

# Физика плазмы и плазменные технологии\*

УДК 533.9

## Актуальные проблемы и новые научные результаты исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу в России и в мире в 2007 году

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

Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

*Подведены итоги работы ежегодной XXXV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся в г. Звенигороде 11—15 февраля 2008 г. Проведен анализ развития основных направлений исследований и определены тенденции развития физики плазмы в России.*

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

Ежегодная XXXV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде Московской обл. с 11 по 15 февраля 2008 г.

На конференции было представлено 332 научных доклада из 82 российских и 34 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общая численность авторов докладов составила около 900 чел.

Список российских научных центров, представивших доклады (число докладов указано цифрами), следующий.

1. Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (ИОФ РАН), Москва — 44.
2. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИ РАН), Москва — 35.
3. Российский научный центр "Курчатовский институт" (РНЦ КИ), Москва — 30.
4. Государственный научный центр "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (ТРИНИТИ), г. Троицк, Московская обл. — 24.
5. Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва — 23.
6. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ), Москва — 22.
7. Институт ядерного синтеза, Федеральное государственное учреждение «Российский научный центр "Курчатовский институт"» (ИЯС РНЦ КИ), Москва — 18.
8. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ РАН), С.-Петербург — 18.

9. Институт ядерной физики СО РАН (ИЯФ СО РАН), г. Новосибирск — 15.

10. Новосибирский государственный университет (НГУ), г. Новосибирск — 14.

11. Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород — 13.

12. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ РАН), Москва — 12.

13. Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН (ИТЭС ОИВТ РАН), Москва — 11.

14. Институт математического моделирования РАН (ИММ РАН), Москва — 10.

15. Московский физико-технический институт (Государственный университет) (МФТИ), г. Долгопрудный, Московская обл. — 10.

16. Казанский государственный технологический университет (КГТУ), г. Казань — 9.

17. Московский инженерно-физический институт (Технический университет) (МИФИ), Москва — 8.

18. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров — 8.

19. ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (СПбГПУ), С.-Петербург — 8.

20. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова (ИТЭФ), Москва — 6.

21. Казанский государственный университет (КГУ), г. Казань — 6.

22. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ), Москва — 6.

23. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (Технический университет) (МИРЭА), Москва — 6.

\* Статьи представлены по материалам XXXV Международной Звенигородской конференции.

24. Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), г. Новосибирск — 5.
25. Дагестанский государственный университет (ДГУ), г. Махачкала — 4.
26. Институт прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН), Москва — 4.
27. Федеральное государственное учреждение "12 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны РФ" (ФГУ "12 ЦНИИ МО РФ"), г. Сергиев Посад, Московская обл. — 3.
28. Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), Москва — 3.
29. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН (ИНХС РАН), Москва — 3.
30. Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва — 3.
31. Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН (ВЦ РАН), Москва — 2.
32. Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина (ВЭИ), Москва — 2.
33. Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ), г. Иваново — 2.
34. Институт астрономии РАН (ИНАСАН), Москва — 2.
35. Иркутский государственный университет (ИрГУ), г. Иркутск — 2.
36. Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), г. Троицк, Московская обл. — 2.
37. Институт сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), г. Томск — 2.
38. Институт химии растворов РАН (ИХР РАН), г. Иваново — 2.
39. ФГУП "Московский радиотехнический институт РАН" (МРТИ РАН), Москва — 2.
40. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежала (НИКИЭТ), Москва — 2.
41. Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН (ОФП БНЦ СО РАН), г. Улан-Удэ — 2.
42. Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ), г. Уфа — 2.
43. ФГУП "Центр Келдыша", Москва — 2.
44. Академия космонавтики (АК), Москва — 1.
45. Башкирский государственный университет (БашГУ), г. Уфа — 1.
46. Всероссийский научно-исследовательский институт кабельной промышленности (ВНИИКП), Москва — 1.
47. Институт неорганических материалов им. А. А. Бочвара (ВНИИМ), Москва — 1.
48. Восточно-сибирский государственный технологический университет (ВСГТУ), г. Улан-Удэ — 1.
49. Институт высоких температур Объединенного института высоких температур РАН (ИВТ ОИВТ РАН), Москва — 1.
50. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН (ИМ РАН), Москва — 1.
51. Институт молекулярной генетики РАН (ИМГ РАН), Москва — 1.
52. Институт механики МГУ им. Ломоносова (ИМех МГУ), Москва — 1.
53. Институт органической химии им. Зелинского РАН (ИОХ РАН), Москва — 1.
54. Институт проблем технологии микроэлектроники РАН (ИПТМ РАН), г. Черноголовка — 1.
55. Институт радиотехники и электроники РАН (ИРЭ РАН), Фрязинский филиал, г. Фрязино — 1.
56. Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное предприятие "Исток"» (ФГУП «НПП "Исток"»), г. Фрязино — 1.
57. Институт теоретической и математической физики, Российский федеральный ядерный центр — "Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики" (ИТМФ РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров — 1.
58. Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (ИТПЭ РАН), Москва — 1.
59. Институт физики полупроводников СО РАН (ИФП СО РАН), г. Новосибирск — 1.
60. Московский автомобильно-дорожный институт (ГТУ) (МАДИ), Москва — 1.
61. Московский авиационный институт (ГТУ) (МАИ), Москва — 1.
62. Российский государственный технический университет им. К. Э. Циолковского (МАТИ), Москва — 1.
63. Московский государственный университет леса (МГУЛ), Москва — 1.
64. Московский институт кибернетической медицины (МИКМ), Москва — 1.
65. Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва (МрГУ), г. Саранск — 1.
66. Московский энергетический институт (Технический университет) (МЭИ), Москва — 1.
67. НИИ высоких напряжений (НИИ ВН), г. Томск — 1.
68. НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н. Э. Баумана (НИИЭМ МГТУ), Москва — 1.
69. ФГУП "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова" (НИИЭФА), С.-Петербург — 1.
70. Российский институт мощного радиостроения (РИМР), С.-Петербург — 1.
71. Росатом, Москва — 1.
72. Российский федеральный ядерный центр — Всесоюзный научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е. И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Снежинск — 1.

73. Самарский государственный университет путей сообщения (СамГУПС), г. Самара — 1.
74. Самарский государственный аэрокосмический университет (СГАУ), г. Самара — 1.
75. Санкт-Петербургский государственный технический университет (СПбГТУ), С.-Петербург — 1.
76. Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), С.-Петербург — 1.
77. С.-Петербургский институт машиностроения (СПИМ), С.-Петербург — 1.
78. Томский государственный университет (ТГУ), г. Томск — 1.
79. Федеральный государственный унитарный центр "Красная звезда" (ФГУП КЗ), Москва — 1.
80. Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН (ФинЭПХФ РАН), г. Черногоровка — 1.
81. ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения Роскосмоса" (ЦНИИМАШ), г. Королев — 1.
82. Чувашский государственный университет им. И. Ульянова (ЧГУ), г. Чебоксары — 1.

Участниками конференции, представившими доклады из стран дальнего и ближнего зарубежья, являются следующие научные организации.

