

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.9

Основные итоги исследований в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в России в 2008 году

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

Представлен обзор научных работ и приведены данные анализа основных направлений исследований, представленных в докладах на ежегодной XXXVI Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся с 9 по 13 февраля 2009 года в городе Звенигороде Московской области.

PACS: 52.25.-b; 52.55.-s

Ключевые слова: международная конференция, физика плазмы, термоядерный синтез, плазменные технологии.

XXXVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде с 9 по 13 февраля 2009 года.

На конференции были представлены 332 научных доклада из 87 российских и 27 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общая численность авторов докладов составила около 900 человек.

Научные доклады (число докладов указано цифрами в скобках) представили следующие *российские научные центры*:

1. Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва (57).
2. Государственный научный центр "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований", г. Троицк, Московская обл. (38).
3. Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва (33).
4. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва (30).
5. Объединенный институт высоких температур РАН, Москва (21).
6. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск (18).
7. Казанский государственный технологический университет, г. Казань (17).
8. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург (14).

9. Московский физико-технический институт (Государственный университет), г. Долгопрудный, Московская обл. (13).

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

11. Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск (11).

12. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва (10).

13. Институт математического моделирования РАН, Москва (9).

14. Московский инженерно-физический институт (Технический университет), Москва (9).

15. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва (8).

16. Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород (8).

17. Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново (7).

18. ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", С.-Петербург (6).

19. Дагестанский государственный университет, г. Махачкала (5).

20. Институт химии растворов РАН, г. Иваново (5).

21. Российский университет дружбы народов, Москва (5).

22. Казанский государственный университет, г. Казань (4).

23. Костромской государственный университет им. Н. А. Некрасова, г. Кострома (4).

24. Институт динамики геосфер РАН, Москва, (3).
25. Институт органической химии им Н. Д. Зелинского РАН, Москва (3).
26. ФГУП "Московский радиотехнический институт РАН", Москва (3).
27. ФГУП "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова", С.-Петербург (3).
28. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл. (3).
29. Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург (3).
30. Томский государственный университет, г. Томск (3).
31. ФГУП "Центр Келдыша", Москва (3).
32. Институт радиотехники и электроники РАН им. В. А. Котельникова, Фрязинский филиал, г. Фрязино, Московская обл. (3).
33. Институт неорганических материалов им. А. А. Бочвара, Москва (2).
34. Институт механики МГУ им. Ломоносова, Москва (2).
35. Институт астрономии РАН, Москва (2).
36. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва (2).
37. Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск (2).
38. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, Москва (2).
39. Московский авиационный институт (Государственный технический университет), Москва (2).
40. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет), Москва (2).
41. Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, г. Саранск (2).
42. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск (2).
43. НИИ Энергетического машиностроения МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва (2).
44. НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына МГУ, Москва (2).
45. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалея, Москва (2).
46. Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская обл. (2).
47. ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения Роскосмоса", г. Королев, Московская обл. (2).
48. Академия космонавтики РАЕН, Москва (1).
49. Военно-воздушная инженерная академия им. Н. Г. Жуковского, Москва (1).
50. Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности, Москва (1).
51. НПП "Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики", Москва (1).
52. Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, Москва (1).
53. Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина, Москва (1).
54. Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий механики и оптики, С.-Петербург (1).
55. Институт безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва (1).
56. Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д. К. Беляева, г. Иваново (1).
57. Иркутский государственный университет, г. Иркутск (1).
58. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н. В. Пушкина РАН, г. Троицк, Московская обл. (1).
59. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва (1).
60. Институт молекулярной генетики РАН, Москва (1).
61. Институт автоматизации проектирования РАН, Москва (1).
62. Институт океанологии РАН, Москва (1).
63. Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва (1).
64. Камская государственная инженерно-экономическая академия, г. Набережные Челны, Самарская обл. (1).
65. Институт прикладной механики РАН, Москва (1).
66. ООО "Иоффе Фьюжн Текноложи", Санкт-Петербург (1).
67. Институт физико-химической биологии им. А. Н. Белозерского МГУ, Москва (1).
68. Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва (1).
69. Казанский государственный технический университет, г. Казань (1).
70. Московский автомобильно-дорожный институт (ГТУ), Москва (1).
71. Московский институт кибернетической медицины, Москва (1).
72. Московский государственный институт электронной техники, г. Зеленоград (Москва) (1).
73. Московская медицинская академия им. И. М. Сеченова, Москва (1).
74. Научно-исследовательский институт импульсной техники, Москва (1).
75. Государственный НИИ прикладной механики и электродинамики, Москва (1).
76. Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума Ростехрегулирования, Москва (1).

77. ФГУП «ФНПЦ "Прибор"», Москва (1).
78. Российский государственный технический университет им. К. Э. Циолковского (МАТИ), Москва (1).
79. Государственная корпорация РОСАТОМ, Москва (1).
80. Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара (1).
81. ОАО «Специальное конструкторско-технологическое бюро "Ксенон"», г. Зеленоград, (Москва) (1).
82. ООО "Спектр-Микро", С.-Петербург (1).
83. Санкт-Петербургский институт машиностроения, С.-Петербург (1).
84. Санкт-Петербургский университет МВД России, С.-Петербург (1).
85. Самарский филиал ФИАН, г. Самара (1).
86. Государственный научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики, Москва (1).
87. Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения (1).

Иностранные научные организации, представившие доклады на конференции.

1. Alfvén Laboratory, KTH, Stockholm, Sweden (1).
2. Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, USA (1).
3. Science Applications International Corporation (1).
4. Chevron Energy Company, Richmond, CA USA (1).
5. Drexel University, Philadelphia, PA USA (1).
6. Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, Dresden, Germany (1).
7. Ghent University, Gent, Belgium (1).
8. Helsinki University of Technology, Helsinki, Finland (1).
9. Institut für Theoretische Physik I, Heinrich Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Germany (1).
10. Institut für Theoretische Physik und Astrophysik, Kiel, Germany (1).
11. Université Pierre et Marie Curie, Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, Paris, France (1).
12. Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik, Garching, Germany (1).
13. Max-Planck-Institut für Physik, München, Germany (1).
14. Excellence Cluster "Origin and Structure of the Universe", Garching, Germany (1).
15. Université de Provence, Marseille, France (1).
16. JET-EFDA, UK (1).
17. Национальный университет Чеджу, г. Чеджу, Республика Корея (1).
18. Калэмская лаборатория, г. Калэм, Великобритания (1).

19. Технический университет, г. Кемниц, Германия (3).
20. Университет А. Пуанкаре, г. Нанси, Франция (1).
21. Институт физики плазмы, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина (6).
22. Восточно-украинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина (2).
23. Институт прикладной физики Национального университета Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан (1).
24. Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза, г. Варшава, Польша (1).
25. Институт экспериментальной и теоретической физики, г. Алматы, Казахстан (1).
26. Институт электронной физики НАН Украины, г. Ужгород, Украина (1).
27. Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина (3).

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.

В рамках конференции работала специальная секция по проблемам ИТЭР — International Tokamak Experimental Reactor (ITER).

На конференции состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 16 обзорных докладов об отечественных и мировых результатах исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям. Этим же направлениям была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых было представлено 89 устных и 243 стендовых доклада.

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

В 2009 г. отмечались юбилеи четырех выдающихся ученых нашей страны, которые внесли огромный вклад в развитие науки о плазме и управляемом термоядерном синтезе.

- Доклад, посвященный 100-летию со дня рождения академика Льва Андреевича Арцимовича, сделал **В. С. Стрелков (ИЯС, РИЦ "Курчатовский институт")**. Роль и влияние выдающегося ученого и организатора науки (лауреата Ленинской, Сталинской и Государственной премий,

Героя Социалистического Труда) на успехи в исследованиях по созданию и удержанию в магнитных полях высокотемпературной плазмы не только в нашей стране, но и во всем мире, по единодушному признанию всего международного сообщества была определяющей.

