

# Физика плазмы и плазменные технологии\*

УДК 533.9

## Основные достижения в исследованиях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу в России в 2006 году

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

*Подведены итоги работы ежегодной XXXIV Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Дан анализ развития основных направлений исследований и определены тенденции развития физики плазмы в России.*

Ежегодная XXXIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде Московской обл. с 12 по 16 февраля 2007 г.

На конференции было представлено 310 научных докладов из 68 российских и 29 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общая численность авторов докладов составила более 900.

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

1. Федеральное государственное учреждение «Российский научный центр "Курчатовский институт"» (РНЦ "Курчатовский институт"), Москва, Россия — 108.

2. Государственный научный центр "Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (ТРИНИТИ), г. Троицк, Московская обл., Россия — 64.

3. Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН (ИОФ РАН), Москва, Россия — 63.

4. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН), г. Новосибирск, Россия — 46.

5. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН (ФТИ РАН), Санкт-Петербург, Россия — 40.

6. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИ РАН), Москва, Россия — 38.

7. Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного института высоких температур РАН (ИТЭС ОИВТ РАН), Москва, Россия — 37.

8. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия — 29.

9. Московский инженерно-физический институт (Технический университет) (МИФИ), Москва, Россия — 29.

10. ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" (С-Пб ГПУ), Санкт-Петербург, Россия — 11.

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

12. Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород, Россия — 10.

13. Казанский государственный технологический университет (КГТУ), г. Казань, Россия — 10.

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

15. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (ИПМ РАН), Москва, Россия — 9.

16. Институт прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН), Москва, Россия — 9.

17. Российский федеральный ядерный центр — Всесоюзный научно-исследовательский институт технической физики им. Акад. Е. И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ), г. Снежинск, Россия — 9.

18. Ивановский государственный химико-технологический университет (ИГХТУ), г. Иваново, Россия — 7.

\* Статьи представлены по материалам XXXIV Международной Звенигородской конференции.

19. Санкт-Петербургский государственный университет (С-ПбГУ), Санкт-Петербург, Россия — 7.
20. Институт сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), г. Томск, Россия — 6.
21. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ), Москва, Россия — 6.
22. ГНЦ РФ — Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского (ГНЦ РФ — ФЭИ), г. Обнинск, Россия — 5.
23. Дагестанский государственный университет (ДГУ), г. Махачкала, Россия — 5.
24. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН (ИНХС РАН), Москва, Россия — 5.
25. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова (ИТЭФ), Москва, Россия — 5.
26. Московский авиационный институт (Государственный технический университет) (МАИ), Москва, Россия — 5.
27. Московский энергетический институт (Технический университет) (МЭИ), Москва, Россия — 5.
28. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ), г. Саров, Россия — 5.
29. Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия — 5.
30. Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), Москва, Россия — 4.
31. Институт металлургии РАН (ИМЕТ РАН), Москва, Россия — 4.
32. Санкт-Петербургский институт машиностроения (СПИМ), Санкт-Петербург, Россия — 4.
33. Высоковольтный научно-исследовательский центр — филиал Государственного унитарного предприятия "Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина", г. Истра, Московская обл., Россия — 3.
34. Институт неорганических материалов им. А. А. Бочвара, Москва, Россия — 3.
35. Институт вычислительных технологий СО РАН (ИВТ СО РАН), г. Новосибирск, Россия — 3.
36. Институт проблем механики РАН (ИПМех РАН), Москва, Россия — 3.
37. Институт химии высокочистых веществ РАН (ИХВВ РАН), г. Нижний Новгород, Россия — 3.
38. Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия — 3.
39. Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, г. Саранск, Россия — 3.
40. Санкт-Петербургский государственный горный институт (Технический университет) (СПбГГУ), Санкт-Петербург, Россия — 3.
41. Томский государственный университет (ТГУ), г. Томск, Россия — 3.
42. ФГУП «НПП "Исток"», г. Фрязино, Московская обл., Россия — 3.
43. ФГУП "Центр Келдыша", Москва, Россия — 3.
44. Филиал института радиоэлектроники РАН, г. Фрязино, Московская обл., Россия — 3.
45. Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина (ВЭИ), Москва, Россия — 2.
46. Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия — 2.
47. Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия — 2.
48. Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия — 2.
49. ФГУП "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова" (ВНИИЭФА), Санкт-Петербург, Россия — 2.
50. ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения Роскосмоса" (ЦНИИМаш), г. Королев, Россия — 2.
51. Владимирский государственный университет, г. Владимир, Россия — 1.
52. ВНИИ Геосистем, Федеральный центр, Москва, Россия — 1.
53. Восточно-Сибирский государственный технологический университет, г. Улан-Удэ, Россия — 1.
54. Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН (ВЦ РАН), Москва, Россия — 1.
55. Институт астрономии РАН, Москва, Россия — 1.
56. Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, г. Новосибирск, Россия — 1.
57. Институт общей и неорганической химии РАН им. Н. С. Курнакова, Москва, Россия — 1.
58. Институт органической химии им. Зелинского РАН, Москва, Россия — 1.
59. Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинский филиал, г. Фрязино, Московская обл., Россия — 1.
60. Институт СВЧ полупроводниковой электроники, Москва, Россия — 1.
61. Институт химической физики РАН (ИХФ РАН), Москва, Россия — 1.
62. Казанский государственный университет, г. Казань, Россия — 1.
63. НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобелцины, Московский государственный университет, Москва, Россия — 1.

64. НПП ВНИИ Электромеханики, Москва, Россия — 1.

65. Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), г. Дубна, Московская обл., Россия — 1.

66. Филиал института энергетических проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Россия — 1.

67. ФГУП "Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума", Москва, Россия — 1.

68. Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского (ЭНИИ), Москва, Россия — 1.

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

1. Корнельский университет, г. Итака, США.
2. Университет Висконсин-Мэдисон, г. Мэдисон, США.
3. CFD Research Corporation (CFDRC), 215 Wynn Drive, Huntsville, AL, USA.
4. Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton, USA.
5. Имперский колледж, г. Лондон, Великобритания.
6. Резерфордская лаборатория, г. Хилтон, Оксфордшир, Великобритания.
7. EFDA-JET, UK.
8. EURATOM-UKAEA Fusion Association, Culham Science Centre, Abingdon, Oxfordshire, OX14 3DB UK.
9. Исследовательский центр Дрезден-Россендорф, г. Дрезден, Германия.
10. Технический университет, г. Кемнитц, Германия.
11. Institute of Physics, University Greifswald, Domstrasse 10a, 17487, Greifswald, Germany.
12. Centre Lasers Intenses et Applications, Universite Bordeaux 1, Talence, France.
13. Centre de Physique des Plasmas et de leurs Applications de Toulouse CNRS (National Center for Scientific Research), Toulouse, France.
14. Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.
15. Laboratoire des Plasmas Denses, Universite P. & M. Curie, F-75252 Paris Cedex 05, France.
16. Physique des Interactions Ioniques et Moleculaires CNRS-Universite de Provence, Marseille, France.
17. Лаборатория физики плазмы ERM/KMS, Бельгия.
18. Миланский политехнический университет, г. Милан, Италия.
19. Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment, Frascati, Italy.