1. Brigham Young University (BYU), Provo, USA.
2. Darmstadt Universität Technologie (DUT), Darmstadt, Germany.
3. EURATOM-CEA Association, Cadarache, France.
4. EURATOM-UKAEA Fusion Association, Culham Science Centre, UK.
5. FOM-Institute for Plasma Physics Rijnhuizen (FOM-IPPR), Association EURATOM-FOM, Trilateral Euregio Cluster, Nieuwegein, Netherlands.
6. Institut für Theoretische Physik (FU ITP), Universität Frankfurt, Frankfurt, Germany.
7. Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH (GSI), Darmstadt, Germany.
8. Institut für Physik, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald (IP EMAUG), Greifswald, Germany.
9. Institut für Theoretische Physik und Astrophysik (ITPA), Kiel, Germany.
10. Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Naka Fusion Research Establishment, Naka, Japan.
11. JET, Culham, UK.
12. Kansai Photon Science Institute (KPSI), Japan Atomic Energy Agency, Kyoto, Japan.
13. Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (LAPLACE), Toulouse, France.
14. Laboratoire des Plasmas Denses (LPD), Université P. & M. Curie, Paris, France.
15. National Institute for Fusion Science (NIFS), Tokio, Japan.

16. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, USA.
17. Theoretical Physics Institute (TPhI), University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
18. Dipartimento di Fisica "G. Occhialini", Università di Milano Bicocca (UMB), Italy.
19. ITER, Cadarache, France.
20. Восточно-украинский национальный университет им. В. Даля (ВНУ), г. Луганск, Украина.
21. Институт молекулярной и атомной физики НАНБ (ИМАФ), г. Минск, Республика Беларусь.
22. Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины (ИТФ НАН Украины), г. Киев, Украина.
23. Институт теоретической физики (ИТФ), Университет г. Дюссельдорфа, Германия.
24. Институт физики плазмы, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт" (ИФП ХФТИ), г. Харьков, Украина.
25. Институт физики плазмы им. Макса Планка (ИФП), г. Грайфсвальд, Германия.
26. Институт физики плазмы (ИФП), г. Лозанна, Швейцария.
27. Корнельский университет, г. Итака, США.
28. Научно-исследовательский институт прикладной физики Национального университета Узбекистана (НИИПФ НУУз), г. Ташкент, Узбекистан.
29. ГНПО "Сухумский физико-технический институт" (СФТИ), Академия наук Абхазии, г. Сухуми, Абхазия.
30. Университет А. Пуанкаре, г. Нанси, Франция.
31. Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (ХНАДУ), г. Харьков, Украина.
32. Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина (ХНУ), г. Харьков, Украина.
33. Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины (ХФТИ НАН Украины), г. Харьков, Украина.
34. Чешский технический университет, г. Прага, Чехия.

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

- Магнитное удержание высокотемпературной плазмы.
- Инерциальный термоядерный синтез.
- Физические процессы в низкотемпературной плазме.
- Физические основы плазменных и лучевых технологий.

Состоялось четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 16 обзорных докладов по результатам отечественных и мировых исследований по

актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям. Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 75 устных и 257 стендовых докладов.

Конференция традиционно открывалась обзорными докладами, представленными коллективами крупнейших научных центров России, Европы и Украины.

- В докладе А. С. Кингсепса "*О вкладе академика Е. К. Завойского и его школы в современную физику плазмы*" (**РНЦ "Курчатовский институт"**), посвященном столетнему юбилею ученого, были выделены самые крупные научные достижения Е. К. Завойского. Среди них было упомянуто открытие электронного парамагнитного резонанса, состоявшееся в 1944 г.

В 50-х годах главным направлением работ Е. К. Завойского и его школы стали физика плазмы и управляемый термоядерный синтез. Важнейшим этапом этих экспериментальных работ было открытие явления турбулентного нагрева плазмы. Принципиальное значение данного открытия состоит в том, что от первичного понятия плазмы как ионизованного газа происходил переход к пониманию плазмы как особого состояния вещества с доминирующей коллективной динамикой.

Во второй половине 60-х годов академик Е. К. Завойский выдвинул идею схемы УТС, основанной на принципе взаимодействия сильноточных пучков с мишенью из конденсированного вещества. Тем самым в СССР было положено начало работам по инерциальному термоядерному синтезу (ИТС) на базе импульсных сильноточных генераторов. По мере развития данного направления эксперименты стали использовать в качестве драйвера вместо пучков, быстрого Z-пинча, и на сегодняшний день оно представляет одно из трех лидирующих в мире направлений развития ИТС.

- Результаты последних и планы ближайших экспериментов на установке JET были представлены в докладе Джозефа Онгена "*Последние достижения JET в подготовке ITER*" (**JET Facility**).

В докладе указывалось, что основными направлениями научных и технических программ JET являются дальнейшее развитие основных сценариев ITER, исследования материала первой стенки ITER, а также разработка и исследование вспомогательных систем для ITER (термоядерные диагностики для плазмы, которые могут выдерживать интенсивные нейтронные потоки, пеллетинжектор, прототип ионно-циклотронной антенны для ITER, методы дистанционного управления).

В течение 2006—2007 гг. были разработаны и опробованы режимы с внутренним транспортным барьером и высокой треугольностью, соответствующей ITER, с использованием дополнительного нагрева свыше 30 МВ при  $\beta \sim 2$ ,  $B_0 \sim 3,1$  Т. В специальных экспериментах на JET менялись гофры тороидального магнитного поля. Первый поразительный результат заключался в том, что скорость вращения плазмы в этих условиях изменяла направление: от направления, совпадающего с током плазмы до противоположного. В докладе также была дана характеристика различных ICRF антенных систем, которые JET готовит для ITER. Самым важным событием будет испытание этих антенн, которые должны снизить чувствительность к быстрой тепловой нагрузке, как, например, во время ELMs.

- В обзоре Л. Г. Аскинази "*Зональные течения, вращение плазмы и электрическое поле в токамаках*" (**ФТИ РАН**) были обобщены и систематизированы результаты исследований особого типа структур в плазме — зональных течений и их связи с вращением и электрическими полями. Зональные течения в тороидальных установках представляют собой тороидально и полоидально симметричные ( $m = n = 0$ ), локализованные радиально ( $k_r r_l \sim 10\text{--}20$ ) области полоидального вращения плазмы с квазипостоянной во времени скоростью (стационарные зональные потоки ZF) или осциллирующие со сравнительно низкой частотой (геодезическая акустическая мода, GAM).

В установках с магнитным удержанием ZF и GAM проявляют себя в виде соответствующих возмущений электрического потенциала и радиального электрического поля и связаны, таким образом, с фундаментальными процессами в плазме. В силу высокой тороидальной симметрии зональные течения слабо подвержены затуханию Ландау, в результате чего могут достигать значительной интенсивности. При этом данный вид колебаний не вызывает усиления радиального переноса вещества и энергии, а наоборот, играет роль своего рода энергетического резервуара для стока энергии дрейфовой турбулентности, приводя таким образом к ее ослаблению и подавлению аномального переноса. Исследования зональных течений, помимо фундаментального значения, представляют интерес также с точки зрения поиска новых механизмов управления удержанием в токамак-реакторе.