Л. А. Арцимович был инициатором и руководителем программы по управляемому термоядерному синтезу в СССР и лидером термоядерных исследований в мировом научном сообществе. Профессор Московского государственного университета, академик, он вел большую научно-организационную, общественную и преподавательскую работу: был секретарем Отделения общей физики и астрономии Академии наук СССР, активным членом Пагоушского движения.

20 февраля 2009 г. исполнилось 90 лет известному физика, крупному специалисту в области ускорителей заряженных частиц, физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза, лауреату Ленинской и Государственной премий, д-ру физ.-мат. наук, профессору *Матвею Самсоновичу Рабиновичу*.

Воспоминаниями о совместной работе с ним поделилась **Д. К. Акулина (ИОФ РАН)**. С начала 60-х годов научные интересы Матвея Самсоновича устремились в новую область науки — физику плазмы и управляемого термоядерного синтеза. М. С. Рабинович был одним из создателей и лидером стеллараторной программы в СССР. В руководимой им лаборатории физики плазмы ФИАН разработан и запущен ряд уникальных установок, что позволило получить новые фундаментальные результаты по нагреву и удержанию горячей бесточковой плазмы, и способствовало возрождению стеллараторной программы во многих странах мира.

Рабинович — один из организаторов и бессменный заместитель председателя Совета "Физика плазмы" АН СССР. Практически все конференции, симпозиумы и семинары по физике плазмы как в СССР, так и за рубежом организовывались и проводились при его непосредственном участии. Матвей Самсонович — инициатор создания и бессменный главный редактор журнала "Физика плазмы" (в 1975—1982 гг.) завоевавшего заслуженное международное признание.

В конце 2008 г. исполнилось бы *80 лет Борису Борисовичу Кадомцеву* — выдающемуся физика, который в течение четверти века после ухода из жизни Л. А. Арцимовича был лидером отечественной программы УТС. Краткие итоги его научной деятельности подвел директор Института ядерного синтеза РНЦ "Курчатовский институт" академик В. П. Смирнов. Было отмечено, что академиком Б. Б. Кадомцевым был решен вопрос о действующем поле в плазме, проанализированы несколько типов магнитных ловушек, исследовано

несколько типов неустойчивостей плазмы. Значительная часть выдающихся работ Б. Б. Кадомцева в области физики плазмы выполнена в тесной связи с экспериментом: теория токово-конвективной неустойчивости плазмы в тлеющем разряде, теория конвекции плазмы в осесимметричной открытой ловушке. Полученные Б. Б. Кадомцевым результаты имеют непреходящую ценность. Они легли в фундамент новой науки — физики высокотемпературной плазмы.

• В декабре 2008 г. исполнилось бы *80 лет* со дня рождения *Гургена Ашотовича Аскарьяна* (1928—1997 гг.) выдающегося физика, сочетавшего в своей деятельности черты специалиста высочайшей квалификации в области экспериментальной и теоретической физики. *Доклад о жизни и деятельности Г. А. Аскарьяна* сделал **проф. Б. М. Болотовский (ФИАН)**. Еще на студенческой скамье он предложил новый способ регистрации быстрых заряженных частиц на основе перегретой жидкости. Тот факт, что Г. А. Аскарьян первый высказал идею пузырьковой камеры, но не опубликовал ее, мало кому известен. Им было также открыто новое нелинейное явление в физике — самофокусировка мощного пучка света в средах, включая плазму. Это открытие Г. А. Аскарьяна было признано при его жизни и удостоено Ленинской премии. Открытое и исследованное Г. А. Аскарьяном явление радиоизлучения ливней заряженных частиц, которые развиваются в атмосфере под действием быстрых частиц, попадающих на Землю из космоса, получило название "эффекта Аскарьяна". В последние годы регистрация ливней с помощью эффекта Аскарьяна получила заметное развитие, многие радиоастрономические станции в расписании своей работы выделяют время на такую регистрацию. Это только малая часть работ выдающегося ученого Г. А. Аскарьяна.

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

• В докладе **П. Н. Алексеева, Э. А. Азизова, Е. П. Велихова, В. А. Лопаткина, В. П. Смирнова, Ю. С. Стребкова, С. А. Субботина, О. Г. Филатова и А. Л. Шимкевича (РНЦ "Курчатовский институт", ТРИНИТИ, НИКИЭТ, НИИЭФА)** "Использование термоядерных нейтронов в ядерной энергетике" рассмотрены концептуальные схемы термоядерных источников нейтронов на основе токамаков и других термоядерных систем.

Ядерная энергетика в перспективе обеспечивает необходимое для устойчивого развития масштабное безэмиссионное производство энергии, обладающее долгосрочной ресурсной базой и слабой зависимостью от региона добычи первичного энергоносителя — природного урана. Однако существующая технологическая база недостаточна для перехода к крупномасштабной ядерной энергетике (ЯЭ) как энергосистемы будущего. Причиной этого является нерешенность на сегодня следующих основных проблем:

- исчерпаемость экономически приемлемых залежей природного делящегося материала урана-235 (эффективный ресурс меньше, чем у нефти и газа);

- организация хранения отработанного ядерного топлива;

- угрозы неконтролируемого использования ядерных материалов.

Без решения этих проблем ЯЭ не может стать основой устойчивого развития. Перевод ядерной энергетике на самообеспечение топливом к середине этого века можно было бы обеспечить за счет замыкания ядерного топливного цикла и интенсивного ввода в систему ядерной энергетике быстрых реакторов с расширенным воспроизводством топлива. Однако задача создания коммерческих быстрых реакторов с высокой избыточной наработкой топлива до сих пор не решена в промышленном масштабе. Ряд нерешенных проблем технического характера, проблем безопасности, экономических проблем и проблем нераспространения заставляют разработчиков ориентироваться на проекты быстрых реакторов с менее интенсивным бридингом. Такой подход может создать напряженность в топливном обеспечении ядерной энергетике и существенно ограничить темп роста ее мощностей. Для снижения подобного риска можно использовать термоядерные нейтроны, что целесообразно как для наработки ядерного и термоядерного топлив, так и трансмутации долгоживущих радионуклидов. При полном замыкании топливного цикла в режиме самообеспечения топливом сырьевая проблема ядерной энергетике потенциально теряет предмет конфронтации в борьбе за мировые энергетические ресурсы.

- В докладе **А. В. Бурдакова (Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирского госуниверситета и Новосибирского технического университета)** "*Многопробочная ловушка ГОЛ-3: состояние и перспективы*" приведен обзор новых экспериментов на многопробочной ловушке ГОЛ-3, которая представляет собой 12-метровый соленоид с гофрированным магнитным полем.

Основной нагрев плазмы в такой ловушке осуществляется мощным электронным пучком.

В экспериментах варьировались как параметры плазмы (плотность в диапазоне $10^{20} \div 10^{22} \text{ м}^{-3}$), так и параметры греющего электронного пучка (длительность, диаметр). Основным результатом исследований состоит в том, что нагрев и удержание плазмы определяются коллективными процессами, которые улучшают эффективность нагрева и продольного удержания плазмы. На основе полученных данных оцениваются перспективы многопробочной ловушки как термоядерного реактора и обсуждаются следующие шаги в развитии установки.

- В докладе **А. В. Красильникова (РНЦ "Курчатовский институт", НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, ИПФ РАН, Государственная корпорация Росатом, ВНИИНМ им. А. А. Бочвара, НИКИЭТ им. Н. А. Доллежалы, ВНИИКП)** "*Результаты разработки и изготовления систем ИТЭР в рамках ответственности РФ в 2008 году*" были представлены первые итоги работ по созданию систем ИТЭР. Ответственность за изготовление всех основных систем ИТЭР распределена между участниками этого международного проекта. Российская сторона должна изготовить для организации ИТЭР: 1 — обмотку полоидального поля PF1; 2 — часть сверхпроводника для магнитной системы ИТЭР на основе сплавов ниобий—олово (Nb_3Sn) и ниобий—титан (NbTi); 3 — верхние патрубки вакуумной камеры; 4 — 20 % защитных модулей бланкета и элементов первой стенки, а также все соединители модулей бланкета; 5 — устройство типа "дом" дивертора; 6 — провести испытания компонент первой стенки дивертора, обращенных к плазме; 7 — разрядную аппаратуру; 8 — восемь гиротронов; 9 — девять диагностических систем.