20. Чешский технический университет, г. Прага, Чехия.

21. Институт физики, г. Прага, Чехия.

22. Институт физики плазмы, г. Прага, Чехия.

23. Институт молекулярной и атомной физики НАНБ, г. Минск, Республика Беларусь.

24. Научно-исследовательский институт прикладной физики Национального университета Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан.

25. Восточно-украинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина.

26. Институт проблем машиностроения им. А. Н. Погодина, г. Харьков, Украина.

27. Институт физики плазмы, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина.

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

29. Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина.

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.

Состоялись четыре пленарных заседания, на которых заслушано 19 обзорных докладов о результатах отечественных и мировых исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, а также о достижениях в развитии плазменных и лучевых технологий. Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 66 устных и 244 стендовых доклада.

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

- В докладе академиком В. П. Смирнова и Е. П. Велихова "*Проект ИТЕР и стратегия развития УТС в России*" (**ИЯС РНЦ "Курчатовский институт"**) было проанализировано современное состояние исследований по проблеме УТС, в частности, особое внимание уделено организации и финансированию проекта ИТЭР в России. Отмечено, что участие России в проекте ИТЭР происходит в форме научной и инженерной проработки проекта, а в будущем к этому добавятся поставка высокотехнологического оборудования и направ-

ление в Центр ИТЭР квалифицированных российских кадров.

Была также изложена стратегия овладения термоядерной энергией в России на ближайшие десятилетия, которая включает в себя как участие в проекте ИТЭР, так и параллельное развитие национальной программы термоядерной энергетики. Важными этапами в ближайшем будущем будут:

участие в разработке международного проекта ДЭМО;

подготовка национальных технологических, промышленных и кадровых ресурсов к сооружению опытной российской термоядерной станции и в перспективе — сооружение первой отечественной промышленной термоядерной станции ориентировочно в 2045—2050 гг.

В докладе были приведены основные позиции Федеральной целевой программы "Овладение энергией термоядерного синтеза. Создание научно-технологической базы термоядерной энергетики в России на 2008—2015 гг.". Эта программа подразумевает создание национального центра УТС на базе экспериментального комплекса Т-15 (РНЦ КИ), реконструкцию и перевооружение действующих российских токамаков, сохранение и развитие национальной базы данных по физике плазмы и УТС, выполнение большого объема металлургических исследований, развитие термоядерных технологий и передачу их в промышленность, подготовку квалифицированных кадров для создаваемых в рамках этой программы 15000 рабочих мест. Успешная реализация данной программы позволит подойти вплотную к промышленному освоению термоядерной энергии.

• Результаты работ большого научного коллектива *ИЯС РНЦ "Курчатовский институт", Москва*, отражены в докладе Д. А. Шелухина "*Современный статус исследований на Т-10*". В докладе представлен обзор основных результатов экспериментов на токамаке Т-10 в 2006 г. Отмечено, что в 2006 г. на Т-10 проводились экспериментальные работы, направленные на решение ряда актуальных задач. Так, изучение явления пробоя рабочего газа с его предварительной ионизацией в токамаке в потоке СВЧ-излучения с частотой второй гармоники ЭЦР является весьма важной проблемой для начальной стадии работы установки ИТЭР.

Большое внимание уделено экспериментальному и теоретическому изучению турбулентности плазмы, определению связи различных мод турбулентности с процессами электронного транспорта в плазме токамака. Проведены эксперименты по исследованию влияния нагрева электронной компоненты на формирование радиальных профилей плотности плазмы. Отмечено, что продолжаются

работы по изучению физики формирования внутреннего транспортного барьера в плазме токамака. Введены в строй инжектор литиевой струи и литиезатор для изучения влияния ввода легких элементов на характер разряда в токамаке и на условия в вакуумной камере. Проведено усовершенствование диагностического комплекса Т-10, направленное на повышение пространственно-временного разрешения диагностик, развиваются новые методики измерений параметров плазмы.

• В докладе канд. физ.-мат. наук С. Е. Гребенщикова "*Эксперименты на стеллараторах. Успехи, проблемы, планы*" (*ИОФ РАН, Москва*) обсуждались результаты экспериментов, выполненных на установках стеллараторного типа за последние два года. Обзор экспериментальных результатов, содержащихся в докладе, в значительной степени основан на материалах недавно прошедшей (октябрь 2006 г., г. Ченду, КНР) 21-й конференции МАГАТЭ по термоядерному синтезу. Докладчик отметил, что наиболее интересные результаты были получены на крупнейшем [ $R = 3,6$  м,  $a = 0,6$  м,  $B = 3$  Тл] сверхпроводящем стеллараторе LHD (Япония)]. Они представляют собой существенный шаг как с точки зрения развития следующего поколения стеллараторов, так и для решения общих (с токамаками) проблем УТС.

• Доклад проф., д-ра физ.-мат. наук В. И. Ильгисониса с соавторами "*Магнитовращательная неустойчивость в космосе и в лабораторном эксперименте*" (*ИЯС РНЦ "Курчатовский институт"*) посвящен обсуждению явления магнитовращательной неустойчивости (МВН), которая относится к числу тех интригующих физических эффектов, которые интенсивно исследуются в последнее десятилетие в связи с ростом научного интереса к глобальным астрофизическим явлениям. В обзоре обсуждены различные аспекты явления МВН: изложена история вопроса, сформулированы отличия МВН от обычной гидродинамической неустойчивости, удовлетворяющей условию Рэлея. Были приведены основные численные и аналитические результаты, полученные на основе уже существующей теории. Особое внимание уделено попыткам обнаружения МВН в экспериментах с течением жидкого металла в магнитном поле; представлены результаты, полученные на наиболее известных установках.

• Доклад "*Моделирование формы спектральных линий для магнитной термоядерной плазмы*" сделан доктором Я. Маранде, представлявшем ученых из *Лаборатории физики взаимодействия ионов и молекул Центра термоядерных исследований Университета Прованса*, а также из *Департамента исследований управляемого термоядерного синтеза (г. Кадараш, Франция)*.

В докладе были освещены важные вопросы, касающиеся теоретического исследования и компьютерного моделирования форм спектральных линий ионов, находящихся в горячей плазме. Показано, что подобные расчеты расширяют возможности понимания таких важных для магнитного удержания плазмы процессов, как перезарядка и рекомбинация ионов плазмы, а также турбулентность плазмы. Например, анализ доплеровского контура линии атомов дейтерия  $D_\alpha$  позволяет рассчитать относительные вклады молекулярного и атомарного потоков дейтерия со стенки вакуумной камеры установок. Исследование формы спектральных линий ионов вносит вклад в понимание процессов, происходящих в рекомбинирующей плазме дивертора, что важно для конструирования такого устройства для ИТЕРа.