- В докладе В. В. Орлова "*Ядерная энергетика на быстрых реакторах — новый старт*" (**НИКИЭТ, Курчатовский институт**) обсуждались причины неудачи замысла ядерной энергетике 70-х годов на быстрых реакторах, обещавшего создать безопасные и недорогие источники энергии. Были изложены также требования к новому

быстрому реактору, при создании которого будут использованы накопленный опыт и развитые технологии, и основные направления работ, проводимых в этой области в мире. Сообщались основные результаты разработки прототипа установки "Брест" (НИОКР и его обоснование).

- Доклад В. Л. Вдовина *"Актуальные проблемы нагрева плазмы и поддержания тока в ITER" (ИЯС РНЦ "Курчатовский институт")* был посвящен анализу критических проблем физики взаимодействия волна—частица и концепции антенн/технологии при нагреве плазмы и поддержании тока в больших установках синтеза, включая токамаки, стеллараторы, зеркальные ловушки и ITER/DEMO для всех четырех методов: ИЦР, ЭЦН, НИ и НГ. Анализ базировался на экспериментах в больших машинах JET, JT-60, TOR SUPRA, LHD, средних и малых токамаках DIII-D, T-10, NSTX, T11-M и др. и на 3-мерном моделировании с помощью недавно разработанных полных волновых кодов PSTELION (ИЦР) и STELEC (ЭЦН), включающих конверсию мод, 3-мерных кодов ANPORT и ANTRES3, трактующих антенны, погруженные в порты, и теоретические оценки.

- Современное состояние работ по подготовке проекта ITER освещалось в докладе Норберта Хольткампа *"Status of ITER Construction Preparation" (проект ITER)*. Страны-участницы этого международного проекта приняли решение о том, что конструкция токамака должна быть проведена в течение ~10 лет. На этой установке предполагалось создание плазмы с реакторными параметрами. С помощью современных технологий будет сделана попытка создать жизнеспособный источник энергии.

- Об участии российских научных организаций в подготовке проекта ITER сообщалось в докладе А. В. Красильникова и др. *"Статус работ по созданию ITER и российский вклад в проект" (РНЦ "Курчатовский институт", НИИЭФА, ИПФ, Росатом, ВНИИНМ, НИКИЭТ, ВНИИКТ)*. В докладе сказано, что распоряжением правительства РФ на базе РНЦ "Курчатовский институт" было создано Российское национальное агентство ITER. В соответствии с распределением ответственности за поставки оборудования ITER между сторонами-участницами проекта российское национальное агентство ITER ответственно за организацию изготовления и поставку Международной организации ITER следующего оборудования: полоидальной катушки PF1; сверхпроводника для магнитной системы ITER; верхних патрубков вакуумной камеры; опоры и защитных модулей бланкета; дом-лайнера дивертора; коммутирующей аппаратуры; гиротронов; диагностик.

В докладе отмечалось, что проведенный анализ соответствия основных инженерно-технических

систем реактора ITER, создаваемых в России, новым операционным режимам ITER, с учетом результатов ревизии технического проекта, не выявил каких-либо прямых противоречий с ранее согласованными спецификациями. Для соблюдения технического соответствия поставок РФ требованиям ITER в настоящее время первоочередное значение имеет своевременное получение данных по изменениям в смежных системах. Было сообщено о состоянии работ по созданию поставляемых Россией систем.

- В докладе В. Б. Розанова *"Лазерный термоядерный синтез: современные программы США, Европы и Японии" (ФИ РАН)* были рассмотрены работы по осуществлению указанных выше программ, их современное состояние и ожидаемые результаты. Особое внимание уделено планируемому в Ливерморской лаборатории США в 2010 г. экспериментам по зажиганию термоядерной мишени с термоядерным выходом, в 10—20 раз превышающим затраты лазерной энергии. Отмечалось, что вероятность успешного осуществления термоядерного микровзрыва с выходом  $10^{19}$  нейтронов (20 МДж термоядерной энергии) оценивается достаточно высоко. Аналогичные эксперименты планируются во Франции, но с отставанием от США на три года. В докладе освещались также развиваемые в Европе и Японии программы HIPER и FIREX, использующие идею быстрого зажигания — разделения процессов сжатия и нагрева мишени. Для этих целей создаются лазеры наносекундного диапазона длительности импульса с энергией 200—500 кДж (для сжатия), дополненные лазерами пикосекундного диапазона длительности импульса с энергией 50—100 кДж (для зажигания). Ожидается, что результаты подготавливаемых экспериментов вызовут возрастающий интерес к работам по лазерному термоядерному синтезу.

- Доклад В. В. Хвостова и др. *"Синтез новых форм углерода и перспективы их практических применений" (МГУ, Чувашский государственный университет)* был посвящен современному состоянию проблемы синтеза, анализа и практического использования новых форм углерода (карбин, линейно-цепочечный и гранецентрированный углерод). Представлены принципиально новые результаты фундаментальных экспериментальных и теоретических исследований по синтезу метастабильных фаз углерода, исследованию их атомной и электронной структуры и электрофизических свойств, созданию новых уникальных материалов на их основе и разнообразным приложениям в науке, технике и медицине. Они охватывают разработку физических основ методов получения метастабильных фаз углерода при низких температурах и давлениях с помощью ионных

пучков, создание уникальных ионных источников для реализации этих методов, развитие ионных, ионно-плазменных и лазерных методов получения тонких нанокристаллических пленок метастабильных форм и теоретического исследования электронной структуры, устойчивости кристаллической решетки и фононного спектра новых форм углерода.

- А. Д. Беклемишев представил в своем докладе *"Новые физические явления в плазме многопробочной ловушки и перспективы удержания"* результаты работы большого коллектива авторов **Института ядерной физики Сибирского отделения Российской академии наук**. Ловушка ГОЛ-3 задумывалась как установка для проверки концепций нагрева плазмы релятивистским электронным пучком и термоядерного реактора с многопробочным удержанием. К сегодняшнему дню достигнуты температуры электронов в диапазоне 3—5 кэВ при плотностях  $\sim 10^{15}$  см<sup>-3</sup> и  $\beta$  — в десятки процентов. Отмечалось, что в первую очередь это связано с тем, что получающаяся плазма является турбулентной, а турбулентность существенно уменьшает продольные потери, нивелируя эту слабость открытых ловушек. Вместе с тем режима "стеночного" удержания, как и высоких параметров при свободном разлете плазмы, пока достичь не удалось. Было обнаружено, что нагрев ионов релятивистским электронным пучком в многопробочной ловушке идет через стадию ускорения потоков плазмы и ионной турбулентности. Этот процесс гораздо быстрее и эффективнее исходно предполагавшегося нагрева ионов через электрон-ионные столкновения. Еще один эффект, порождаемый пучком, — подавление продольного переноса по электронному каналу. По-видимому, он связан с рассеянием электронов развитой высокочастотной плазменной турбулентностью. Продольный перенос по ионному каналу также снижен (по сравнению с рассчитанным в ламинарной модели многопробочного удержания) в результате развития неустойчивости с частотой порядка частоты ионов. Измеренные времена удержания ионов соответствуют эффективной длине свободного пробега, в 30 раз меньшей расчетной при иной функциональной зависимости от плотности.