В институтах и на промышленных предприятиях РФ начато изготовление оборудования для ИТЭР в соответствии с разработанными Программой качества и графиками изготовления для каждой конкретной системы. В соответствии с распоряжением Правительства РФ функции Агентства ИТЭР в России возложены на РНЦ "Курчатовский институт".

На заседании в июне 2008 г. Совет ИТЭР одобрил спецификацию и общий график сооружения ИТЭР, тем не менее в результате проведенного в 2007—2008 гг. обзора проекта была выявлена необходимость в некоторых его изменениях и усовершенствованиях.

Одна из важнейших задач сегодняшнего дня — оптимизация распределения дополнительных работ, выявленных в результате обзора проекта. В докладе были представлены основные результаты обзора проекта и статус дополнительных

проектных работ, выполняемых и планируемых в Агентстве ИТЭР РФ.

- В докладе **В. К. Гусева, В. В. Дьяченко, Ю. В. Петрова, Н. В. Сахарова (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН)** «Статус и перспективы исследований на сферическом токамаке "ГЛОБУС-М"» представлены экспериментальные и теоретические результаты, полученные на сферическом токамаке "ГЛОБУС-М" за последние два года в рамках исследований по программе УТС и физике высокотемпературной плазмы.

На токамаке "ГЛОБУС-М" удалось достичь высоких значений плазменных параметров при умеренной мощности дополнительного нагрева 0,2—0,6 МВт. Удельная мощность нагрева плазмы достигала 1—1,5 МВт/м³. Достигнуты пределы Гринвальда и Мураками по плотности плазмы. Средняя плотность плазмы в тороидальном магнитном поле 0,4 Тл при токе в плазме 0,2 МА достигла величины $1,2 \cdot 10^{20}$ м⁻³. Получено рекордное значение коэффициента Сайкса—Тройона, $\beta_N = \beta_T B / I_p$, близкое к величине 6 % (Тл/МА) и большие значения $\beta_T \approx 15$ % и $\beta_p \approx 70$ %.

Существенно, что в отличие от других сферических токамаков "ГЛОБУС-М" может устойчиво работать при низком значении запаса устойчивости $q_{95} \sim 3$ —4,5 ($q_{cyl} < 1,3$) и малом зазоре между плазмой и стенкой (4—5 см).

- Работа, о которой доложил **С. В. Мирнов (ФГУП РФ ТРИНИТИ)** «Прогресс "литиевых" токамаков и стелларатора в 2008 году» представляет собой обзор результатов, полученных в 2008 г. на токамаках и стеллараторе TJ-II с применением литиевых диафрагм и лимитеров.

Критическим вопросом для всех плазменных установок является загрязнение примесями центральных областей плазменного шнура. Главным сюрпризом всех литиевых экспериментов на токамаках (TFTR, T-11M, FTU, CDXU, NSTX, T-10) стало весьма незначительное проникновение лития в центр шнура (литиевое экранирование). Важный параметр высокотемпературной плазмы, удерживаемой в токамаках (эффективный средний заряд ионов плазмы) Z_{eff} , который обычно приближается к 2, после литиизации стенок токамаков падал почти до 1. Линии примесей металлов стенок камеры и кислорода практически исчезли из оптических и ультрафиолетовых спектров и, таким образом, в спектрах плазмы доминировало только излучение, обусловленное присутствием ионов лития.

- В докладе **С. Ю. Гуськова (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН)** "Быстрое зажигание мишеней инерциального синтеза детонирующим гидродинамическим потоком" обсуж-

далось состояние исследований в области быстрого зажигания мишени с помощью мощных драйверов — импульсных лазеров, источников энергии на основе пучков заряженных частиц и ускоренных макрочастиц вещества, — современных перспективных подходов к проблеме осуществления управляемой термоядерной реакции при инерциальном способе удержания плазмы.

В основе концепции быстрого зажигания лежит принцип разделения процессов сжатия и нагрева плазмы при воздействии двух синхронизированных драйверов, один из которых медленно сжимает вещество мишени по "холодной адиабате", а другой обеспечивает быстрый нагрев небольшой части предварительно сжатого термоядерного горючего и инициирует распространение волны термоядерного горения. В докладе представлены программы двух наиболее масштабных на сегодняшний день проектов быстрого зажигания HiPER и FIREX, осуществление которых началось, соответственно, в Европейском Союзе и Японии.

Обсуждаются перспективы использования различных способов быстрого зажигания: ускоренными электронами и ионами из лазерной плазмы, пучком тяжелых высокоэнергичных ионов, импульсом рентгеновского излучения и гидродинамическим потоком вещества. Основное внимание уделено последнему из указанных способов. Представлены результаты экспериментов, выполненных в **Институте лазерной инженерии (Япония)** в рамках работ по проекту FIREX, по созданию высокотемпературной плазмы и генерации нейтронов при ударе макрочастицей, ускоренной под действием лазерного импульса до ультравысоких скоростей 600—800 км/с. Обсуждается новое предложение быстрого зажигания детонирующим гидродинамическим потоком, который формируется при ускорении и сжатии термоядерного вещества в коническом канале — составной части мишени инерциального синтеза. Этот подход позволяет осуществлять быстрое зажигание при скорости вещества гидродинамического потока 300—500 км/с, значительно меньшей, чем в традиционном подходе ударного зажигания, для которого необходимы скорости 1500—2000 км/с.

- В докладе **П. С. Стрелкова (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН)** "Экспериментальная плазменная релятивистская СВЧ-электроника" основное внимание уделено достижениям экспериментальных исследований в области создания релятивистских СВЧ-генераторов и усилителей, которые состоят в следующем:

создан плазменный СВЧ-генератор мощностью 50 МВт с перестройкой частоты от 4 до 28 ГГц. Показано, что наблюдается черенковское возбуждение медленной плазменной волны с модой E_{01} ;

обнаружен эффект подавления плазменной электромагнитной волны, отраженной от конца плазменного волновода за счет взаимодействия ее с быстрой циклотронной волной электронного пучка. Это позволило уменьшить паразитную обратную связь и создать плазменный СВЧ-усилитель мощностью 60—90 МВт, с полосой усиления от 9 до 13 ГГц, с коэффициентом усиления до 30 дБ;

обнаружен эффект подавления шумов плазменного СВЧ-усилителя при переходе его в нелинейный режим. В результате на выходе усилителя наблюдается монохроматическое излучение мощностью 60 МВт на частоте входного сигнала с мощностью шумов не более 3 МВт. Полоса усиления 2—3 ГГц. На частоте 3 ГГц достигнуто высокое усиление (32 дБ), что открывает возможность плавной перестройки частоты выходного излучения в диапазоне частот 2—3 ГГц с использованием промышленных ламп бегущей волны;

запущен плазменный релятивистский СВЧ-генератор в импульсно-периодическом режиме. Частота излучения в каждом импульсе управляется компьютером по заранее выбранной программе. Частота повторения СВЧ-импульсов 50 Гц, мощность излучения 50 МВт, полоса перестройки частоты 6—20 ГГц.

• Обзорный доклад **Н. В. Введенского (ИПФ РАН)** "Лазерно-плазменные схемы генерации терагерцового излучения" посвящен обзору результатов недавних экспериментальных и теоретических исследований явления генерации широкополосного терагерцового излучения (с центральной частотой 0,5—10 ТГц), возникающего в различных схемах пробоя газов (включая и воздух атмосферного давления) интенсивными фемтосекундными лазерными импульсами.

Излучающей средой в этих схемах является плотная лазерная плазма, которая может представлять собой как мелкомасштабный (дипольный) излучатель, формируемый при фокусировке лазерных импульсов в газ низкого давления короткофокусной сферической линзой, так и достаточно протяженная (с длиной 1—10 см и более) лазерная искра, формируемая при фокусировке конической (аксиконной) линзой или в результате развития филаментационной (самофокусирующей) неустойчивости.

