективных абляционных импульсных плазменных двигателей, разработанных в России, и оценена возможность их использования на малых космических аппаратах.

В целом работа секции "Физические основы плазменных и лучевых технологий" была успешной, в ней представлено значительное количество экспериментальных и теоретических работ, соответствующих мировому уровню исследований в этом направлении.

Доклады, представленные на конференцию, были опубликованы в сборнике "Тезисы докладов XXXII 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 XXXII Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу стала важнейшим событием, оказавшем 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, Федеральная целевая программа "Интеграция".

Организаторами прошедшей XXXII 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 ПЛАЗМАИОФАН, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Таким образом, на основании изложенного выше материала можно сделать следующие выводы.

1. Звенигородская конференция является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых России, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в нашей стране. Она прошла уже 32-й раз и собрала на свои заседания значительное количество 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 развития 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, 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. Остается значительным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными в научных центрах за пределами России, — в Европе, США, Японии. Это указывает на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых остаются высокими. Исследования российских ученых актуальны, обладают новизной как в подходе, так и в решении научно-технических задач, и востребованы мировым научным сообществом.

5. Участники конференции выражают сожаление по поводу того, что с 2005 г. наблюдается резкое снижение государственного финансирования науки в России. В частности, полностью прекращено государственное финансирование конкурсных программ по физике плазмы Федеральным агентством по науке и инновациям.

Статья поступила в редакцию 9 августа 2005 г.

Scientific researches on physics of plasmas and controlled thermonuclear fusion in Russia in 2004

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 XXXII conference on physics of plasma and controlled thermonuclear fusion was done. This conference was held from February 14 till February 18, 2005 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.

УДК 533.951

Особенности формирования микроволновой плазмы в источнике CERA-R

В. В. Андреев, А. А. Балмашнов, А. В. Калашников, А. М. Умнов
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Для формирования азимутально-симметричного веерообразного потока микроволновой плазмы используются коаксиальный резонатор и два дискообразных постоянных магнита. Экспериментально установлено, что концентрация частиц в создаваемой плазме может превышать критическое значение. Результаты вычислительного эксперимента находятся в соответствии с результатами реального эксперимента и указывают на возможность создания на основе разработанного источника плазмы генератора мягкого рентгеновского излучения.

В настоящее время микроволновый разряд широко используется в различных технологических процессах. При этом расширение области его применения определяет неизменный интерес к процессам, протекающим в этом типе разряда, и устройствам, его реализующим [1, 2]. Многообразие технических решений, применяемых в этих устройствах, является следствием необходимости их использования для той или иной цели, в том или ином конкретном процессе. Среди этого многообразия особое место занимают источники плазмы, создание которой осуществляется в условиях какого-либо резонансного механизма взаимодействия, в частности электронного циклотронного резонанса. Резонансные механизмы взаимодействия определяют высокую энергетическую эффективность устройств, возможность управления энергетическим спектром заряженных частиц, а также возможность пространственной локализации параметров рабочей среды (плазмы, диссоциированных молекул и т. д.) в достаточно широком диапазоне давлений рабочего газа [3]. В таком типе источников часто используются полые резонаторы [4, 5], структура полей в которых и пространственное распределение величины стационарного

магнитного поля позволяют организовать резонансное взаимодействие в желаемой области разряда [6]. При этом, как правило, в этих источниках формируется аксиально-симметричный поток плазмы. Для создания азимутально-симметричного веерообразного потока плазмы в радиальном направлении авторами предлагается источник CERA-R.

Микроволновый источник плазмы CERA-R позволяет формировать в радиальном направлении веерообразный поток заряженных частиц, концентрация которых может достигать $(1-2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ при электронной температуре $T_e > 10 \text{ эВ}$.

Схематически источник представлен на рис. 1.

Источник плазмы состоит из коаксиального резонатора и двух дискообразных постоянных магнитов, создающих в области формирования плазмы ($r > 2 \text{ см}$) плавно спадающее в r -направлении азимутально-симметричное магнитное поле пробочной конфигурации. Геометрические размеры резонатора и параметры постоянных магнитов были выбраны таким образом, чтобы была обеспечена компактность источника в целом.

Для возбуждения резонатора использовался магнетронный генератор мощностью до $P_{hf} = 250 \text{ Вт}$,