Конвективные желобковые неустойчивости, которые должны были бы выбрасывать плазму на стенку (по критерию — неустойчивы) в эксперименте незаметны. Основные проблемы устойчивости связаны с развитием винтовых и тиринг-мод. На основании данных эксперимента в докладе сделан вывод, что новые физические явления, наблюдаемые в плазме ГОЛ-3, требуют пересмотра концепции термоядерного реактора на основе многопробочной ловушки. Представляется, что

такой реактор может быть стационарным, работать при  $\beta$  меньше единицы и иметь гораздо меньшие размеры по сравнению с исходной моделью.

- В докладе В. Ю. Королева *"Стохастическое разложение волатильности: новый метод анализа хаотических стохастических процессов, основанный на представлении смесью соответствующих конечномерных распределений"* (МГУ) предложен метод анализа процессов плазменной турбулентности, являющихся классическим примером хаотических стохастических процессов. В качестве "элементарных" математических моделей хаотических процессов плазменной турбулентности на очень малых временных масштабах рассматривались обобщенные дважды стохастические пуассоновские процессы (обобщенные процессы Кокса) со скачками, имеющими конечную дисперсию. В соответствии с принципом максимальной энтропии такие процессы являются наилучшими моделями неоднородных хаотических потоков.

Аппроксимации для распределений приращений процессов плазменной турбулентности искались в виде общих сдвиг-масштабных смесей нормальных законов, в которых смешивающий закон определялся накопленной (интегральной) интенсивностью потоков соответствующих информативных событий (элементарных скачков). Проблема статистической реконструкции распределений приращений упомянутых процессов была сведена к задаче статистического оценивания смешивающего распределения, которое является параметром этой задачи.

Представление распределений приращений процессов плазменной турбулентности в виде конечных сдвиг-масштабных смесей нормальных законов естественно приводит к многомерной интерпретации изменчивости (волатильности) рассматриваемого процесса и возможности разложения волатильности на динамическую и диффузионную компоненты. Подобная математическая процедура может оказаться весьма полезной при анализе экспериментальных данных, поскольку позволяет сделать предположения о числе и характере физических процессов, приводящих к регистрируемой в эксперименте турбулентности плазмы.

- В докладе И. Л. Иосилевского *"Особенности фазовых превращений в плазме астрофизических объектов"* (МФТИ) рассматривалось многообразие фазовых переходов (ФП) в астрофизических объектах. Основной объект обсуждения — класс ФП в газоплазменном состоянии недр планет-гигантов, коричневых карликов, "внесолнечных" планет (экзопланет) и других субзвездных объектов. Термодинамические "траектории" этих объектов от поверхности до недр характеризуются бога-

тым набором возможных физических эффектов, включая неидеальность по многим типам взаимодействия, аномальную потерю положительности изохорического коэффициента давления  $(dP/dT)_V$  и фазовые переходы.

Отмечалось, что важную роль в термодинамике газоплазменных смесей субзвездных объектов играют следствия сложного химического состава этих смесей. Для преодоления этих трудностей при "пилотном" построении термодинамики комплексной плазмы широко используется приближение "аддитивности", позволяющее в упрощенном виде получать экстенсивные термодинамические величины смеси (удельный объем и энтальпию) как сумму соответствующих величин составляющих.

На примере гелий-водородной плазмы в докладе обсуждаются особенности трансформации фазовых переходов составляющих подсистем, гелия и водорода в рамках приближения "аддитивности". Рассмотрены также точные результаты теории фазовых переходов в плазме химических смесей. Как главное следствие правила фаз Гиббса рассмотрена неконгруэнтность таких фазовых переходов. Были оценены и обсуждены масштабы гипотетической неконгруэнтности плазменного фазового перехода в гелий-водородной плазме недр планет-гигантов и ее возможная взаимосвязь с гипотетическим механизмом седиментации гелия в недрах Юпитера и Сатурна.

• М. И. Михайлов представил доклад *"Оптимизация стеллараторов: аналитическое обоснование и результаты численных расчетов" международного коллектива авторов (ИЯС РНЦ "Курчатовский институт", Институт физики плазмы (Лозанна, Швейцария), Институт физики плазмы им. Макса Планка (Грайфсвальд, Германия))*, в котором изложены результаты теоретических исследований по оптимизации стеллараторов за последние 10 лет. В приосевом приближении были проанализированы принципы улучшения стеллараторов, приведены примеры оптимизированных систем разных типов. Возможности оптимизации основаны на том простом факте, что вблизи магнитной оси поведения магнитных поверхностей и поверхностей  $B = \text{const}$  не связаны друг с другом. За счет этого при специально подобранной форме как магнитной оси, так и магнитных поверхностей можно добиться как бы "восстановления" симметрии с точки зрения дрейфового движения частиц. Более того, в этих классах систем с улучшенным удержанием частиц можно добиться и таких целей, как уменьшение вторичных токов, увеличение предельного по устойчивости давления плазмы, уменьшения неоклассических переносов, улучшения удержания

$\alpha$ -частиц, уменьшения бутстрэп-тока. Показано, что для квазиизодинамических стеллараторов все указанные требования могут быть удовлетворены одновременно. В заключение обсуждались возможные направления дальнейших исследований.

• Большой интерес вызвал доклад В. Н. Киселя и А. Н. Лагарькова *"Метаматериалы, плазмонные устройства и их применение" (ИТПЭ РАН)*. В нем отмечалось, что в последние годы в физике и электродинамике интенсивно изучаются материалы и структуры, поддерживающие поверхностные плазмон-поляритоны, т. е. поверхностные электромагнитные волны с высокой степенью локализации вблизи границ раздела при одновременном существовании обратных волн в объеме материалов. Во многих случаях такие материалы можно охарактеризовать диэлектрической и магнитной проницаемостями, которые одновременно принимают отрицательные значения. Вследствие необыкновенно широких возможностей управления электрофизическими параметрами таких материалов и присущих им уникальным электродинамическим свойствам они получили название "метаматериалы" ("сверхматериалы"). Все метаматериалы являются искусственными магнитодиэлектриками, т. е. композитами.

В докладе рассмотрены некоторые вопросы теории распространения электромагнитных волн в структурах, содержащих метаматериалы. Особое внимание уделено необычным физическим эффектам, таким как отрицательное преломление и сверхразрешение, не ограниченное т. н. дифракционным пределом, т. е. возможность получить раздельное изображение источников, находящихся на близком расстоянии друг от друга (менее половины длины волны) с помощью пассивной системы. Приведены условия реализации сверхразрешения, дана интерпретация экспериментальных результатов, полученных при использовании в качестве фокусирующего устройства пластины из метаматериала.

Рассмотрены и другие перспективные направления использования метаматериалов, в частности, тонкослойные поглотители с широким угловым диапазоном. Тонкослойные структуры из композитов с резонансными включениями имеют широкую область применения и поэтому получили особое название — "метапленки".

В докладе обсуждались электрофизические свойства и возможные приложения некоторых видов тонкослойных композитов, в частности, частотно-избирательных структур, импедансных поверхностей, распределенных систем с управляемыми радиоволновыми характеристиками. Показано, что использование особых свойств электромагнитных процессов в метапленках позволяет

создать эффективные устройства для микроволновой техники, решения задач электромагнитной совместимости и обработки информации.