Представлены теоретические модели, дающие хорошее согласие с результатами экспериментов, включающие в себя квантовомеханические и полуклассические подходы к расчету плотности низкочастотных токов, возбуждаемых в плазме в процессе оптического пробоя, и основанные на решении точных уравнений Максвелла самосогласованные модели расчета параметров порождаемого этими токами терагерцового излучения.

Определены оптимальные условия для наиболее эффективной генерации терагерцового излучения и возможные схемы получения сверхмощного излучения (гигаваттного уровня мощности) при использовании ультракоротких ионизирующих лазерных импульсов.

• В докладе **А. Ф. Александрова, В. А. Битюрин, В. М. Шибкова (Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова)** "Плазменная аэродинамика: проблемы, итоги, перспективы" рассмотрены следующие проблемы: оптимизация режима создания низкотемпературной газоразрядной плазмы в сверхзвуковом потоке газа; влияние сверхзвукового потока на основные характеристики газоразрядной плазмы; влияние низкотемпературной плазмы на характеристики сверхзвукового потока вблизи поверхности обтекаемого тела; воспламенение сверхзвукового потока углеводородного топлива, инициируемое низкотемпературной газоразрядной плазмой; стабилизация горения сверхзвукового потока углеводородного топлива с помощью разряда, создаваемого в застойной зоне аэродинамического канала, и ряд других проблем.

Показана перспективность использования газоразрядной плазмы в различных областях сверхзвуковой плазменной аэродинамики. Для развития современной авиации требуются поиск и разработка новых эффективных средств, позволяющих управлять характеристиками газового потока вблизи поверхности летательного аппарата, контролировать передачу тепла и массоперенос в пограничном слое, снижать поверхностное трение, задерживать ламинарно-турбулентный переход, управлять отрывом потока, уменьшать время воспламенения и управлять процессом горения сверхзвуковых потоков горючего в прямоточном двигателе.

Для решения этих проблем используются различные типы газовых разрядов. В последнее время интенсивно развивается новое направление в физике плазмы, а именно, сверхзвуковая плазменная аэродинамика.

• Был представлен обзорный доклад **А. В. Филиппова (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)** "Приложения плазмы с конденсированной дисперсной фазой". Пылевая плазма вследствие ее ряда уникальных свойств широко используется в различных приложениях. Одним из наиболее интересных приложений пылевой плазмы является автономный фотovoltaический источник электрической энергии с применением радиоактивного топлива в виде микронных пылевых частиц, левитирующих в составе плазменно-пылевого облака в рабочей газе — конвертере энергии быстрых заряженных частиц радиоактивного распада в ультрафиолетовое излучение.

Придание радиоактивному топливу форму частиц микронного размера значительно снижает потери энергии частиц распада в самом радиоактивном материале. Под действием ионизирующего излучения в специально подобранной газовой смеси инертных газов, рабочей компонентой которой является ксенон, с высокой эффективностью образуются эксимерные молекулы. Они высвечивают ультрафиолетовые фотоны с длиной волны около 172 нм, которые, в свою очередь, за счет фотovoltaического эффекта индуцирует ЭДС в широконном полупроводнике.

Основное преимущество предлагаемого метода по сравнению с существующими состоит в отсутствии низкоэффективного теплового цикла и ограничений мощности батареи. В настоящем докладе были представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований пылевой плазмы с ионизацией газа пучком быстрых электронов, направленных на создание физических основ предлагаемой атомной батареи.

• В докладе **Ю. В. Мартыненко, А. М. Житлухина, М. В. Ковальчука, В. С. Койдана, В. И. Крауза, В. А. Молдавера, О. И. Обрезкова, В. П. Смирнова, В. Г. Станкевича, Л. Н. Химченко (РНЦ "Курчатовский институт")** "*Наноструктуры в управляемом термоядерном синтезе и плазменных технологиях*" дан обзор современного состояния проблем термоядерного синтеза, связанных с образованием пыли и наноструктурированных пленок в термоядерных установках, в первую очередь в токамаках. Показано влияние пыли и наноструктур на режимы разрядов, безопасность и экономичность реактора.

Особое внимание уделяется накоплению трития в наноструктурированных продуктах эрозии. Обсуждаются образование пыли и осажденных пленок, их состав и структура. Приводятся данные экспериментов на токамаках, в плазменных ускорителях, рассматриваются различные теоретические модели, анализируются результаты исследований пыли и наноструктурированных пленок разными методами диагностики, включая исследование зондовым микроскопом в токамаках между импульсами и методами синхротронного излучения.

Полученные данные сопоставляются с требованиями, предъявляемыми к международному экспериментальному токамаку-реактору ИТЭР. Обсуждаются пути уменьшения вредного влияния наноразмерной пыли и наноструктурированных пленок.

Рассматриваются перспективы использования пыли для стабилизации разряда и улучшения параметров работы токамаков. Представлены плазменные и электрофизические методы производст-

ва наноматериалов и наноструктурированных покрытий, развитые в Институте ядерного синтеза РНЦ "Курчатовский институт", а также примеры их внедрения в производство.

• Авторы доклада **К. П. Зыбин, В. А. Сирота, А. С. Ильин, А. В. Гуревич (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН)** "*Лагранжевы структурные функции гидродинамической турбулентности*" предложили новую фундаментальную теорию, построенную на уравнении Навье—Стокса для несжимаемой жидкости в пределе бесконечно больших чисел Рейнольдса. Основная идея подхода заключается в том, что полностью однородная и изотропная гидродинамическая турбулентность в такой несжимаемой жидкости невозможна. Из-за бесконечной скорости звука в такой среде влияние границ (стенок) передается во все точки жидкости независимо от объема. Показано, что именно эта "крупномасштабная" часть давления оказывается определяющей в развитии нитевидных вихревых структур-филаментов. В филаментах достигаются наибольшие значения завихренности. Эти структуры обеспечивают перемежаемость турбулентности. Построенная теория позволяет вычислить лагранжевы структурные функции скорости $K_n(\tau)$, т. е. среднее по ансамблю от приращения скорости частицы за время τ , возведенного в степень n .

На временах τ , малых по сравнению с корреляционным временем крупномасштабной турбулентности, они подчиняются скейлинговым соотношениям $K_n(\tau) \propto \tau^{\zeta_n}$. Полученные таким образом аналитические выражения для параметров ζ_n , а также и другие наблюдаемые характеристики структурных функций выведены непосредственно из уравнения Навье—Стокса и не содержат подгонных параметров. При этом они находятся в полном согласии с результатами ряда экспериментов.

• В обзорном докладе **Н. Васильца, А. Ф. Гуцолы, А. Б. Шехтера, А. А. Фридмана (ФИНЭПХФ РАН, г. Черногловка)** "*Плазменная медицина*" рассмотрены различные аспекты плазменной медицины нового направления, лежащего на стыке физики и химии плазмы и их применения в биологии и медицине. С помощью низкотемпературной воздушной плазмы атмосферного давления можно контролировать, стимулировать, катализировать и диагностировать сложные биологические процессы в живых тканях и организмах. Такое воздействие плазмы может приводить к стерилизации ран в биологических тканях живых организмов, свертыванию крови, может осуществлять лечение косметологических заболеваний, восстановление разрушенных тканей, селективное разрушение раковых клеток (apoptosis) и др. Важно отметить, что данная область охватывает в основном иссле-

дования, касающиеся неразрушающего направленно-стимулирующего действия плазмы на ткани, клетки и другие биологические объекты.

- В докладе **В. Д. Кузнецова (ИЗМИРАН)** "Физика Солнца: от недр до солнечного ветра" рассказывалось о Солнце, его внутренней структуре и гелиосейсмологии, об активных явлениях и магнитных полях, о вспышках и выбросах массы, о солнечном ветре и солнечном цикле, о воздействии на Землю. Доклад обильно сопровождался иллюстрациями и содержал ряд видеофильмов, наглядно демонстрировавших различные явления и ключевые физические процессы на Солнце. Использовались материалы последних наблюдений Солнца с космических аппаратов, в том числе с российско-украинского спутника "Коронас-Ф".