Авторами доклада разработана программа детального моделирования переноса излучения в плазме на основе анализа формы спектральных линий ионов, которая вошла составной частью в транспортный код EIRENE.

- В докладе д-ра физ.-мат. наук В. С. Лисицы "*Новые проблемы в спектроскопической диагностике плазмы*" (**ИЯС РНЦ "Курчатовский институт"**) рассмотрен ряд новых проблем спектроскопической диагностики лазерной, астрофизической, термоядерной и низкотемпературной плазмы. Проанализирована общая проблема перехода от ударного электронного уширения к статическому уширению водородных спектров при высоких плотностях плазмы. Обсуждались подходы к решению проблемы измерения сверхсильных магнитных полей ( $>10^3$  Тл) в субпикосекундной лазерной плазме на основе спектроскопических исследований, а также вопросы диагностики плазмы токамака.

Рассмотрено влияние эффекта транспорта примесей на спектральные и полные радиационные потери плазмы. Показано, что учет конечного времени диффузии приводит к резкому изменению интенсивностей синглетных и триплетных линий нейтрального гелия в пристеночной плазме.

Докладчик остановился и на проблеме измерения спектров высоковозбужденных (ридберговских) атомных линий. Рассмотрены также дополнительные проблемы диагностики "теплого плотного вещества", создаваемого облучением конденсированной среды потоками быстрых многозарядных ионов на ускорителях.

- Доклад д-ра физ.-мат. наук В. И. Крауза "*Последние достижения в исследованиях и применении плазменного фокуса*" (**ИЯС РНЦ "Курчатовский институт"**) был посвящен анализу современного состояния исследований в установках типа "Плазменный фокус". Важным для таких ус-

тановок является вопрос о природе насыщения нейтронного выхода: связано ли оно с естественными физическими ограничениями или обусловлено недостатками в инженерных проработках узлов установок. Результаты анализа корреляции динамики пинча с эмиссией нейтронного и рентгеновского излучения в различных диапазонах спектра электронных и ионных пучков свидетельствуют о преобладании пучково-мишенного механизма генерации нейтронов, при котором, по видимому, ключевую роль играют процессы захвата ускоренных ионов собственным магнитным полем пинча и их взаимодействия с плотной плазменной мишенью. Тем не менее проблема насыщения нейтронного выхода остается открытой, что требует, в частности, более тщательного исследования эффективности контракции тока и его распределения в области пинчевания.

Было отмечено, что в мировом научном сообществе в настоящее время наблюдается интенсификация усилий, направленных на практическое применение установок типа "Плазменный фокус". Важной тенденцией является создание международных проектов, направленных на координацию усилий различных научных коллективов. Намечались перспективы использования плазменного фокуса в качестве источника рентгеновского и нейтронного излучений в области радиационного материаловедения, энзимологии, рентгеновской литографии и др.

- В докладе д-ра физ.-мат. наук П. В. Сасорова "*Физика сжатия многопроволочных Z-пинчей*", представленном коллективами **ИТЭФ (Москва)** и **ТРИНИТИ (г. Троицк, Московская обл.)**, сделан обзор экспериментальных, расчетных и теоретических результатов, полученных за последние пять лет по физике сжатия многопроволочных сборок в установках Z-пинчевого типа. Отмечено, что использование многопроволочныхборок в Z-пинчевых установках привело к созданию очень эффективного источника мягкого рентгеновского излучения. Был дан обзор экспериментальных, расчетных и теоретических результатов о темпе абляции плазмы с относительно холодных проволочек по направлению к оси разряда в зависимости от параметров конструкцииборок. Решающей оказывается зависимость темпа абляции от числа проволочек. Это обстоятельство, а также возможность варьирования числа проволочек в сборке в широком диапазоне значений и определяют преимущества многопроволочныхборок по отношению к другим возможным нагрузкам, воспринимающим ток генератора. Был проведен обзор экспериментальных, расчетных и теоретических результатов по динамике плазмы в Z-пинчах с учетом эффекта затянутого плазмообразования,

когда превращение вещества металлических проволок в плазму занимает существенную часть времени стадии нарастания тока.

• В докладе проф., д-ра физ.-мат. наук Г. М. Фраймана *"Когерентные столкновительные эффекты в релятивистски сильных полях в плазме" (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)* отмечалось, что последнее десятилетие характеризуется бурным развитием фемтосекундной лазерной техники. Все более широко обсуждаются возможные механизмы генерации импульсов аттосекундной длительности. Это становится возможным в связи с появлением лазеров петаваттного уровня мощности, число которых в мире быстро растет.

В обзоре были приведены последние достижения в этой области исследований и более подробно дан анализ столкновительных эффектов в прозрачной плазме при воздействии сильного (в том числе и релятивистски сильного) лазерного излучения.

Показано, что по мере роста интенсивности поля мощность энергопотерь, обусловленная столкновениями, не ослабевает; столкновения сопровождаются отрастанием "хвостов" быстрых электронов, распределенных по степенному закону. На основе современных теоретических исследований может быть получена оценка полного числа быстрых электронов в плазме, найдены радиационные потери при столкновениях заряженных частиц плазмы в сильных лазерных полях. За счет когерентных эффектов возможны генерация последовательности импульсов аттосекундной длительности и их усиление.

В докладе был также проведен анализ результатов экспериментов, демонстрирующих возможность наблюдения указанных эффектов.

• Доклад д-ра физ.-мат. наук А. В. Красильникова *"Ионный циклотронный нагрев дейтериевой плазмы JET на фундаментальной частоте" (ТРИНИТИ, Лаборатория физики плазмы — ERM/KMS, Бельгия; EFDA-JET, Великобритания; РИЦ "Курчатовский институт")* посвящен результатам цикла измерений параметров плазмы, выполненных на крупнейшем из действующих токамаков — установке JET.

Были представлены результаты исследований ионного циклотронного нагрева (ИЦН) на фундаментальной частоте дейтерия при косой инжекции нейтралов (ИН) дейтерия в дейтериевую плазму JET. Перед экспериментами были проведены 1D-, 2D- и 3D-моделирования ИЦН плазмы установки JET с применением кодов TOMCAT, CYRANO и PSTELION, соответственно.

Моделирование продемонстрировало, что в исследуемой схеме нагрева реализуются несколько механизмов нагрева, имеющих отношение к

ИТЭР: фундаментальный нагрев плазменных и пучковых дейтронов, нагрев на малой добавке ионов Be и Ag, электронный нагрев. Эффект фундаментального нагрева был ясно продемонстрирован в экспериментах на JET. Прямой ИЦН пучковых дейтронов измерен анализатором атомов перезарядки в диапазоне энергий 120—240 кэВ и также зарегистрирован  $\gamma$ -спектроскопией. Нагрев ионов и электронов (прямой и посредством резонансных дейтронов) продемонстрирован вызванным ИЦН увеличением ионной и электронной температур с ~4,3 и 4,5 кэВ (фаза ИН без ИЦН) до ~5,5 и 4,8 кэВ (фаза ИН с ИЦН), соответственно. Во время ИЦН не было обнаружено деградации параметров, характеризующих удержание энергии плазмы. Существенный рост поступления примесей ионов Be и Ag со стенок камеры зарегистрирован при ИЦН. При добавлении 21 % ( $P_{\text{ИЦН}} = 1,45 \text{ МВт}/P_{\text{ИН+ОН}} = 7 \text{ МВт}$ ) мощности нагрева (ИЦН) выход термоядерной мощности увеличился на 45 %.