- На секции *"Магнитное удержание высокотемпературной плазмы. Теория и эксперимент"* (председатель секции — канд. физ.-мат. наук А. И. Мещеряков) было представлено 77 докладов (из них 21 на устных и 56 на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками более чем 15 российских научных центров, 8 докладов выполнены совместно с сотрудниками научных центров Франции, Японии, Нидерландов, Украины.

- Большой интерес вызвала теоретическая работа Л. М. Коврижных *"Влияние функционального вида аномальных потерь на процессы переноса в стеллараторах"* (ИОФ РАН). В работе проведены расчеты энергетического времени жизни частиц с использованием предложенной ранее модели процессов переноса в стеллараторах, построенной на базе неоклассической теории с учетом аномальных потерь. При этом полагалось, что зависимость коэффициента аномальной теплопроводности электронной и ионной компонент плазмы от плотности и соответствующей температуры имеет степенной характер. Расчеты проводились для двух стеллараторов L-2M (Россия) и LHD (Япония). Оказалось, что для пяти значений параметров, определяющих коэффициент аномальной теплопроводности, расчетные значения энергетического времени жизни практически не зависят от функционального вида коэффициента аномальной теплопроводности и с точностью до коэффициента порядка двух совпадают с теми, которые следуют из LHD-скейлинга.

- В докладе *"Моделирование разрядов с H-модой в токамаках JET и MAST"* коллектива авторов из РНЦ "Курчатовский институт", представленном Ю. Н. Днестровским, обсуждались результаты моделирования 10 импульсов JET с различными токами, плотностями плазмы и вводимой мощностью, а также нескольких импульсов MAST. Для моделирования разрядов с H-модой в установках JET и MAST использована нелинейная версия транспортной модели канонических профилей. Образование внешнего транспортного барьера происходит тогда, когда отклонение относительного градиента давления от канонического возле границы плазмы превышает некоторое критическое значение. При этом асимптотические выражения для пьедестала температуры оказываются независимыми от переноса внутри внешнего транспортного барьера. Для пьедестала плотности плазмы аналитических выражений получить не удастся, так как заметная часть потока холодных нейтралов поглощается внутри внешнего транспортного барьера. Однако проведенные расчеты

подтвердили слабую зависимость пьедестала плотности от модели переноса внутри внешнего транспортного барьера.

- Идея токамака с литиевыми поверхностями, стационарно контактирующими с плазмой, обсуждалась в докладе С. В. Мирнова и др. *"Эксперименты на T11-M в обоснование концепции токамака с замкнутой циркуляцией лития"* (ТРИНИТИ, ФГУП "Красная Звезда"). Такая концепция предполагает одновременное решение двух задач: эмиссию лития в плазму и его сбор до выхода на стенку камеры токамака. В рамках этой концепции основная доля потока тепла, выходящего из горячей зоны плазменного шнура на стенку, должна передаваться некорональным излучением лития. Это дает возможность использовать для управления поведением лития вблизи границы шнура локально расположенные лимитеры. В опытах на T-11M были использованы три подобных рельсовых лимитера: эмитирующий литиевый, молибденовый и графитовый. В ходе экспериментов обнаружено, что характерная длина спада потока энергии в тени лимитеров составляет около 1 см, в то время как характерная глубина спада потока лития превосходит ее в два—три раза. На основании результатов изложенного в докладе эксперимента делаются оценки размеров собирающих лимитеров для T-11M и T-15.

- В докладе В. П. Будаева *"Лог-пуассоновская модель турбулентности периферийной плазмы в термоядерных установках"* (РНЦ "Курчатовский институт") были приведены результаты экспериментального исследования пристеночной турбулентности в термоядерных установках и интерпретация экспериментальных данных в рамках современных моделей турбулентности, использующих статистический подход.

Отмечалось, что многочисленные экспериментальные наблюдения свидетельствуют о значительной перемежаемости турбулентности пристеночной плазмы. Статистика флуктуаций турбулентности отличается от гауссовой статистики, характерной для колмогоровской турбулентности. Скейлинг моментов высоких порядков отклоняется от предсказаний колмогоровской модели. Пристеночная турбулентность обладает мультифрактальными (многомасштабными) свойствами. Такие свойства предсказываются лог-пуассоновской моделью турбулентности. Лог-пуассоновская модель обобщает предыдущие модели турбулентности (колмогоровскую, лог-нормальную,  $\beta$ -модель и др.) на случай сильной анизотропии мультипликативного каскадного процесса турбулентности. Приводится сравнение с лог-пуассоновской моделью экспериментальных результатов, полученных на токамаках T-10, JT-60U, НУВТОК-II, стеллараторе LHD, линейной установке NAGDIS-II.



• Результаты недавних экспериментов по инжекционному нагреву с направлением инъекции навстречу току на токамаке "Туман-3М" излагались в докладе С. В. Лебедева и др. *"ЛН-переход при низкой плотности, инициированный нейтральной инъекцией навстречу току плазмы в токамаке "Туман-3М" (ФТИ РАН, СПб ГПУ)*. В этих экспериментах был обнаружен ЛН-переход при плотности  $0,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , что заметно ниже граничной плотности, при которой происходил ЛН-переход в экспериментах с инжекционным нагревом в направлении по току. Отмечалось, что в этих опытах переход наблюдался при необычно низкой мощности нагрева  $P_{\text{input}} < 240 \text{ кВт}$  ( $\approx 1,3 \cdot P_{\text{ОИМ}}$ ); при инъекции в направлении по току плазмы переход при такой плотности не наблюдается даже при увеличении мощности нагрева до 500 кВт ( $2,5 \cdot P_{\text{ОИМ}}$ ). Сказано также, что влияние направления инъекции на пороговую мощность ЛН-перехода было обнаружено в недавних экспериментах на токамаке DIII-D. В докладе представлены результаты экспериментов и численного моделирования, позволившие сформулировать гипотезу возникновения отрицательного, направленного внутрь, радиального электрического поля и инициирования ЛН-перехода при наличии такого поля.

Как и в предыдущие годы, значительное число работ, представленных на секции, было посвящено экспериментам на открытых ловушках: ГДЛ, ГОЛ-3, АМБАЛ-М. Исследования на этих установках направлены на то, чтобы улучшить параметры плазмы, используя источники нейтральной инъекции для нагрева плазмы и получения высокоэнергичной ионной компоненты.

• В докладе А. В. Аникеева *"Стационарное удержание анизотропной горячей плазмы в газодинамической ловушке" (ИЯФ СО РАН)* обсуждалась модернизация системы атомарной инъекции на установке газодинамической ловушки (ГДЛ). В результате модернизации средняя по времени мощность атомарной инъекции достигла 3,5 МВт. Модернизация позволила провести ряд важных экспериментов, в которых достигнуты высокие параметры плазмы. В экспериментах по инъекции быстрых атомов водорода удалось получить стационарный режим удержания плазмы с рекордной на сегодняшний день электронной температурой в установке ГДЛ—150 эВ, что достаточно хорошо соответствует предсказаниям теории для имеющейся полной мощности инъекции нейтральных пучков 3,5 МВт.