- Доклад **В. С. Бескина (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН)** "Радиопульсары" был посвящен открытым в конце 60-х годов радиопульсарам — источникам импульсного космического радиоизлучения с характерным периодом ~ 1 с. Без преувеличения можно назвать это открытие одним из важнейших событий в астрофизике XX века. При этом основные физические процессы, определяющие наблюдаемую активность радиопульсаров, были поняты практически сразу. Так, стало ясно, что чрезвычайно регулярные пульсации наблюдаемого радиоизлучения связаны с вращением нейтронной звезды, а энергетический источник радиопульсаров обусловлен энергией вращения. Однако несмотря на 40 лет интенсивного изучения, некоторые принципиальные вопросы еще далеки от своего решения. Прежде всего открытым остается вопрос о физической природе когерентного радиоизлучения пульсаров, в частности, как и в 70-е годы нет единой точки зрения на вопрос, является ли когерентный механизм радиоизлучения мазерным или антенным. Эффекты распространения радиоволн в магнитосфере нейтронной звезды также анализировались недостаточно тщательно. Кроме того, нет единой точки зрения и на вопрос о строении магнитосферы пульсаров. В докладе сформулированы основные нерешенные проблемы, стоящие перед теорией, а также сделан обзор наблюдений, выполненных в последнее время и которые, как можно надеяться, помогут пролить свет на физические процессы, происходящие в магнитосфере радиопульсаров.

- На секции "Магнитное удержание высокотемпературной плазмы" было представлено 83 доклада (из них 25 на устных и 58 на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками более чем 15 российских научных центров, 11 докладов выполнены совместно с сотрудниками научных центров Франции, Великобритании, Финляндии, Германии, Бельгии, Швеции, Украины и Казахстана.

- Большой интерес вызвали доклады **Б. В. Кутеева (СПб ГТУ)** "Выбор параметров разряда и системы генерации тока для термоядерного источника нейтронов мощностью до 10 МВт" и "Современный взгляд на гибридный термоядерный реактор", посвященные созданию и возможному применению токамака в качестве источника термоядерных нейтронов. Термоядерные нейтронные источники мощностью до 10 МВт (на основе дейтерий-тритиевой плазмы) и до 0,1 МВт (на основе дейтериевой плазмы) входят в число наиболее мощных современных источников нейтронов. Имеется социальный заказ на непрерывные и импульсные источники интенсивностью $10^{16} \div 10^{19}$ нейтронов в секунду со стороны индустрии, прикладной и фундаментальной науки. В диапазоне нейтронных потоков более 10^{18} нейтрон/с реакторы и ускорители близки к насыщению, тогда как термоядерные источники сохраняют потенциал развития. Реальным представляется создание термоядерного источника нейтронов (ТИН) на основе как классического, так и сферического токамака с использованием существующих термоядерных технологий. Сферический вариант может оказаться более простым и дешевым в случае решения проблем удержания быстрых ионов и повышения магнитных полей до 1,35 Тс. Он может быть рекомендован для концептуального анализа. Решение проблемы сверхмощного нейтронного источника может иметь глобальное воздействие на энергетику, фундаментальную и специальную науку, нано- и биотехнологии.

- В докладе **А. В. Анисеева (ИЯФ СО РАН)** "Мощный нейтронный источник для управления подкритичным реактором деления и трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов" предлагается использовать для аналогичных прикладных целей источник нейтронов на основе открытой ловушки ГДЛ, который будет обладать следующими преимуществами: это будет непрерывный источник нейтронов, имеющий две зоны нейтронной эмиссии (n -зоны), возможно с различной интенсивностью, n -зоны могут быть увеличены и аксиально профилированы необходимым образом, при этом прогнозируется относительно низкая стоимость такого источника нейтронов.

- Интересными оказались новые работы, выполненные на стеллараторе L-2M. Так, в теоретической работе **Л. М. Коврижных (ИОФ РАН)** "Условие амбиполярности и возможность многозначных стационарных решений уравнений переноса в стеллараторе", учитывая интерес, который представляет собой возможность существования бифуркации решений уравнений переноса, а также задача корректного определения амбиполярного электрического поля, автор считает полезным еще

раз вернуться к этой проблеме и на примере двух стеллараторов Л-2М (Россия) и LHD (Япония) более детально проанализировать этот вопрос.

Проведенный анализ показал, что в случае стеллараторов и при учете как вклада частиц запертых в локальных магнитных ямах винтового поля, так и вклада пролетных и тороидально-запертых частиц амбиполярное электрическое поле в плазме может иметь разрывные решения. В то же время плотность, температуры и потоки частиц и тепла остаются непрерывными функциями радиуса, поскольку разрывы электрического поля компенсируются разрывами производных плотности и температур.

Кроме того, было показано, что при заданных источниках частиц и тепла, а также при определенных граничных условиях стационарные решения уравнений переноса не являются единственными. В зависимости от начальных условий они допускают бесконечное множество различных решений, явный вид которых определяется начальными значениями амбиполярного поля. Не исключено, что именно эта неоднозначность решений ответственна за существование различных режимов удержания плазмы, наблюдаемых в экспериментах.

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-импульса нагрева ($P = 50—300 \text{ кВт}$), существенно уменьшить мощность излучения из плазмы, которая для режима с плотностью $n_e = (1,0—1,5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ не превышает 10 % от вводимой мощности.

• В докладе **А. И. Мещерякова (ИОФ РАН)** "Осаждение пленок бора в омическом разряде стелларатора Л-2М с использованием метакарборана" представлены результаты экспериментальных исследований импульсной боронизации в плазме омического разряда в стеллараторе Л-2М с применением карборана $\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{12}$.

Обнаружено, что импульсная боронизация позволяет наносить более прочное боркарбидное покрытие на стенки камеры стелларатора по сравнению с боронизацией в тлеющем разряде. Общее время, в течение которого покрытие продолжает выполнять экранирующие функции, возросло в два раза по сравнению с боронизацией в тлеющем разряде. В режимах с боронизацией вакуумной камеры стелларатора Л-2М обнаружен краевой транспортный барьер, который выражается в резком градиенте электронной температуры и плотности плазмы вблизи сепаратрисы.

• В докладе **Г. С. Воронова (ИОФ РАН)** "Исследование изменения профиля плотности плазмы при образовании краевого транспортного барьера" показано, что в стеллараторе Л-2М возникает транспортный барьер на краю плазменного шнура с самого начала импульса ЭЦР-нагрева в обычных режимах. Но существуют режимы с низкой мощностью нагрева (50—80 кВт), когда транспортный барьер на границе плазмы не возникает, причем порог по мощности возникновения транспортного барьера хорошо согласуется с порогом возникновения Н-моды в стеллараторах и токамаках.

• В докладе **С. В. Щепетова (ИОФ РАН)** "О влиянии резонансных магнитных поверхностей невысокого порядка на свойства турбулентной плазмы и транспортные переходы" обнаружен и исследован транспортный переход в режим с улучшенным удержанием. Переход происходит при достаточно большой плотности плазмы и имеет порог по мощности нагрева при заданной плотности плазмы. Аксиально-симметричные возмущения с частотами 1—3 кГц, сопутствующие такому переходу, расположены между поверхностями, где параметр μ равен $2/3$ и $3/4$.

• В докладе **В. Б. Лазарева (РНЦ "Курчатовский институт")** "Исследование распределения лития и водорода в скрэп-слое литиевого лимитера токамака Т-11М" приведены результаты экспериментов с литиевой диафрагмой на токамаке Т-11М, главная цель которых состоит в изучении баланса, миграции и циркуляции лития в камере токамака. В ходе экспериментов разработан метод определения радиального распределения лития и водорода в скрэп-слое. Расчеты показывают, что круговой лимитер шириной 5 и радиусом 20 см, утопленный в тень литиевого лимитера на 1 см ($a = 19 \text{ см}$), и полностью поглощающий падающий на него поток лития, мог бы собрать до 90 % инжектированного лития.

• По секции "Инерциальный термоядерный синтез" на конференции было проведено два устных и два стендовых заседания, на которых были заслушаны 13 устных и 51 стендовый доклад.