• Большой коллектив авторов из **ФТИ РАН (Санкт-Петербург)** представил доклад *"Результаты исследований на токамаке "Глобус-М" за период 2005—2006 гг."* В докладе отмечалось, что благодаря ряду технологических усовершенствований в сильноточном разряде сферического токамака "Глобус-М" получено снижение концентрации примесей и электрического напряжения на обходе. В ходе экспериментов по достижению предельных плотностей в омическом режиме и при нейтральной инжекции зарегистрированы рекордные значения плотности, превышающие  $1,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  в разрядах с газонапуском, при тороидальном магнитном поле 0,4 Тл.

Исследовался спектр замедляющихся частиц нейтрального пучка, который оказался в хорошем соответствии с классической теорией кулоновского рассеяния.

Получены и исследованы режимы с нейтральной инжекцией с перегретыми ионами и режимы с высокой плотностью, с признаками электронного нагрева. Нагрев на основных гармониках ионного циклотронного резонанса (ИЦР) малой добавки водорода в дейтериевой плазме показал, что его эффективность относительно высока и увеличивается с ростом концентрации водорода в диапазоне изменения долей 10—70 %. Четкий переход в H-моду был получен в омическом режиме и в режиме с нейтральной инжекцией. Зарегистрированы все типичные особенности H-моды, включая режим генерации ELMs. Обсуждались экспериментальные условия и пороги для перехода в H-моду.

• Доклад д-ра физ.-мат. наук А. А. Иванова *"Осесимметричные магнитные ловушки" (ИЯФ СО РАН", г. Новосибирск)* посвящен исследова-

ниям удержания и нагрева плазмы в современных осесимметричных магнитных ловушках — газодинамической ловушке (ГДЛ) и многопробочной ловушке (ГОЛ-3). Отмечено, что в последние годы достигнуто значительное повышение параметров плазмы в обеих установках. Так, на установке ГОЛ-3 температура электронов и ионов составляет около 2 кэВ при плотности плазмы  $\sim 10^{21} \text{ м}^{-3}$ . На установке ГДЛ достигнута плотность быстрых ионов, превышающая плотность основной плазмы.

В докладе были представлены основные результаты, полученные на этих установках в последние годы, и обсуждены ближайшие перспективы развития многопробочных ловушек.

- Доклад д-ра физ.-мат. наук Б. М. Смирнова, П. В. Каштанова и R. Hippler *"Кластерная магнетронная плазма" (Объединенный институт высоких температур РАН, Институт физики Университета Грайфсвальда, Германия)* представлял собой анализ процессов в магнетронной кластерной плазме, уносимой потоком буферного газа. Этот поток инертного газа уносит металлические кластеры из магнетронной камеры через отверстие в ней. Проанализированы два вида процессов в магнетронной плазме. Первый относится к кинетике процессов с участием металлических атомов, первоначально выбитых с катода. Эти атомы с энергией порядка десятка электронов вольт вылетают с поверхности катода и далее тормозятся и термализуются в буферном газе, а затем часть этих атомов образует кластеры. Вторая группа процессов происходит при выводе кластеров в потоке буферного газа через отверстие в магнетронной камере. Атомы буферного газа пересекают область отверстия со скоростью, близкой к звуковой, и эта скорость точно определяется из измерения расхода буферного газа. Однако по мере роста скорости газа при подходе к отверстию скорость кластеров становится меньше скорости газа в силу большой массы кластеров. Поэтому плотность атомов на выходе возрастает на порядок величины, и вблизи отверстия частично происходит коагуляция нейтральных кластеров. Проанализированы условия, обеспечивающие эффективный выход кластеров в потоке буферного газа.

- Доклад проф., д-ра физ.-мат. наук Е. З. Гусаква *"Коротковолновая компонента микротурбулентности и аномальный электронный перенос в токамаке" (Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Москва)* был посвящен исследованию коротковолновой электростатической турбулентности, вызванной неустойчивостью ETG-моды как одной из основных причин аномального электронного переноса в токамаке. Отмечено, что в настоящее время на нескольких токамаках (DIII-D, NSTX, Tore Supra, ФТ-2) ведется

форсированное развитие новых диагностик, основанных на использовании микроволнового рассеяния под большими углами и ориентированных на возможность экспериментального обнаружения ETG-моды.

В обзоре были представлены применяемые при этом подходы и, в частности, обсуждались преимущества развиваемой во ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН корреляционной диагностики микроволнового рассеяния назад в верхнем гибридном резонансе. Эти преимущества состоят в высокой радиальной и полоидальной локализации измерений и в возможности восстановления спектров турбулентности в широком диапазоне волновых векторов, где ожидается возбуждение неустойчивости ETG-и коротковолновых TEM-мод.

Были приведены результаты первых наблюдений коротковолновой компоненты дрейфовой микротурбулентности, выполненных на токамаках DIII-D, NSTX и ФТ-2. Кроме того, были представлены спектры турбулентности по волновым числам, показана чувствительность ее уровня к превышению порога неустойчивости ETG-моды и продемонстрированы результаты исследования корреляции поведения коротковолновой турбулентности с изменением электронной теплопроводности в экспериментах по ВЧ-нагреву и подъему тока.

- Большой интерес вызвал доклад проф., д-ра физ.-мат. наук И. А. Косого и проф., д-ра физ.-мат. наук Г. М. Батанова *"Явление резонанса в незамагниченной неоднородной плазме. Физика и возможные приложения" (Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН)*. В докладе отмечалось, что явление, известное как "плазменный резонанс", заключается в совокупности сильно нелинейных процессов, развивающихся вблизи "критической" концентрации, взаимодействующей с микроволнами пространственно неоднородной плазмы (в области, в которой электронная ленгмюровская плазменная частота равна циклической частоте микроволнового излучения). Обсуждались предсказываемые теорией условия, в которых в области резонанса энергия микроволнового излучения эффективно трансформируется в нагрев электронного компонента и в генерацию высокоэнергичных электронных пучков. Был проанализирован цикл экспериментов по исследованию явления резонанса в разлетающейся в вакуум плазме, генерируемой микроволновыми пучками на твердых мишенях.

Представлены результаты экспериментов по исследованию плазменного резонанса при генерации микроволнового разряда в газовой среде. Обсуждались возможности использования явления плазменного резонанса в различного рода техни-

ческих и технологических приложениях микроволновой плазмы.