В специально реализованном "распадном" эксперименте температура электронов превысила 200 эВ. При использовании в системе нагревной инъекции пучков атомов дейтерия реализовался

стационарный режим удержания двухкомпонентной плазмы с высоким относительным давлением  $b \approx 60 \%$ . Энергосодержание быстрых ионов при этом превысило килоджоуль. Плотность быстрых ионов со средней энергией 10 кэВ достигала в точках останковки  $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и была сравнима с плотностью мишенной плазмы.

Инжекция нейтральных частиц позволяет ограничить функции электронного пучка главным образом созданием турбулентности на концах системы для уменьшения продольных потерь энергии, тогда как функции нагрева плазмы может выполнять инъекция. Опыт нейтральной инъекции оказался успешным. Степень захвата атомов пучка в ловушку достигала 87 %. Изучалась динамика радиального распределения плотности плазмы как во время предварительного разряда, так и при инъекции релятивистского электронного пучка. В дальнейшем предполагается использовать инжектор с геометрической фокусировкой и мощностью 1 МВт.

На установке ГДЛ продолжают эксперименты по накоплению быстрых ионов в дополнительном пробкотроне. В короткий пробкотрон с полем 2,5 Т в центре и пробочным отношением  $\sim 2$  из центральной части ГДЛ втекала теплая плазма с температурой 70 эВ и плотностью  $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Производилась инъекция сфокусированных атомарных пучков с энергией частиц 21—22 кэВ и эквивалентным током до 45 А в проточную теплую плазму. Длительность инъекции составляла 5 мс, что позволяло достичь псевдостационарного режима. В лучших режимах плотность быстрых ионов достигала величины  $3,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и превосходила плотность теплой плазмы. Накопление быстрых ионов приводило к нарастанию электростатического потенциала. При этом поток теплой плазмы, вытекавший из центральной части ГДЛ сквозь дополнительный пробкотрон, уменьшался в четыре раза. При достижении плотности быстрых ионов  $2,5\text{—}3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  зафиксировано появление колебаний потенциала плазмы на частотах, близких к ионной циклотронной частоте в центральном сечении дополнительного пробкотрона. Это может свидетельствовать о развитии микронеустойчивости, вызванной сильной анизотропией функции распределения быстрых ионов в фазовом пространстве. Следует отметить, что появление колебаний не приводило к увеличению потерь быстрых ионов.

• В целом работа секции *"Магнитное удержание высокотемпературной плазмы"* была успешной и продемонстрировала соответствие уровня работ, проводимых в российских научных центрах в данной области исследований, мировому уровню. Возрос вклад российских ученых в

международные проекты по исследованию высокотемпературной плазмы. Возросло по сравнению с прошлым годом число молодых ученых, принимавших участие в работе секции.

- По секции *"Инерциальный термоядерный синтез"* (председатель секции — д-р физ.-мат. наук Г. В. Иваненков) на конференции было проведено 3 устных и 2 стендовых заседания, на которых были заслушаны 17 устных и 49 стендовых докладов. Тематика докладов отвечала основным направлениям исследований в области ИТС, связанном 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.

Важность направления ИТС связана с ожиданием после 2010 г. демонстрации осуществления термоядерного микровзрыва с положительным балансом вложенной и полученной энергии как в лазерных, так и Z-пинчевых устройствах. В настоящее время эксперименты, ведущиеся в нашей стране, в большей мере связаны с использованием сильноточных импульсных машин, что и отразилось в доминировании докладов этого направления.

В тематике докладов, связанных с применением Z-пинчей, преобладало использование излучения плазмы, созданной в электрическом взрыве многопроволочных сборок. Основу данной группы сообщений составили устные доклады Е. В. Грабовского, В. В. Александрова и Т. А. Шелковенко. В первых двух было доложено о последних работах в **ТРИНИТИ** в рамках проекта "Байкал" и экспериментах на установке "Ангара 5-1" по сжатию конических многопроволочных мишеней. К ним тесно примыкал третий доклад, давший пример исследований динамики схлопывания плазмы многопроволочных сборок в совместных работах исследователей из **ФИАН** и **Корнельского университета США**. В итоге возникла довольно полная картина основных физических процессов сжатия плазмы и механизма генерации мощных рентгеновских импульсов. Приведены результаты многокадровой X-пинч-диагностики, давшей последовательные рентгеновские изображения сжатия сборки в ходе рентгеновского импульса, а также данные о динамике длительного плазмообразования в связи с существованием структур типа керн-корона, возникающих на месте проволочек, и о характере движения возникающей плазмы к оси.

Эти сообщения весьма удачно дополнили доклады В. А. Гасилова (**ИМАМД**) и П. В. Сасорова (**ИТЭФ**), посвященные математическому моделированию сжатия сборок и процессам абляции с них плазмы.

Интерес вызвали также доклады С. А. Пикуза (**ФИАН**) и С. А. Данько (**КИАЭ**), посвященные экспериментам с мегаамперными X-пинчами, выполняемыми в России и США.

Доклады по лазерному ИТС охватили проблемы экспериментов с различными типами мишеней (**ВНИИЭФ**) и их компьютерного моделирования (Н. В. Змитренко, В. А. Гасилов и др.), а также взаимодействия мощных лазерных импульсов с плазмой (А. Н. Брантов, И. Н. Косарев и др.). Как дополнение к последнему направлению тесно примыкал доклад И. Н. Онищенко, посвященный кильватерному ускорению частиц в диэлектрических структурах. К сожалению, современное состояние науки не способствует еще оживлению этой области исследований по ИТС в нашей стране. В этой связи нельзя не отметить интерес участников к пленарному докладу В. Б. Розанова о состоянии работ по лазерному ИТС в США и других странах. По той же причине, как и в прошлые годы, весьма слабо была отражена тематика ИТС на ускоренных пучках тяжелых ионов.

По итогам конференции можно отметить рост числа докладов по тематике ИТС по сравнению с предыдущими годами.

- На конференции в рамках Совета РАН по проблеме "Физика низкотемпературной плазмы" также проходила работа секции *"Физические процессы в низкотемпературной плазме"* (председатель секции — проф. В. С. Воробьев). Было представлено 24 устных доклада и 67 стендовых сообщений.

Устные доклады, заслушанные на конференции, подытоживали исследования по следующим основным направлениям:

- термодинамические и кинетические свойства низкотемпературной плазмы (Б. А. Векленко, П. З. Левашов, И. В. Морозов, Г. В. Шпатаковская, А. Л. Хомкин и др.);

- различные виды разрядов (Ю. А. Лебедев, К. Н. Ульянов, В. Ф. Лапшин, А. А. Кудрявцев и др.);

- пылевая и фемтосекундная плазмы (С. Н. Антипов, К. Г. Адамович, М. Е. Вейсман, М. Б. Агранат и др.).

По этим же направлениям можно разбить и стендовые доклады. Кроме того, на стендовых заседаниях был представлен ряд докладов, связанных с технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Результаты работы секции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России, применительно к таким новым аспектам физики низкотемпературной плазмы, как воздействие на плазму фемтосекундных лазерных импульсов.