Тематика докладов отвечала основным направлениям исследований в области инерциального термоядерного синтеза (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. Среди докладов по тематике ИТС доминировали сообщения об экспериментах с использованием сильноточных импульсных Z-пинчевых машин. Эта ситуация объективно отражает сложившееся соотношение основных направлений ведущихся сегодня в нашей стране работ. В связи с этим важ-

ным дополнением секционных сообщений явились пленарные доклады С. Ю. Гуськова и В. Б. Розанова о лазерных исследованиях, ведущихся, в первую очередь, в США в области ИТС.

- Следует упомянуть внесенное в список докладов уже в ходе работы сессии сообщение **В. Д. Атаманенко, Г. В. Долголевой и В. А. Щербакова (ВНИИЭФ)** "*Особенности поглощения мишенью для установки Искра-6*". В целом в группе секционных докладов по этому направлению доминировали сообщения о компьютерном моделировании процессов лазерного сжатия термоядерных мишеней и о теоретических исследованиях взаимодействия мощных лазерных импульсов с плазмой, а также родственных проблем лазерного ускорения заряженных частиц.

- В связи с этим следует отметить сообщение в теоретическом докладе **И. Ю. Костюкова (ИПФ РАН, Н. Новгород)** "*Захват электронов в релятивистскую плазменную волну*" о первых масштабных экспериментах по захвату и ускорению электронов, взаимодействующих с релятивистской плазменной волной, возбужденной мощным лазерным импульсом.

- Основу группы сообщений, связанных с применением Z-пинчей, составили устные доклады **Е. В. Грабовского (ГНЦ РФ ТРИНИТИ)** "*Исследования излучающих Z-пинчей на установке "Ангара-5-1"*" для проекта "Байкал" и **Г. М. Олейника** "*Радиальное распределение рентгеновского и оптического излучений при сжатии многопроволочного Z-пинча в опытах на установке Ангара 5-1*" о работах в ТРИНИТИ в рамках проекта "Байкал" и экспериментах на установке "Ангара 5-1" по сжатию квазисферических многопроволочных мишеней.

- К ним примыкал третий доклад **С. С. Анянueva и С. А. Данько (РНЦ "Курчатовский институт")** "*Регистрация временного хода интенсивности характеристических линий ионов в рентгеновском диапазоне при сжатии проволочных сборок мегаамперными токами*" об исследованиях временной эволюции интенсивности рентгеновских характеристических линий ионов при сжатииборок на установке С-300.

Детализация различных аспектов этой группы работ была представлена в стендовых докладах.

- Важным представляется сообщение **В. В. Александрова (ТРИНИТИ)** "*Динамика формирования спектра мягкого рентгеновского излучения при сжатии нецилиндрических проволочныхборок из вольфрама*" об экспериментальном изучении условий согласования наблюдаемого хода интенсивности рентгеновского излучения квазисферическихборок с предсказаниями математического моделирования (**группа В. А. Гасилова, ИМАМОД РАН**).

Интерес вызвали также доклады **С. И. Ткаченко** о новых результатах исследований в ФИАН структуры токовых каналов, возникающих в процессе взрыва проволочек и **Н. Н. Калиткина** о созданной в ИМАМОД широкодиапазонной базе данных об экстремальных свойствах веществ.

- Круг докладов по экспериментам с плазменным фокусом в этом году сузился до единственного устного сообщения **В. И. Крауза** "*О токовом скейлинге нейтронного выхода плазмфокусного разряда*", давшего объяснение давних проблем этого направления. Так же, как и все последние годы, весьма слабо была отражена тематика ИТС на ускоренных пучках тяжелых ионов. Единственный доклад по этому, в прошлом важному, направлению был представлен группой из Харькова и касался математического моделирования индукционного ускорителя.

Характер распределения тем докладов свидетельствует о локализации отечественных исследований в области ИТС вокруг применения Z-пинчевых и лазерных импульсных устройств. Пинчевое направление развивается более широко, имея в качестве экспериментальной базы установку "Ангара 5-1" и перспективу (сильно ограниченную возможностями финансирования) реализации масштабного проекта "Байкал". Сложнее видится ситуация с лазерным ИТС, где в сужающемся круге исследований последних лет все более доминирует разработка новых типов термоядерных мишеней. Беспокоит отсутствие в этом году сообщений о текущих экспериментах по сжатию лазерных мишеней. На этом фоне весьма впечатляющим оказалось прозвучавшее на конференции сообщение о начале экспериментов по ускорению электронов на вступившей в действие в ИПФ РАН (г. Н. Новгород) лазерной установке мощностью 0,5 ПВт с длительностью импульса короче 100 фс. В целом описанная ситуация объективно отражает современные трудности (финансовые, кадровые, степень общественного понимания роли науки и т. д.) современного развития исследований в области ИТС.

- На конференции в рамках Совета РАН по проблеме "*Физика низкотемпературной плазмы*" также проходила работа секции "*Физические процессы в низкотемпературной плазме*". Было представлено 24 устных доклада и 67 стендовых сообщений.

Устные доклады подытожили исследования по следующим основным направлениям:

- термодинамические и кинетические свойства низкотемпературной плазмы;
- различные виды разрядов;
- пылевая, фемтосекундная и астрофизическая плазма.

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

Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России, применительно к таким аспектам физики низкотемпературной плазмы, как воздействие на пылевую плазму и плазму газового разряда внешнего магнитного поля. Было заслушано четыре устных доклада по этой тематике.

- Интерес вызвал доклад **М. Г. Левашовой (РНЦ "Курчатовский институт")** "Квазиклассическая теория радиационно-столкновительного каскада в ридберговском атоме", в которой развита двухмерная квазиклассическая модель радиационно-столкновительного каскада для водородоподобных систем в плазме.

Для радиационных переходов предложена итерационная процедура, на каждом шаге последовательно учитывающая квантовый характер радиационных процессов. Столкновения атомного электрона с частицами плазмы описываются оператором диффузии в пространстве главных и орбитальных квантовых чисел. Коэффициенты диффузии вычисляются на основе выражений для переданного импульса в неупругих столкновениях атомного электрона с электронами плазмы.

- Интерес вызвал также доклад **В. С. Воробьева (ОИВТ РАН)** "Критические точки некоторых металлов, найденные на основе их связи с параметрами линии единичного фактора сжимаемости". В работе критические параметры металлов определялись на основе данных низкотемпературных измерений в области жидкости и их связи с линией единичного фактора сжимаемости. (Далее эта линия обозначается как Z -линия, где $Z = P/\rho T = 1$; P — давление; ρ — плотность; T — температура). Для широкого класса веществ эта линия, построенная в координатах плотность—температура, является прямой и касается жидкой ветви бинаодала в пределе $T \rightarrow 0$. Это позволило построить универсальное выражение для кривой сосуществования жидкость—пар (жидкая ветвь), переходящее в Z -линию при низких температурах.

- Дискуссию вызвал доклад **С. А. Триггера (ОИВТ РАН)** "О модификации планковского излучения в плазмоподобных средах", в которой обсуждался вопрос о равновесном излучении в плазмоподобных средах. Спектральное распределение такого излучения может отличаться от планковского равновесного излучения (излучение черного тела). Физическая причина этого отличия заключается в невозможности распространения фотонов с законом дисперсии $\omega = ck$ в системах заряжен-

ных частиц. В плазменных средах слабозатухающей поперечной электромагнитной модой является мода с законом дисперсии $\omega = (\Omega_p^2 + c^2 k^2)^{1/2}$ (Ω_p — частота плазменных колебаний в системе). Вследствие этого в спектральной плотности равновесного излучения таких сред имеется щель шириной Ω_p .

Большое количество докладов было представлено на двух заседаниях стендовой секции.

- Часть докладов была связана с технологическими применениями низкотемпературной плазмы, например, **И. Ш. Абдуллин и др. (Казанский государственный технологический университет)** "Применение высокочастотной плазмы пониженного давления для модификации нетканых материалов" или **В. И. Графугин (ИТЭФ)** "Возможности использования позитронной диагностики для исследования пылевой космической плазмы".

Другая часть докладов была связана с исследованием свойств и процессов в низкотемпературной плазме. В частности, таких, как излучательные свойства плазмы ксенона высокой плотности (Камруков).