• В докладе А. Л. Хомкина и А. С. Шумихина *"Развитие концепции химических моделей плазмы" (Объединенный институт высоких температур РАН, Москва)* дан критический анализ существующих химических моделей плазмы. Также были изложены основы развиваемого авторами нового подхода, получившего название "концепция базовых химических моделей плазмы", для которой поправки на взаимодействие свободных зарядов оказываются существенно меньше поправок, даваемых широко известной в литературе так называемой дебаевской теорией.

На основе нового подхода выполнены многочисленные расчеты термодинамических функций плазмы и ее состава. Впервые удалось записать одновременно выражения для статистической суммы атома и поправок на взаимодействие свободных зарядов через единственную произвольную величину — вероятность реализации связанного состояния в плазме. Выбирая для этой величины различные модели, как существующие в литературе, так и новые, был получен набор базовых химических моделей, отличительной особенностью которых является их полное соответствие точным асимптотическим результатам в большом каноническом ансамбле.

В докладе был дан сравнительный анализ соответствия результатов расчета термодинамических, оптических и переносных характеристик неидеальной атомарной плазмы, выполненных для нескольких базовых химических моделей и данных экспериментов.

• Доклад д-ра физ.-мат. наук Е. В. Грабовского и коллектива авторов из ТРИНИТИ *"Исследование излучающих Z-пинчей и проект "Байкал"»* был посвящен работам по исследованию физики излучающих Z-пинчей для применения их в качестве источника мягкого рентгеновского излучения для зажигания мишени ИТС, которые ведутся в **ГНЦ РФ ТРИНИТИ**.

Одновременно проводятся работы по сооружению модуля генератора, который должен создавать импульс тока в несколько десятков мегаампер для питания такого излучающего Z-пинча. Исследования по физике сжатия плазмы Z-пинча ведутся на установке "Ангара-5-1" — самом крупном в России лабораторном источнике импульсной электрической мощности.

Говоря о последних экспериментах на установке "Ангара-5-1", докладчик подчеркнул, что в результате экспериментов было показано количественное различие в поведении проволочных лайнеров из различных материалов. В результате сравнения данных электротехнических, рентгенов-

ских и оптических измерений показано наличие на финальной стадии сжатия пинча "квазиомического" электрического сопротивления, вносящего заметный вклад в излучение. Показано, что скорость среднего токового радиуса сжимающейся оболочки имеет резкий максимум в момент возникновения рентгеновского излучения. Обнаружена генерация электронных пучков в плазме Z-пинча в некоторых режимах сжатия проволочных лайнеров.

• На секции *"Магнитное удержание высокотемпературной плазмы. Теория и эксперимент"* (председатель секции — канд. физ.-мат. наук А. И. Мещеряков) был представлен 81 доклад (из них 20 докладов заслушано на устных заседаниях и 61 — на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками из 15 российских научных центров, 7 докладов выполнены совместно с сотрудниками научных центров Германии, Франции, Италии, Великобритании, Украины.

• Большой интерес вызвали исследования, выполненные на стеллараторе L-2M. Так, в теоретической работе проф., д-ра физ.-мат. наук Л. М. Коврижных *"Моделирование процессов переноса в стеллараторах" (ИОФ РАН)* на базе неоклассической теории с учетом аномальных потерь энергии из плазмы предложена относительно простая модель процессов переноса в стеллараторах. Результаты расчетов, выполненных в рамках предложенной модели для стеллараторов L-2M, ATF, CHS и LHD в широком диапазоне плотностей плазмы и поглощаемой мощности, показали, что энергетическое время жизни в этих установках с точностью до коэффициентов порядка единицы совпадает с теми, которые следуют из эмпирических скейлингов (ISS-95 и LHD). Существенно, что это согласие наблюдается как для установок с различными параметрами, так и для весьма широкого интервала средних плотностей плазмы и поглощаемых мощностей, хотя с увеличением размеров установки относительная роль аномальных потерь возрастает, и коэффициент превышения падает, хотя и незначительно. Полученные результаты вселяют определенный оптимизм и указывают на целесообразность дальнейшего совершенствования модели, например в том, что касается вида аномальных потерь.

• В докладе проф., д-ра физ.-мат. наук Г. М. Батанова *"Устойчивость и изменение параметров плазмы в стеллараторе L-2M при возбуждении индукционного тока в режиме ЭЦР-нагрева" (ИОФ РАН)* рассказывалось об экспериментальном исследовании изменения параметров плазмы, МГД активности и турбулентных пульсаций концентрации при искажении магнитной структуры стелларатора L-2M полем индукционного тока.



Направление тока было выбрано таким, чтобы уменьшался суммарный угол вращательного преобразования. Величина тока повышалась до таких величин, чтобы суммарный угол вращательного преобразования менял свой знак. Численный анализ, проведенный для этих условий, свидетельствует о возникновении в плазме стелларатора многоосевой структуры с магнитными островами, размер которых может быть порядка половины среднего радиуса плазмы. Магнитные измерения, выполненные при токах выше 10 кА, указывают на возбуждение во внутренних областях плазмы магнитных островов и МГД колебаний с пространственными параметрами моды колебаний  $m = 2$  и  $n = 0$ . При возбуждении индукционного тока наблюдается падение электронной температуры плазмы до величины доли 0,7 от значения температуры, характерной для бестокового режима во внутренних областях плазмы, и сохранение скачка температуры в присепаратрисной области.

Зарегистрировано также изменение радиального профиля концентрации заряженных частиц в плазме стелларатора в тех же режимах. Наблюдается изменение характеристик турбулентных пульсаций концентрации заряженных частиц как во внутренних, так и периферийных областях плазмы. Однако несмотря на усиление процессов переноса в отдельных областях плазменного шнура, следует отметить, что возбуждение в магнитной конфигурации Л-2М многоосевой структуры с магнитными островами не вызывает катастрофического усиления процессов переноса.

На стеллараторе Л-2М продолжались 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 ( $P = 50—300 \text{ кВт}$ ). Также существенно уменьшилась 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 СВ-мощности. В этих режимах обнаружен краевой транспортный барьер, который выражается в резком градиенте электронной температуры вблизи сепаратрисы.

• В докладе канд. физ.-мат. наук Г. С. Воронова "Уточнение пороговой мощности перехода в режим удержания с краевым транспортным барьером при ЭЦР-нагреве плазмы в стеллараторе Л-2М" (ИОФ РАН) показано, что транспортный барьер возникает 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 последнее время увеличивается число токамаков, в которых проводятся эксперименты с литиевой диафрагмой. В докладе проф., д-ра физ.-мат. наук С. В. Мирнова "Прогресс литиевых токамаков" (ТРИНИТИ) сделан обзор экспериментов по применению таких диафрагм в токамаках, в частности в Т-11М (ТРИНИТИ), FTU (ENEA, Фраскати), NSTX (PPPL, Принстон) и Т-10 (ИЯС РНЦ "Курчатовский институт").