Было заслушано четыре устных доклада по этой тематике. Представлены новые эксперимен-

тальные данные по пылевой плазме. Интерес вызвало сообщение С. Н. Антипова и др. об исследованиях криогенной пылевой плазмы при температурах 4,2—77 К. При криогенных температурах впервые наблюдались шарообразные плотные пылевые структуры. Это обстоятельство проливает свет на возможность образования плотной конденсированной материи из первоначально разреженной заряженной плазмы. В названной работе исследовались динамические процессы, происходящие при воздействии электронного пучка на пылевое облако. При включении электронного пучка наблюдалось изменение таких параметров плазменно-пылевой структуры как межчастичное расстояние, скорость частиц, параметр неидеальности. Использование электронного пучка с варьируемой частотой развертки позволяет проводить воздействие как на всю пылевую структуру, так и на ее отдельные части.

- Интерес вызвал также доклад П. З. Левашова и др. "Моделирование динамики квантовых систем в томографическом представлении квантовой механики". Работа посвящена разработке нового стохастического подхода к численному решению эволюционного уравнения для маргинальной функции в томографическом представлении квантовой механики. Идея томографического представления состоит в линейном преобразовании фазового пространства посредством так называемого преобразования Радона и использовании новых переменных для построения положительной функции распределения. Томографическое представление полностью описывает как квантовое, так и классическое состояния системы в рамках одного и того же формализма.

- Большое число докладов было представлено на двух заседаниях стендовой секции. Часть докладов была связана с технологическими применениями низкотемпературной плазмы. К их числу относятся, например, доклады В. А. Бабурова и др. "Плазмохимическая модификация поверхности пленок нитрида кремния" или А. А. Балмашнова "Компактный ЭЦР-источник диссоциированных молекул CERA-RGD на основе коаксиального резонатора со спиральной волноводной структурой".

Другая часть докладов была связана с исследованием свойств и процессов в низкотемпературной плазме. Одним из таких процессов является возникновение рентгеновского излучения в условиях разряда в вакууме (Ю. К. Куриленков).

- Третья группа связана с развитием методов диагностики низкотемпературной плазмы. Сюда относятся доклады В. В. Руденко "Диагностика и определение основных закономерностей для теп-

ловых потоков переизлучения микроплазмы в процессах лазерного напыления" 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" (председатель секции — проф. А. Ф. Александров) было проведено 2 устных заседания, на которых были заслушаны 15 докладов и проведено 2 стендовых заседания, на которых были представлены 55 докладов. На секции заслушаны результаты работы более 30 ведущих научных центров России, Узбекистана, Украины и Абхазии. Большое число работ было доложено представителями научных коллективов ведущих учебных заведений России.

- В докладе М. В. Кузелева и А. А. Рухадзе "Генерация гармоник поля лазерного импульса в газе в процессе ударной ионизации атомов" (**ИОФ РАН**) теоретически исследовалась генерация гармоник поля мощного лазерного импульса в газе в процессе ударной ионизации атомов осциллирующими электронами. Рассматривались поля в условиях, когда энергия осцилляций электрона в поле излучения намного превосходила потенциал ионизации атома, но все еще оставалась нерелятивистской.

- Н. А. Попов представил доклад "Моделирование воздействия высоковольтного наносекундного разряда на водородно-воздушные смеси" (**НИИЯФ МГУ**), в котором рассматривалась самосогласованная модель, описывающая воздействие электрического разряда на газовые смеси. Модель включает процессы ионизации, диссоциации и возбуждения молекул смеси электронным ударом, систему ионно-молекулярных реакций для определения эволюции состава заряженных частиц, процессы с участием электронно-возбужденных атомов и молекул, а также систему реакций, описывающих воспламенение водород-кислородных смесей.

Были доложены результаты расчета времен индукции стехиометрических и нестехиометрических  $H_2-O_2$ -смесей, характерных частот нарастания концентрации радикалов  $OH$ , а также временной динамики основных компонент и температуры  $H_2-O_2-N_2$ -смесей.

- В работе А. Ф. Александрова, С. А. Двинина и др. "Численное моделирование и простые модели разряда постоянного тока в поперечном потоке воздуха" (**МГУ**) на основании численного моделирования была разработана простая многослойная аналитическая модель положительного столба, основанная на сшивке аналитических решений уравнений в соответствующих областях.

• В докладе К. В. Ходатаева *"Распространение микроволнового подкритического стримерного разряда навстречу излучению путем ветвления и петлеобразования"* (ФГУП "Московский радиотехнический институт РАН") было показано, что в поле плоской волны первичные стримеры от инициатора замыкаются в петлю в сторону распространения волны излучения. В то же время, если инициатор расположен в фокусе излучения или немного перед ним, стримеры уверенно развиваются в сторону излучения и замыкаются в петлю. Отмечено, что хотя распространение стримерного разряда сопровождается сильным ультрафиолетовым излучением, опыт моделирования показывает, что этот фактор не является определяющим для его распространения.

• В докладе М. С. Гитлина и др. (ИПФ РАН) рассмотрен способ визуализации и измерения пространственного распределения интенсивности миллиметровых волн с помощью оптического континуума, излучаемого положительным столбом Cs-Xe-разряда. Экспериментально и теоретически было показано, что принцип действия такого газоразрядного визуализатора основан на эффекте увеличения яркости в видимом диапазоне e-Xe тормозного континуума при нагреве электронов под действием падающего на плазму СВЧ-излучения. Работоспособность данной методики измерения была продемонстрирована в экспериментах по визуализации излучения восьми-, трех- и двухмиллиметрового диапазонов различной мощности и длительности импульса. Были проведены эксперименты по определению пространственного распределения интенсивности миллиметрового излучения на выходе рупорных антенн различного типа, а также в квазиоптических пучках. С помощью данного метода определены рабочая мода импульсного гиротрона средней мощности и моды, возбуждаемые в сверхразмерном волноводе, установленном на выходе импульсного гиротрона невысокой мощности.

• В докладе Н. В. Введенского и др. *"Генерация мощного терагерцового излучения при пробое газа предельно короткими лазерными импульсами"* (ИПФ РАН) были представлены новые результаты исследований "ионизационно-колебательного" механизма преобразования оптического излучения в терагерцовое. Данный механизм основан на явлении возбуждения собственных плазменных колебаний непосредственно в процессе пробоя газа лазерным импульсом сверхмалой длительности (составляющей малое число периодов оптического поля).

• В работе Д. А. Павлова и др. *"Способы изменения частот излучения плазменных релятивистских СВЧ-генераторов"* (ИОФ РАН) изложены

основные принципы управления работой широкополосных СВЧ-генераторов с уровнем мощности 100 МВт и перестраиваемой частотой, основанных на взаимодействии сильноточных релятивистских электронных пучков со специально созданной плазмой.

• В докладе В. А. Иванова и др. *"Упрочнение приповерхностного слоя алюминиевого сплава с помощью микроплазменных разрядов"* (ИОФ РАН, ИМАШ РАН) были представлены результаты исследований универсального плазменного метода обработки металлов, основанного на новых принципах возбуждения микроплазменных разрядов, способных упрочнять металлические изделия со сложной формой поверхности.

• В докладе И. А. Знаменской и др. *"Исследование свечения плазмы наносекундных разрядов с высоким временным разрешением"* рассказывалось о результатах исследования свечения импульсного объемного разряда с предварительной ионизацией УФ-излучением от плазменных листов и разряда, скользящего по поверхности диэлектрика в газодинамическом потоке воздуха с ударными волнами с числами Маха 1,8—3,5.

• В трех докладах А. Ф. Александрова, В. М. Шибкова и Л. В. Шибковой (МГУ) были рассмотрены основные свойства СВЧ-разряда, создаваемого на диэлектрической антенне поверхностной волной при высоких давлениях воздуха. Влияние неравновесной плазмы на период индукции газообразного и жидкого углеводородного топлива изучалось на примере воспламенения с помощью поверхностного СВЧ-разряда сверхзвукового пропан-воздушного потока с числом Маха  $M = 2$  и воспламенения спирта и керосина в условиях до- и сверхзвукового воздушных потоков. Было экспериментально зафиксировано развитие режима, близкого к детонационному горению. Показана перспективность поверхностного СВЧ-разряда для быстрого воспламенения углеводородного топлива.

• В докладе П. С. Стрелкова, Д. В. Шумейко *"Метод регистрации распределения плотности мощности по сечению СВЧ-луча"* (ИОФ РАН) предложен новый метод, который позволяет измерить распределение плотности мощности вдоль любой координаты сечения СВЧ-луча в одном импульсе. Метод основан на регистрации звуковой волны, которая возникает в жидкости, помещенной в диэлектрическую трубку, из-за ее нагрева при поглощении СВЧ-излучения.

• В докладе В. В. Пескова, Е. Г. Шустина и др. (МИФИ, Институт радиотехники и электроники РАН) рассказывалось о создании инжектора электронов для плазмохимического реактора на базе пучковоплазменного разряда, обеспечиваю-

щего низкоэнергетичное бездефектное прецизионное травление диэлектрических покрытий и поверхности гетероструктурных полупроводниковых соединений.

- В докладе О. А. Синкевича и др. (**МЭИ, ОИВТ РАН**) было приведено обобщение интегральных характеристик турбулентного плазматрона.

- В докладе А. Ф. Александрова, В. Л. Бычкова и др. (**МГУ**) представлены первые результаты экспериментальных исследований импульсного разряда над поверхностью воды.

- В докладе А. Ф. Александрова, А. П. Ершова и др. "*Зондовые измерения параметров плазмы в сверхзвуковом потоке*" (**МГУ**) представлены результаты зондовых измерений параметров плазмы, возникающей при инъекции мощной импульсной плазменной струи в сверхзвуковой поток пропан-воздушной смеси.

- В докладе Ю. К. Боброва и др. "*Физические основы новой технологии грозозащиты стержневым молниеотводом методом размыкаемого микроразрядника*" (**ГНЦ "Всероссийский электротехнический институт", Московский институт кибернетической медицины (ИОФ РАН)**) было предложено физическое обоснование новой технологии грозозащиты. Показано, что размыкания микроразрядника приводят к резонансным перенапряжениям в цепи постоянного тока и в итоге — к эффективному уменьшению пробивного напряжения разрядного промежутка молниеотвод — грозовое облако.

- В докладе В. В. Иванова с соавторами "*Моделирование источника ВУФ-излучения на основе плазмы, созданной CO<sub>2</sub>-лазером в Хе и Sn*" рассмотрена картина основных физических процессов, приводящих к появлению ВУФ-излучения при облучении CO<sub>2</sub>-лазером твердой или жидкой микрокапли из олова или ксенона.

Подводя итог работы секции "*Физические основы плазменных и лучевых технологий*", можно отметить большой рост числа работ, представленных в области плазменных и лучевых технологий по сравнению с прошлыми годами. Можно отметить также повышение качества представленных работ. Увеличилось число молодых участников конференции за счет высших учебных заведений России и СНГ.

Доклады, представленные на конференцию, были опубликованы в сборнике "Тезисы докладов XXXV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС", а также в электронном виде на странице в системе "Интернет" по адресу [www.fpl.gpi.ru](http://www.fpl.gpi.ru). [1, 2].

Часть полных текстов докладов представлена авторами для опубликования в журналах "Физика

плазмы" и "Прикладная физика". Сотрудничество редакционных коллегий этих журналов 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 XXXV 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.

\_\_\_\_\_

*Финансовую поддержку конференции оказали Российский фонд фундаментальных исследований, Российская академия наук, Федеральное агентство по атомной энергии.*

**Организаторами прошедшей XXXV конференции являлись:**

Научный совет по физике плазмы Российской академии наук;

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

Научный совет РАН по комплексной проблеме "Физика низкотемпературной плазмы";

Объединенный институт высоких температур РАН;

Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН;  
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

## Выводы

1. XXXV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых России, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в нашей стране. Она проходила уже 35-й раз и собрала на свои заседания значительное количество участников из научных центров России и других стран. По сравнению с предыдущей конференцией возрос перечень как российских, так и иностранных организаций, представивших доклады. 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 сомнений.

2. Уровень экспериментальных работ, выполненных российскими учеными на крупных отечественных установках в области магнитного удержания горячей плазмы, сохраняется все еще высоким, а число работ стабильно 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, недостаточное финансирование научных институтов являются факторами, сильно тормозящими проведение и развитие исследований в перспективных областях физики плазмы. При сохранении этих негативных тенденций в ближайшем будущем Россия попадает в положение аутсайдера в области научных исследований по физике плазмы на долгие годы.

3. Растет число работ, посвященных прикладным исследованиям в области физики плазмы, расширяется интерес к научным исследованиям среди молодежи, принявшей участие в работе конференции. Однако участники конференции отмечали значительные трудности, возникающие при внедрении результатов научных исследований в области создания новых материалов и применения новых технологий. Это обусловлено практически полным отсутствием в стране инфраструктуры, состоящей из сети небольших венчурных фирм, ориентированных на внедрение в производство новых технологий. Сами же научные инсти-

туты не обладают опытом такого внедрения и материальной базой для подготовки документации и образцов, пригодных для серийного производства.

4. Остается заметным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными в научных центрах за пределами России — в Европе и США. Сотрудничество с ведущими зарубежными научными центрами позволяет российским ученым работать на современном оборудовании и получать научные результаты мирового уровня. Это указывает также на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых остаются пока достаточно высокими, чтобы быть востребованными мировым научным сообществом.

---

*Обзор подготовлен в рамках работ, выполняемых по программе гранта Президента Российской Федерации "Государственная поддержка ведущих научных школ Российской Федерации" НШ-452.2008.2.*

#### Л и т е р а т у р а

1. Тезисы докладов XXXV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. — г. Звенигород, 11—15 февраля 2008. — М.: ЗАО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН", 2008. — 354 с. ISBN 978-5-212-01003-0.
2. <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/Zvenigorod.html>

*Статья поступила в редакцию 11 июня 2008 г.*

## **Actual problems and new scientific results of the researches on plasma physics and controlled nuclear fusion in Russia in 2007**

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

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

*A survey is given of the new scientific results represented on the XXXV Zvenigorod Annual International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion which was held in Zvenigorod (Russia) on February 11–15, 2008. The main lines of research are analyzed, and tendencies in the development of plasma physics in Russia are outlined.*

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b