- Третья группа связана с развитием методов диагностики низкотемпературной плазмы. Сюда относится, например, доклад **И. А. Кудрявцевой (МАИ)** "Применение цилиндрического зонда для диагностики столкновительной плазмы" и др.

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" было проведено 2 устных заседания, на которых были заслушаны 15 докладов, и проведено 2 стендовых заседания, доложены 58 докладов. От секции был представлен также один пленарный доклад. На секции были представлены результаты работы ведущих научных центров России. Большое число докладов было представлено научными коллективами ведущих учебных заведений России, а также коллективами Украины, Республики Корея и Германии.

- В устном докладе **Н. А. Попова (НИИ ядерной физики МГУ)** "Воспламенение водородовоздушных смесей импульсно-периодическим наносекундным разрядом" представлено теоретическое исследование компьютерного моделирования процессов, определяющих воспламенение смесей водород—воздух при инициировании импульсно-периодическим сильноточным разрядом при комнатной температуре. Отмечается, что основной проблемой инициирования воспламенения горючих смесей при низких начальных температурах является то, что нарабатываемые в разряде атомарные частицы практически не участвуют в разветвленных цепных химических реакциях. Как

следствие, разряд в этом случае выступает в первую очередь как источник нагрева исследуемых смесей. Нарбатываемые в разряде атомы водорода участвуют в формировании каталитического цикла, в результате которого происходят окисление водорода и образование молекул воды, но, самое главное, в этом цикле происходит нагрев смеси. Именно это является основной причиной, по которой неравновесное по своему характеру возбуждение смеси импульсно-периодическим разрядом оказывается более эффективно, чем соответствующий "равновесный" аналог. По мере нагрева газа, когда его температура превышает 500 К, наблюдается переход к стадии разветвленных цепных химических реакций, которая заканчивается воспламенением смеси.

• В устном докладе **В. Л. Бычкова и С. А. Двина** (МГУ, физический факультет) "*К расчету скорости распространения волны ионизации в разряде со сложной химической кинетикой*" предложена теоретическая модель расчета распространения фронта химической реакции в многокомпонентной среде. Модель основана на сведении системы уравнений баланса для различных компонент плазмы к одному уравнению диффузии с "эффективными" нелинейным источником и коэффициентом диффузии. Основанием для подобного упрощения является различие в скоростях химических реакций различных процессов. Предложенный метод решения задач продемонстрирован на частных примерах: распространения волны ионизации в среде с прилипанием; распространения волны ионизации при учете диффузии заряженных частиц и переноса возбуждения; распространения волны ионизации при учете диффузии заряженных частиц и электронной теплопроводности. В указанных случаях могут быть получены простые выражения для скорости фронта ионизации. Также рассмотрено распространение фронта ионизации в воздухе, основанное на модели химической кинетики с учетом 24 компонент. Расчеты в предложенной модели сопоставлены с результатами прямого численного моделирования. Предложенный метод может быть использован как для расчета разряда постоянного тока, так и для разряда в СВЧ-поле, позволяя существенно уменьшить объем необходимых вычислений.

• В устном докладе **К. В. Ходатаева (МРТИ РАН)** "*Порог СВЧ-пробоя при средних и высоких давлениях*" представлены теоретические исследования критического (пробойного) значения амплитуды СВЧ-поля в широком диапазоне давления. Показано, что при низком давлении пробой имеет место, если эффективное значение СВЧ электрического поля равняется критическому значению для постоянного поля. Однако при высоком

давлении порог пробоя соответствует равенству амплитуды СВЧ электрического поля критическому значению для постоянного электрического поля. Простые формулы рекомендуются для оценок критической амплитуды СВЧ-поля в диапазоне средних и высоких давлений воздуха.

В стендовых секциях было представлено 55 докладов.

• В докладе **В. С. Курбанисмаилова, О. А. Омарова, Н. О. Омаровой (Даггосуниверситет)** "*Вынужденное излучение из плазмы стримера как вторичный механизм его распространения*" отмечается, что согласно плазменной модели пробоя газов высокого давления в сильном электрическом поле лавина ионизации переходит в плазменное состояние еще до возникновения стримера. При больших перенапряжениях и высоких давлениях газа концентрация электронов в стримере достигает величины $10^{13} \div 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а их температура 1—5 эВ. Основным объемом такого стримера представляет собой квазинейтральную плазму, находящуюся в частичном локальном термодинамическом равновесии. Переход лавины в стример, в котором плазма почти полностью экранирует внешнее электрическое поле, происходит за время 10^{-7} с. Таким образом, в плазме стримера устанавливается слабое электрическое поле. Это поле уже не способно поддерживать высокую температуру электронов, которые будут охлаждаться в результате упругих столкновений с атомами газа. В результате охлаждения электронов плазма стримера оказывается неравновесной, с избыточной степенью ионизации. На этой стадии возрастает вероятность ударно-излучательной рекомбинации. Концентрация электронов за время их охлаждения существенно не меняется и превосходит равновесное значение. Плазма стримера становится источником интенсивного излучения квантов. При этом спонтанное излучение, возникающее при рекомбинации, проходя через объем стримера с неравновесной степенью ионизации, вызывает появление вынужденного излучения в направлении к электродам. Поглощение этого излучения в газе вблизи головки стримера приводит к появлению вторичных электронных лавин, которые, двигаясь в электрических полях, усиленных пространственными зарядами, также переходят в плазменное состояние, тем самым повторяя описанный выше процесс. Этот процесс будет повторяться до тех пор, пока стример не перекроет разрядный промежуток. Исходя из плазменной модели и рассмотренного лазерного механизма распространения стримеров, можно допустить возможность создания плазменного лазера, осуществляющего генерацию на начальной стадии пробоя.

• В докладе **В. А. Иванова (ИОФ РАН)** с сотрудниками "*Упрочнение приповерхностного слоя*"

титана с помощью микроплазменных разрядов" рассмотрены исследования универсального плазменного метода обработки металлов, основанного на новых принципах возбуждения микроплазменных разрядов, способных упрочнять металлические изделия со сложной формой поверхности.

Цель работы — изучение свойств микрорельефа, образующегося на поверхности образцов из технического титана при их взаимодействии с микроплазменными разрядами. Исследуемый образец помещали в вакуумную камеру (остаточное давление воздуха ~ 1 Па) и облучали импульсным потоком плазмы, создаваемой плазменным инжектором (электронная плотность $n_0 \geq 5 \cdot 10^{11}$ см³, электронная температура $T_e \sim 10$ эВ, длительность импульсов 25 мкс, количество импульсов плазмы $N = 450$). При этом на поверхности образца возбуждались микроплазменные разряды (электрический потенциал образца $\bar{U} = 50$ В, стартовый электрический ток микроплазменных разрядов на образце $I = 200$ А, длительность микроплазменных разрядов 18 мс). В результате воздействия на образец последовательности импульсных микроплазменных разрядов в приповерхностном слое образца формировалась сплошная переплавленная область, характеризующаяся сильно модифицированными физико-химическими свойствами металла. Показано, что микроплазменная обработка образцов из титана по сравнению с их исходным состоянием приводит к значительному увеличению шероховатости (в 5—7 раз), микротвердости (в 6—10 раз), предельно допустимого давления, т. е. задиростойкости (в 2,8 раз) и антифрикционности (в 3,6 раз) приповерхностного слоя обработанных образцов.