На основании данных, полученных в экспериментах на этих четырех токамаках, делается вывод о четко выраженной особенности всех экспериментов с периферийной инжекцией лития и литиевыми лимитерами в токамаках — сравнительно быстрое установление стационара с экранированием лития в периферийных областях плазменного шнура. Необходимо понять физический механизм этого фундаментального явления в целях активного управления временем жизни лития и, соответственно, его плотностью вблизи границы, например путем магнитной стохастизации, пропуская между лимитерами электрические токи.

• В докладе В. Б. Лазарева "Обзор работ по экспериментам с литиевым лимитером в токамаке FTU" (ТРИНИТИ) приведены результаты экспериментов с литиевой диафрагмой в токамаке FTU (Фраскати, Италия).

Применение литиевой диафрагмы позволило достичь и даже превысить в 1,4 раза предел по плотности плазмы (предел Гринвальда). В ходе экспериментов продемонстрирована стабилизация жидкого лития в условиях сильных магнитных полей и токов (6 Тл и 0,8 МА, соответственно).

Успешно испытан новый способ литиезации, его особенность — работа в процессе разряда токамака. Обнаружено улучшение основных параметров разряда в токамаке даже по сравнению с боронизацией. Изучена возможность управления рециклингом лития. Результаты согласуются с данными, полученными также в установках Т-11М и NSTX.

Как и в предыдущие годы, значительное число работ, представленных на устной и стендовой секциях, посвящено экспериментам на открытых магнитных ловушках: ГДЛ, ГОЛ-3, АМБАЛ-М. Исследования на этих установках направлены на то, чтобы повысить параметры плазмы и показать возможность осуществления на основе открытых ловушек мощного источника термоядерных нейтронов. Такой источник будет востребован в бли-

жайшее время для испытания конструкционных материалов, стойких по отношению к длительному воздействию на них мощных потоков нейтронов с энергией 14 МэВ.

- Последние результаты экспериментов в этом направлении представлены в докладе д-ра физ.-мат. наук А. В. Бурдакова *"Многопробочная ловушка ГОЛ-3: недавние результаты"* (ИЯФ СО РАН). Осуществляя нагрев плазмы в этой установке с помощью электронного пучка, были найдены условия для эффективного удержания плотной высокотемпературной плазмы в многопробочной магнитной конфигурации. В недавних экспериментах получена электронная температура плазмы в интервале значений 2—4 кэВ при плотности  $0,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . В экспериментах с инжекцией электронного пучка в плазму, удерживаемую в гофрированном магнитном поле, обнаружен и объяснен эффект быстрого (коллективного) нагрева ионов, и получена ионная температура до 2 кэВ при плотности плазмы  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

- Применение нейтронных источников на основе ГДЛ в качестве драйвера для подкритичного реактора деления предложено в докладе А. В. Аникеева *"Перспективы использования газодинамической ловушки в реакторе для дожигания радиоактивных отходов"* (ИЯФ СО РАН).

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

- По секции *"Инерциальный термоядерный синтез"* (председатель секции — д-р физ.-мат. наук Г. В. Иваненков) было проведено четыре заседания, на которых были заслушаны 12 устных и представлено 44 стендовых доклада.

Тематика докладов отвечала основным направлениям исследований в области ИТС, связанным с применением в качестве драйверов лазерных пучков, Z-пинчей и ускоренных пучков тяжелых ионов, а также родственным вопросам развития плазменных методов лазерного ускорения заряженных частиц.

- Среди сообщений по теме лазерного ИТС наибольший интерес вызвал устный доклад Н. Г. Борисенко *"Изучение физических процессов в облучаемых мощными лазерными пучками пористых средах различной микроструктуры и химического состава"* (ФИ РАН, Москва), посвященный совместным исследованиям с чешскими коллегами процесса поглощения излучения йодного лазера низкоплотным веществом мишени из аэрогеля.

- Доклад В. Д. Атаманенко *"Численное исследование зависимости горения мишени для установки "ИСКРА-6" от учета различных физических процессов"* (РФЯЦ-ВНИИЭФ) о результатах численного моделирования лазерного сжатия мишеней для создаваемой установки "Искра-6" вызвал большую дискуссию в связи с результатами расчетов группы Н. Г. Карлыханова (РФЯЦ-ВНИИТФ), доложенными на прошлогодней конференции.

- Весьма интересен был доклад В. А. Щербакова, в котором был дан обзор исследований термоядерного синтеза при взрыве заряда ВВ, проводившихся в СССР и ПНР. Большую аудиторию собрали стендовые доклады, посвященные экспериментальным исследованиям и расчетам взаимодействия излучения фемтосекундных лазеров с различными типами мишеней.

- Особо следует отметить аналитические модели и методы расчета спектральной яркости плазменных объектов, предложенные группой проф., д-ра физ.-мат. наук В. В. Розанова (ФИАН) в работе *"Аналитические модели расчета спектральной яркости излучения плазменных объектов различной конфигурации"*, а также численные модели удаления паразитных пиков в рентгеновских спектрах фемтосекундной лазерной плазмы (В. А. Гасилов и др. из ИММ РАН).

- В тематике группы докладов о применении в ИТС Z-пинчей доминировали сообщения о сжатии плазмы, образующейся при электрическом взрыве многопроволочных сборок. Этой теме были посвящены устные доклады Г. М. Олейника, К. Н. Митрофанова (ТРИНИТИ) и С. С. Ананьева (ИЯС РНЦ "Курчатовский институт") об экспериментах на установках "Ангара-5-1" и СС-300.

Особо следует отметить начатое в ТРИНИТИ изучение сжатия конических проволочных лайнеров. Упрощенное 2-мерное численное моделирование этого процесса, пока не описывающее эффекта затягивания плазмообразования, было представлено В. А. Гасиловым. Важно, что затронутые в этих устных докладах проблемы, были подробно освещены в большой серии стендовых докладов, привлечших внимание многих участников конференции.

Здесь же были представлены доклады группы сотрудников *Физического института им. П. Н. Лебедева РАН* о процессах взрыва проволочек, ответственных за затягивание образования плазмы в экспериментах по сжатию сборок.

- Теме ИТС на ускоренных пучках тяжелых ионов было посвящено несколько докладов. Устные доклады А. Г. Аксенова (ИТЭФ) и Г. В. Долголевой (РФЯЦ — ВНИИЭФ), посвященные процессам при распространении волны термоядерного горения в цилиндрической мишени, по сути, пред-

ставили альтернативные подходы к этой проблеме. В прозвучавшем более ярко последнем из них сложные компьютерные расчеты иллюстрировались точным решением одномерной задачи в рамках простой газодинамической модели кумуляции в многослойной системе.

Следует отметить новую тенденцию, которая обозначилась на прошедшей конференции: ряд докладов, посвященных изучению процессов в поле релятивистки интенсивного излучения фемтосекундного лазера, а также электрического взрыва проводников, теперь был представлен на секцию "Физические процессы в низкотемпературной плазме".

В этом году по сравнению с предшествующими конференциями было представлено меньше докладов из ядерных центров России. В связи с этим отсутствовал и наблюдавшийся в последние годы рост числа молодых докладчиков.

• На конференции в рамках секции "*Физические процессы в низкотемпературной плазме*" (председатель секции — проф., д-р физ.-мат. наук В. С. Воробьев) было заслушано 27 устных докладов и представлено 65 стендовых сообщений.

Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям:

1. Низкотемпературная плазма, стимулированная внешними воздействиями.
2. Различные виды электрических разрядов.
3. Пылевая и комплексная плазма.

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

Результаты конференции 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. Получены новые экспериментальные данные по пылевой плазме. Исследовались динамические процессы при воздействии электронного пучка на пылевое облако. При включении электронного пучка наблюдалось изменение таких параметров плазменно-пылевой структуры как межчастичное расстояние, скорость частиц, параметр неидеальности.

Использование электронного пучка с варьируемой частотой развертки позволяет проводить воздействие как на всю пылевую структуру в целом, так и на ее отдельные части.

• Ряд докладов был посвящен исследованиям ридберговских атомов и проблеме создания так называемой ридберговской материи. Так, в докладе М. Б. Кадомцева, М. Г. Левашова и В. С. Лисицы (*ИЯС РНЦ "Курчатовский институт"*)

"*Классическая радиационно-столкновительная кинетика ридберговских атомов*" рассматривалась астрофизическая плазма с плотностью порядка  $\sim 10^4 \text{ см}^{-3}$ . В этих условиях могут существовать возбужденные атомы с главными квантовыми числами порядка сотен и даже тысяч, размер орбиты которых достигает долей миллиметра. В докладе была развита ударно-столкновительная кинетика для таких состояний.

Доклады, представленные по исследованиям пылевой плазмы, свидетельствуют о бурном развитии этого направления физики плазмы.

• В докладе проф., д-ра физ.-мат. наук В. С. Воробьева, д-ра физ.-мат. наук О. Ф. Петрова и академика В. Е. Фортова (*ИТЭС ОИВТ РАН*) "*Упорядоченные пылевые структуры в плазме тлеющего разряда*" впервые было рассчитано самосогласованное электрическое поле внутри упорядоченной пылевой структуры, найдена величина потенциала, необходимого для удержания такой структуры в направлении, перпендикулярном оси разряда. Из этой работы следует, что часто используемое приближение для взаимодействия пылевых частиц — экранированный кулоновский потенциал — неправомерно для упорядоченных структур.

• Новые экспериментальные данные представлены в докладе д-ра физ.-мат. наук С. А. Майорова, С. Н. Антипова и др. (*ИОФ РАН, ИВТ РАН, ИТЭС ОИВТ РАН*) "*Численное моделирование пылевой плазмы в криогенном разряде*". При криогенных температурах впервые наблюдались шарообразные плотные пылевые структуры. Это обстоятельство проливает свет на возможность образования плотной конденсированной материи из первоначально разреженной заряженной плазмы.

• Большое число докладов было представлено на двух заседаниях стендовой секции. Часть докладов была связана с технологическими применениями низкотемпературной плазмы. К их числу относятся доклады В. А. Бабурова и др. (*ФГУП «НПП "ИСТОК"»*) "*Плазмохимическое осаждение нитрида кремния с заданными электрическими свойствами для СВЧ-конденсаторов*", доклад проф., д-ра физ.-мат. наук А. А. Балмашнова, канд. физ.-мат. наук А. В. Калашникова (*РУДН*) "*Компактный микроволновый источник плазмы CERA-RI*".

Другая часть докладов была связана с исследованием свойств и процессов в низкотемпературной плазме, таких как кинетика возбуждения колебательных уровней (О. А. Гордеев, В. А. Шахатов, Е. М. Пушкин (*МАИ, ИНХС РАН*) "*Исследование кинетики возбуждения колебательных уровней  $N_2(C^3\Pi_u)$  и  $N_2(B^3\Pi_g)$  в азотной плазме газовых разрядов*"), возбуждение инфразвуковых колебаний в

пылевой плазме ионосферы (С. И. Копнин, С. И. Попель (*ИДГ РАН, Москва*) "*Возбуждение инфразвуковых колебаний в пылевой плазме ионосферы*").

Третья группа докладов была посвящена развитию методов диагностики низкотемпературной плазмы. Сюда относятся доклады М. В. Котельникова, Т. В. Прокопьева (*МАИ*) "*Нестационарный электрический зонд: Теория и применение*", д-ра физ.-мат. наук Ю. А. Лебедева, П. В. Соломахина и др. (*ИНХС РАН*) "*О пространственной структуре электродного микроволнового разряда*" и ряд других докладов.

- 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., д-р физ.-мат. наук А. Ф. Александров) было проведено два устных заседания, на которых были заслушаны 11 докладов, и одно заседание, на котором были доложены 37 стендовых докладов. На секции были представлены результаты работы более 30 ведущих научных центров России, Узбекистана, Украины, Германии и Великобритании.

- В докладе проф., д-ра физ.-мат. наук О. А. Синкевича, \*С. Е. Чигунова, \*Э. Х. Исакаева (*МЭИ, \*ИВТ РАН*) "*Гидродинамические и электрические характеристики плазмотронов в ламинарных и турбулентных режимах течения плазмы*" на основе аналитических решений и численных экспериментов исследованы особенности течений плазмы на стабилизированных участках каналов электродуговых плазмотронов. Предложен метод, позволяющий, используя численные расчеты и данные экспериментов, определить критерий перехода от ламинарного режима течения к турбулентному. Показано, что немонотонность коэффициента динамической вязкости плазмы по сечению канала приводит к появлению двух точек перегиба на профиле скорости плазмы.

- В докладе С. Т. Суржикова и Д. М. Хрупова (*ИПМ РАН*) "*Взаимодействие струи импульсного плазменного двигателя с набегающим потоком замагниченной разреженной плазмы*" рассмотрено взаимодействие струи импульсного плазменного двигателя с набегающим потоком замагниченной разреженной плазмы. Представлены трехмерная вычислительная модель и результаты расчетов динамики плазменной струи импульсного плазменного двигателя в замагниченном потоке окружающей плазмы. Магнитогазодинамическая модель процесса, основанная на приближении идеальной магнитной газовой динамики, позволяет предсказать динамику плазменного сгустка после окончания импульса при его взаимодействии с окружающей средой и магнитным полем.

- В докладе \* Р. К. Аллаярова, Г. И. Змиевской, \*\*Т. В. Левченко (*ИПМ РАН, \*МФТИ, \*\*ВНИИГеосистем*) "*Численное моделирование конденсации паров графита при однородном расширении в вакуум*" представлено моделирование процесса конденсации паров графита при понижении температуры от 4000 К, при варьировании заряда на капле и при разных скоростях расширения паров.

Обсуждались вопросы расчетов зарядов на каплях разлетающихся кластеров и параметров плазмы с помощью кода пылевой плазмы, кинетики плазмохимических реакций в плазме разряда, используя модель однородного расширения в вакуум.

- В работе канд. физ.-мат. наук Л. В. Шибковой, проф., д-ра физ.-мат. наук А. Ф. Александрова и др. (*МГУ им. М. В. Ломоносова*) "*Разряд в смесях инертных газов*" рассматривались физические процессы, протекающие в неравновесной нестационарной плазме разряда в многокомпонентных смесях инертных газов.

В докладе обсуждалось пространственное перераспределение компонентов в бинарных и тройных смесях инертных газов, рассмотрены различные механизмы, приводящие к разделению смесей инертных газов. Изучена кинетика неравновесной плазмы импульсного разряда, определены процессы, влияющие на кинетику заселения метастабильных состояний в чистых инертных газах и их смесях, рассматривалось влияние долгоживущих возбужденных атомов на повторный пробой газа.

Описаны эксперименты по определению констант скоростей некоторых процессов с участием метастабильных атомов, а также приведены результаты измерений температурных зависимостей коэффициентов диффузии метастабильных атомов в чистых инертных газах и их смесях. Рассмотрен экологически чистый, безотходный, высокопроизводительный плазменный метод очистки газов от примесей в неравновесной плазменной среде.

- В докладе С. А. Двинаина, В. В. Михеева и др. (*МГУ им. М. В. Ломоносова*) "*О структуре положительного столба разряда постоянного тока в поперечном потоке газа (воздуха)*" показано, что на начальной стадии развития разряда, когда поле в плазме выше порогового, поперечный размер разряда определяется скоростью диффузионной волны ионизации. На следующей стадии развития накопление атомарного кислорода приводит к росту отлипания электронов от отрицательных ионов, и размер области протекания тока определяется диффузией активных частиц. На заключительном этапе влияние на процессы в разряде оказывает нагрев газа в центральной области.

- Вопросам, связанным с возбуждением и поддержанием слабой детонационной волны в ги-

перзвучивом потоке с помощью микроволнового разряда, был посвящен доклад д-ра физ.-мат. наук К. В. Ходатаева (**ФГУП "МРТИ РАН"**) *"Возбуждение и поддержание слабой детонационной волны в гиперзвуковом потоке с помощью микроволнового разряда"*.

Моделирование подтвердило способность стримерного микроволнового разряда к инициации детонации в стехиометрической воздушно-пропановой или воздушно-керосиновой смеси при атмосферном давлении.

Сделан вывод о том, что использование такого режима горения может помочь при разработке схемы прямого реактивного двигателя со сверхзвуковым горением, который будет обладать весьма высоким удельным импульсом.

- В докладе д-ра физ.-мат. наук Н. А. Попова (**НИИЯФ МГУ**) *"Влияние неравновесного возбуждения на воспламенение водород-кислородных смесей"* был представлен анализ экспериментально-теоретических исследований по влиянию атомов водорода и кислорода, электронно-возбужденных молекул синглетного кислорода на время индукции и смещение пределов воспламенения водород-кислородной смеси.

- В докладе проф., д-ра физ.-мат. наук В. М. Шибкова, проф., д-ра физ.-мат. наук А. Ф. Александрова и др. (**Физический факультет МГУ**) *"Нетепловой механизм инициирования сверхзвукового горения углеводородного топлива в условиях газоразрядной плазмы"* рассмотрено влияние свободно локализованного и поверхностного СВЧ-разрядов на воспламенение предварительно перемешанного пропан-воздушного сверхзвукового потока с числом Маха  $M = 2$ .

Экспериментально показано, что с помощью низкотемпературной плазмы СВ-разряда можно реализовать нетепловое воспламенение сверхзвукового воздушно-углеводородного потока. Для определения влияния различных каналов передачи энергии на воспламенение сверхзвукового потока горючих газообразных смесей разработана кинетическая модель воспламенения углеводородно-воздушных смесей при учете влияния электрического поля на процессы диссоциации молекул и создания активных радикалов, возбужденных и заряженных частиц в условиях неравновесной плазмы газового разряда.

- В докладе канд. физ.-мат. наук В. А. Иванова и др. (**ИОФ РАН**) *"Исследование возбуждения микроплазменных разрядов на металлах с диэлектрической пленкой"* представлены экспериментальные и теоретические исследования процессов возбуждения микроплазменных разрядов на металлической поверхности, частично покрытой диэлектрической пленкой и облучаемой внешним

потоком водородной плазмы. Измерены скорости движения микроплазменных разрядов вдоль поверхности диэлектрической пленки. Разработана гидродинамическая модель возбуждения плазменным потоком микроплазменных разрядов на металлической поверхности, частично покрытой диэлектрической пленкой.

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

Доклады, представленные на конференцию, были опубликованы в сборнике "Тезисы докладов XXXIV 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).

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

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

*Организаторами XXXIV конференции* являлись Научный совет по физике плазмы Российской академии наук, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Научный совет РАН по комплексной проблеме "Физика низкотемпературной плазмы", Институт теплофизики экстремальных состояний при Объединенном институте высоких температур РАН, Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы.

1. XXXIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых России и приглашенных иностранных ученых, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза.

Конференция проходила уже 34-й раз и собрала на свои заседания значительное число участников из 68 научных центров России и 29 зарубежных научных организаций, подтвердив свой международный статус. Участники конференции активно обсуждали важнейшие проблемы физики плазмы, стоящие перед мировой наукой и техникой. Проведение конференции имеет большое значение для развития исследований по физике плазмы в России, и целесообразность ее проведения в дальнейшем не вызывает сомнения.

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

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

4. Остается все еще значительным число представленных на конференции работ, выполненных

российскими учеными в научных центрах за пределами России — Европе и США. Это указывает на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых остаются высокими, и они востребованы мировым научным сообществом.

В целом XXXIV 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.

*Обзор подготовлен в рамках работ, выполняемых по программе гранта Президента Российской Федерации "Государственная поддержка ведущих научных школ" НШ-5382.2006.2.*

#### Л и т е р а т у р а

1. Тез. докл. XXXIV Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС г. Звенигород, 12—16 февраля 2007 г. — М.: ЗАО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН", 2007. — 312 с. ISBN 978-5-212-01017-7/

2. <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/Zvenigorod.html>

*Статья поступила в редакцию 20 августа 2007 г.*

## Plasma physics and controlled nuclear fusion research in Russia: main achievements in 2006

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

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

*A survey is given of the results of the XXXIV Zvenigorod annual international conference on plasma physics and controlled nuclear fusion held in Zvenigorod (Russia) on February 12—16, 2007. The main lines of research are analyzed, and tendencies in the development of plasma physics in Russia are outlined.*

УДК 533.9

## Особенности распространения и затухания быстрой магнитозвуковой волны в водородной плазме в магнитной ловушке стеллараторного типа

*А. И. Мещеряков, А. Е. Морозов, А. А. Голиков, И. Ю. Вафин,  
М. С. Бережецкий, Ю. И. Нечаев*

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*Исследованы процессы распространения и затухания волн, возбуждаемых полоидальной антенной в водородной плазме на частоте ионного циклотронного резонанса (ИЦР). Вы-*