• Доклад **А. М. Анпилова, Э. М. Бархударова, И. А. Косых, Н. И. Малых (ИОФ РАН)** "Микроволновое и лазерное зондирование искрового разряда скользящего по поверхности воды" посвящен рассмотрению высоковольтного импульсного разряда, распространяющегося вдоль границы вода—воздух, и представляющего значительный интерес для физики низкотемпературной плазмы, а также для ряда прикладных задач. Показано, что разряд формирует однородный по длине высокоионизованный плазменный канал длиной $L = 10$ см и диаметром $d = 0,2$ см с концентрацией и температурой электронов $N_e = 3 \cdot 10^{17}$ см⁻³ и $T_e = 1,0$ — $1,5$ эВ, и температурой тяжелых частиц $T_i \approx 5000$ К. Приводятся результаты зондирования разрядной области микроволновым ($\lambda = 8$ мм) и лазерным ($\lambda = 633$ нм) излучением в целях исследования плазменных и газодинамических процессов на границе вода—воздух, инициированных разрядом. СВЧ зондирование позволило зарегистрировать плазменное образование длительностью 30—40 мкс при длитель-

ности импульса тока ~ 4 мкс, а также возмущение водной поверхности, которое запаздывало относительно разрядного тока на время $\approx 1,0$ мкс. Зарегистрирован также отраженный под углом 45° сигнал при нормальном падении на поверхность воды зондирующего излучения. Лазерное зондирование фиксирует ударную волну, распространяющуюся со скоростью 510 м/с вблизи поверхности воды, а также поток пара со скоростью 10—20 м/с на расстоянии 1,5—2,5 мм от границы раздела двух сред. Анализ результатов позволит судить о физических процессах, инициируемых импульсным поверхностным разрядом на границе раздела вода—воздух.

• В докладе **В. Л. Бычкова, А. П. Ершова, Б. А. Черникова и др. (МГУ)** "Исследования коронного и эрозионного разрядов над поверхностью жидкостей" проведены эксперименты по исследованию свойств коронного и эрозионного разрядов в воздухе над поверхностью жидкостей (вода, спирт, глицерин). Коронный разряд возбуждался над поверхностью жидкости, находящейся в кювете цилиндрической формы. В качестве источника питания используется высоковольтный выпрямитель, позволяющий изменять напряжение на электродах от 2 до 50 кВ с шагом 250 В. Как при положительной, так и отрицательной коронах на поверхности жидкости появляется воронка во всех исследованных жидкостях (вода, спирт, глицерин, керосин и их смеси). В случае отрицательной короны над поверхностью спирта, двойного дистиллята воды, смеси воды со спиртом или глицерином над поверхностью воды возникают разбрызгивающиеся струи и светящиеся жидкие столбики, находящиеся непосредственно под верхним электродом. В работе объясняется причина этих электрогидродинамических явлений.

Исследовано также воспламенение с помощью капиллярного разряда паров над поверхностью спирта в потоке воздуха при скорости потока 7,9 и 30 м/с.

• В докладе **Д. В. Бычкова, Л. П. Грачева, И. И. Есакова, А. А. Раваева (МГУ)** "Глубоко подкритический СВЧ-разряд в высокоскоростной струе воздуха и его смеси с пропаном" представлены результаты исследования газового электрического разряда в квазиоптическом линейно поляризованном СВЧ-пучке с уровнем поля, существенно меньшим критического пробойного уровня. Разряд инициируется трубчатым линейным электромагнитным вибратором. Он горит в кормовой области вибратора в затопленной высокоскоростной струе воздуха или в его горючей смеси с пропаном. Струя истекает в герметичную рабочую камеру экспериментальной установки из внутреннего отверстия вибратора, на кормовой конец которого для стабилизации параметров по-

тока надета короткая кварцевая трубка. Основные эксперименты выполнялись при скоростях потока в диапазоне нескольких сотен метров в секунду.

Опыты показали, что в исследуемом диапазоне скоростей потока воздуха возможно зажигание в нем СВЧ-разряда при уровне поля, в десятки раз меньшем его критического уровня. Реализующийся разряд поджигает и стабилизирует область горения бедной пропан-воздушной смеси при коэффициенте избытка горючего в ней в пять раз меньшем значения этого коэффициента, ограничивающего снизу зону воспламенения данной смеси. В данной схеме при скоростях потока, меньших примерно 200 м/с, происходит полное сгорание пропана, при больших скоростях процент его сгорания уменьшается.

Программа сессии ИТЭР включала в себя следующие доклады.

1. Велихов Е. П. *"Международное сотрудничество в области УТС и проект ИТЭР"*.
2. Красильников А. В. *"Российский вклад в проект ИТЭР"*.
3. Беляков В. А. *"Инженерные проблемы ИТЭР"*.
4. Шиков А. К. *"Исследования и разработки технических сверхпроводников в России"*.
5. Стребков Ю. С. *"Бланкет ИТЭР"*.
6. Кулыгин В. М. *"Инжекционная система ИТЭР и вклад российской стороны в ее создание"*.
7. Вуколов К. Ю. *"Состояние работ по диагностическим системам ИТЭР в России"*.
8. Семенов И. Б. *"Информационное обеспечение проекта ИТЭР"*.
9. Вдовин В. Л. *"Состояние и дальнейшие разработки систем нагрева и возбуждения тока в ИТЭР"*.
10. Коновалов С. В. *"Интегрированное моделирование сценариев и симуляторы ИТЭР"*.
11. Житлухин А. М. *"Эрозия защитных покрытий первой стенки и дивертора ИТЭР и формирование пыли в условиях, имитирующих переменные нагрузки ЭЛМы и срывы плазмы"*.

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

Организаторами прошедшей XXXVI конференции являлись:

- Научный совет по физике плазмы Российской академии наук.
- Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

- Научный совет РАН по комплексной проблеме "Физика низкотемпературной плазмы".

- Объединенный институт высоких температур РАН.

- Научно-технологический центр ПЛАЗМА-ИОФАН.

- Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

*Финансовую поддержку конференции оказали
Российский фонд фундаментальных исследований,
Российская академия наук, Государственная
корпорация РОСАТОМ.*

Выводы

1. XXXVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом, проходящим в России с участием как российских ученых, так и приглашенных иностранных ученых, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в нашей стране. Она проходила уже 36-й раз и собрала на свои заседания значительное количество участников из научных центров России и других стран. По сравнению с предыдущей конференцией возросло количество как российских, так и иностранных организаций, представивших доклады.

2. Уровень экспериментальных работ, выполненных российскими учеными на крупных отечественных установках в области магнитного удержания горячей плазмы, сохраняется высоким, а число работ растет несмотря на физическое и моральное старение экспериментального и диагностического оборудования, снижение численности и старение научных коллективов. Однако физический износ установок и отсутствие современных научных приборов и оборудования, используемых в экспериментах, и недостаточное финансирование научных институтов являются факторами, сильно тормозящими проведение исследований в перспективных областях физики плазмы. При сохранении этих негативных тенденций в ближайшем будущем Россия попадет в положение аутсайдера в области научных исследований по физике плазмы на долгие годы.

3. Растет число работ, посвященных прикладным исследованиям в области физики плазмы, интерес к этим научным исследованиям среди молодежи, принявшей участие в работе конференции. Однако участники конференции отмечали значительные трудности, возникающие при внедрении результатов научных исследований в об-

ласти создания новых материалов и применения новых технологий, что обусловлено неразвитостью инфраструктуры и сети малых внедренческих фирм, активно работающих в инновационной сфере.

4. Остается заметным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными в научных центрах за пределами России — в Европе и США. Это указывает на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых остаются пока достаточно высокими, чтобы быть востребованными мировым научным сообществом.

Статья подготовлена в рамках проекта НШ-452.2008.2 — гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации.

Л и т е р а т у р а

1. Тез. докл. XXXVI Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС. — М: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН, 2009. — 358 с. (ISBN 978-5-212-0186-3).

2. Интернет-ресурс — http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVI/Zven_XXXVI.html.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2009 г.

The basic results of researches in the field of physics of plasma and controlled fusion in Russia in 2008

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

A. M. Prokhorov General Physics Institute of the RAS, 38 Vavilova str., 119991, Moscow, Russia

E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

It is a presentation of the review of scientific works and the analysis of the basic directions of researches which were presented in the reports on plasma physics and controlled fusion of annual XXXVI International (Zvenigorodskaiy) conference which was held in Zvenigorod town of the Moscow region during February 9—13, 2009.

PACS: 52.25.-b; 52.55.-s

Keywords: international conference, plasma physics, nuclear fusion, plasma technology.

Гришина Ирина Алексеевна, науч. сотр.
Иванов Вячеслав Алексеевич, начальник лаборатории
Коврижных Лев Михайлович, зав. отделом физики плазмы
119991, Москва, ул. Вавилова, 38, ИОФ РАН
Тел. 8-499-503-83-44; E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru