

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.9

Актуальные направления развития исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу в России в 2009 г.

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

Дан обзор докладов, представленных на ежегодной XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС), которая проходила с 8 по 12 февраля 2010 г. в городе Звенигороде Московской обл. Проведен анализ основных тенденций и сложностей развития научных исследований в области физики плазмы в России.

PACS: 52.55.-s; 52.25.-b

Ключевые слова: плазма, конференция, физика, термоядерный синтез, доклады.

Введение

Организаторы прошедшей XXXVII конференции: 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.

Финансовую поддержку конференции оказали Российский фонд фундаментальных исследований, Российская академия наук, ЗАО "Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН" и Международная компания "Техноинфо Лтд".

На конференции было представлено 388 научных докладов из 93 российских и 41 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, УТС, плазменным и лучевым технологиям. Общая численность авторов докладов составила около 1000 чел.

Гришина Ирина Анатольевна, старший научный сотрудник.

Иванов Вячеслав Алексеевич, зав. лабораторией.

Коврижных Лев Михайлович, зав. отделом.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова.

Россия, 11991, Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. 8 (499) 135-80-31. E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 1 сентября 2010 г.

Список российских научных центров, представивших доклады*

1. Российский научный центр "Курчатовский институт", Москва — 54.

2. Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва — 38.

3. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва — 38.

4. Объединенный институт высоких температур РАН, Москва — 33.

5. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, г. Троицк, Московская обл. — 24.

6. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург — 21.

7. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск — 19.

8. Казанский государственный технологический университет, г. Казань — 19.

9. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва — 18.

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

11. Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск — 15.

12. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров — 12.

13. Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород — 9.

14. Казанский государственный технический университет им. А. Н. Туполева, г. Казань — 9.
15. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва — 9.
16. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва — 7.
17. Дагестанский государственный университет, г. Махачкала — 7.
18. Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет), Москва — 7.
19. Московский инженерно-физический институт (технический университет), Москва — 7.
20. ГОУ "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", Санкт-Петербург — 7.
21. Институт математического моделирования РАН, Москва — 5.
22. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, Москва — 5.
23. Костромской госуниверситет им. Н. А. Некрасова, г. Кострома — 5.
24. ФГУП "Московский радиотехнический институт РАН", Москва — 5.
25. ФГУП "Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова", Санкт-Петербург — 5.
26. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва — 4.
27. Камская государственная инженерно-экономическая академия, г. Набережные Челны — 4.
28. Институт проблем механики РАН, Москва — 4.
29. Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск — 4.
30. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск — 4.
31. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург — 4.
32. Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново — 3.
33. Институт динамики геосфер РАН, Москва — 3.
34. Московский авиационный институт (государственный технический университет), Москва — 3.
35. Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, г. Саранск — 3.
36. НИИ Ядерной физики им. Д. В. Скобелыцина, МГУ, Москва — 3.
37. ФГУ "Технологический институт сверхтвердых и новых углеродных материалов", г. Троицк, Московская обл. — 3.
38. Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск — 2.
39. Иркутский государственный университет, г. Иркутск — 2.
40. Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск — 2.
41. Институт механики МГУ им. Ломоносова, Москва — 2.
42. Институт астрономии РАН, Москва — 2.
43. Казанский государственный университет, г. Казань — 2.
44. Российский государственный технический университет им. К. Э. Циолковского, Москва — 2.
45. Российский университет дружбы народов, Москва — 2.
46. Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ технической физики им. академика Е. И. Забабахина, г. Снежинск — 2.
47. Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург — 2.
48. Институт радиотехники и электроники РАН им. В. А. Котельникова, Фрязинский филиал, г. Фрязино — 2.
49. ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения Роскосмоса", г. Королев — 2.
50. Башкирский государственный университет, г. Уфа — 1.
51. Библиотека по естественным наукам РАН, Москва — 1.
52. Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций, Москва — 1.
53. Институт неорганических материалов им. А. А. Бочвара, Москва — 1.
54. НПП "Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики", Москва — 1.
55. Вычислительный центр им. А. А. Дородницына РАН, Москва — 1.
56. Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина, Москва — 1.
57. Институт биологии развития им. Н. К. Кольцова РАН, Москва — 1.
58. Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск — 1.
59. Институт молекулярной генетики РАН, Москва — 1.
60. Институт электронных управляющих машин, Москва — 1.
61. Институт океанологии РАН им. П. П. Ширшова, Москва — 1.
62. Институт прикладной механики РАН, Москва — 1.
63. Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск — 1.
64. Агентство ИТЭР, Москва — 1.
65. Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН, Москва — 1.
66. Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск — 1.

67. Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва — 1.
 68. Институт химии растворов РАН, г. Иваново — 1.
 69. Исследовательский центр им. М. В. Келдыша, Москва — 1.
 70. Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург — 1.
 71. ЗАО "ЛИТ", Москва — 1.
 72. Московский государственный университет печати, Москва — 1.
 73. Московский технический университет связи и информатики, Москва — 1.
 74. Московский энергетический институт (технический университет), Москва — 1.
 75. ФГУП "НИИ прикладной акустики", г. Дубна — 1.
 76. Государственный НИИ прикладной механики и электродинамики, Москва — 1.
 77. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалея, Москва — 1.
 78. Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл. — 1.
 79. Поморский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Архангельск — 1.
 80. Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург — 1.
 81. Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону — 1.
 82. Самарский государственный аэрокосмический университет им. Королева, г. Самара — 1.
 83. Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара — 1.
 84. Санкт-Петербургский государственный горный институт, Санкт-Петербург — 1.
 85. Санкт-Петербургский государственный технический университет, Санкт-Петербург — 1.
 86. Санкт-Петербургский институт машиностроения, Санкт-Петербург — 1.
 87. Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", Москва — 1.
 88. Московский государственный медико-стоматологический университет, Москва — 1.
 89. Сызранский филиал Самарского государственного технического университета, г. Сызрань — 1.
 90. Томский государственный университет, г. Томск — 1.
 91. Техноинфо Лтд, Москва — 1.
 92. Филиал Института энергетических проблем химической физики РАН, г. Черноголовка — 1.
 93. ФГУП "Красная звезда", Москва — 1.
- Научные организации, представившие доклады из стран дальнего и ближнего зарубежья**
1. JET, European Fusion Development Agreement, Culham Science Centre, Abingdon, Oxfordshire, United Kingdom — 5.
 2. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь — 4.
 3. Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины, г. Харьков, Украина — 4.
 4. Институт физики плазмы, Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт" НАН Украины, г. Харьков, Украина — 3.
 5. Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина — 3.
 6. Institut für Plasmaphysik, Forschungszentrum Jülich GmbH, EURATOM Association, Trilateral Euregio Cluster, Jülich, Germany — 2.
 7. Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, Украина — 2.
 8. Научно-исследовательский институт прикладной физики Национального университета Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан — 2.
 9. Технический университет, г. Кемнитц, Германия — 2.
 10. Университет А. Пуанкаре, г. Нанси, Франция — 2.
 11. Национальный исследовательский центр в Грама, г. Грама, Франция — 1.
 12. Institut für Experimentalphysik II, Ruhr-University Bochum, Germany — 1.
 13. Institute for Physics, University of Greifswald, Greifswald, Germany — 1.
 14. Institute for Physics, University of Rostock, Rostock, Germany — 1.
 15. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, USA — 1.
 16. LAPLACE CNRS, Toulouse, France — 1.
 17. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association, Greifswald, Germany — 1.
 18. Japan Atomic Energy Agency, Naka Fusion Research Establishment, Naka, Japan — 1.
 19. University of Nevada, Reno, USA — 1.
 20. Universite de Provence, Marseille, France — 1.
 21. Center for Laser Applications, University of Tennessee Space Institute, USA — 1.
 22. National Institute for Fusion Science, Toki, Japan — 1.
 23. Laser and Neutrons Physics Section, Bhabha Atomic Research Center, India — 1.
 24. Drexel University, Philadelphia, USA — 1.
 25. EURATOM-ENEA Fusion Association, Frascati, Italy — 1.
 26. CCFE-EURATOM Fusion Association, Culham, UK — 1.
 27. LPP, Association EURATOM — Belgian State, Brussels, Belgium — 1.
 28. EURATOM-UKAEA Fusion Association, Culham, UK — 1.
 29. VRKTH, Stokholm, Sweden — 1.
 30. IFP, CNR, Milano, Italy — 1.

31. DRFC, CEA – Cadarache, France — 1.
32. Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова, Национальная академия наук Украины, г. Киев, Украина — 1.
33. Корнельский университет, г. Итака, США — 1.
34. Институт нейтронной физики и реакторных технологий, г. Карлсруэ, Германия — 1.
35. Лаборатория физики плазмы ЕРМ/КМС, г. Брюссель, Бельгия — 1.
36. Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза, г. Варшава, Польша — 1.
37. Институт экспериментальной и теоретической физики, г. Алматы, Казахстан — 1.
38. Массачусетский технологический институт, г. Кембридж, США — 1.
39. НИИ эпидемиологии и микробиологии, г. Минск, Беларусь — 1.
40. Университет Альберты, г. Едмонтон, Канада — 1.
41. Южноафриканский институт современной химии материалов, г. Кейптаун, ЮАР — 1.

Тематика докладов и организация их представлений

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

1. Магнитное удержание высокотемпературной плазмы.
2. Инерциальный термоядерный синтез.
3. Физические процессы в низкотемпературной плазме.
4. Физические основы плазменных и лучевых технологий.

В рамках конференции как самостоятельное мероприятие работала сессия по проблемам ИТЭР.

На конференции состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 14 обзорных докладов об отечественных и мировых результатах исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям. Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 84 устных и 284 стендовых докладов, а также были представлены доклады по смежным с физикой плазмы проблемам.

Информация о важнейших докладах

Конференция традиционно открывалась обзорными докладами коллективов крупнейших научных центров России, Европы и Америки по итогам работ, проведенных за последний год.

В этом году отмечался юбилей — 100-летие со дня рождения И. Ф. Кварцхава, известного советского физика, специалиста в области газовой электроники и физики плазмы, одного из основателей Сухумского физико-технического института. Доклад, посвященный этому событию, сделал А. А. Рухадзе (ИОФ РАН). В докладе отмечалось, что И. Ф. Кварцхава и его сотрудниками был выполнен большой цикл пионерских работ по исследованию электрического взрыва проволочек, электродинамическому ускорению ионизованного газа, по динамике высокотемпературной плазмы в сильнооточных разрядах. Обнаруженные в опытах с плазмой эффекты дробного ускорения ионизованной среды, образования пространственно-периодических структур сильнооточной плазмы, выброса плазменных оболочек из области удержания (эруптивные неустойчивости) и др., получившие и теоретические обоснования, являются существенным вкладом в физику плазмы и в решение вопросов, связанных с проблемой управляемого термоядерного синтеза.

- Обзорные доклады, представленные на пленарных заседаниях конференции, подводили годовые итоги работ по физике высокотемпературной плазмы, УТС.

Экспериментам по изучению нагрева и вращения плазмы, генерации волн и осаждению примесей, проводимым на установке JET в 2009 г., был посвящен доклад Дж. Онгена "Обзор последних результатов JET в поддержку проекта ИТЭР" (Лаборатория физики плазмы ЕРМ/КМС, Брюссель, JET). Установка JET является крупнейшим действующим европейским токамаком. На нем проводятся эксперименты, позволяющие моделировать в уменьшенном масштабе процессы, которые будут происходить на строящемся во Франции усилиями международного научного сообщества новом токамаке ИТЭР. На токамаке JET была введена в эксплуатацию система ионного циклотронного резонансного нагрева плазмы, использующая антенны, сходные по конструкции с теми, которые предполагается использовать на строящейся установке ИТЭР. Эта система была оптимизирована для устойчивого нагрева плазмы в H-режиме с сильными МГД-колебаниями на периферии (ELMs). Были продолжены исследования вращения плазмы в ICRH и омическом режиме нагрева со стандартной и большой гофрировкой тороидального поля на JET. Вращение увеличивалось во всех случаях, когда повышалась гофрировка тороидального поля, причем наиболее выраженный эффект наблюдался в омическом режиме у края плазмы, а в режиме ICRH в ее центре. Это соответствует доминантному транспорту тепловых ионов в омической плазме и транспорту

быстрых ионов при нагреве ICRH. Рассматривались результаты экспериментов по очистке стенки камеры с помощью ионно-циклотронного нагрева, также крайне важных для проекта ИТЭР. Докладчик кратко остановился также на успехах, достигнутых в других областях, важных для проекта ИТЭР. Это Н-режимы при высоком токе (до 4,5 МА), L-H-переходы и их порог по мощности в D- и He⁴-плазме, исследования по смягчению последствий срывов, подавление ELM пеллетами, вертикальными рывками шнура и резонансными магнитными возмущениями.

Доклад Л. Н. Химченко "Значение исследований на установке КСПУ для программы ИТЕР" (РНЦ "Курчатовский институт") был посвящен проблемам распыления элементов дивертора и стенки ИТЭР. На плазменной пушке КСПУ в ТРИНИТИ в рамках Европейско-Российского совместного эксперимента проводилось комплексное исследование эрозии диверторных пластин из вольфрама и СС-композита. В соответствии со стандартами ИТЭР в Планзее (Австрия) были изготовлены диверторные пластины. Последние распылялись при тепловых нагрузках, имитирующих развитие процессов типа ELM в установке ИТЭР. Эксперименты показали, что при таких потоках энергии основным механизмом эрозии для вольфрамовых пластин является испарение, а для СС-композита — сублимация. Проведены исследования по образованию пыли при таких нагрузках. Также было показано, что рост частиц за счет конденсации испаренного материала приводит к образованию фрактальной структуры с развитой поверхностью. Измерения потери массы пластин при длительной экспозиции и моделирование с помощью кодов FOREV-2D, MEMOS-2D, 3-D RHEMОВRID, PEGASUS, которые могли вычислять ожидаемую эрозию СС-композита, вольфрама и бериллия в установке ИТЭР при воздействии импульсных плазменных нагрузок, позволили оценить реальное время жизни диверторных пластин в ИТЭРе. Исследование элементного и химического состава перепыленных материалов указало на возможность образования карбидов в диверторе ИТЭРа.

Большой интерес у участников конференции вызвал доклад **И. Л. Иосилевского** "Поляризация плазмы в массивных астрофизических объектах" (ОИВТ РАН, МФТИ), в котором обсуждались вопросы поляризации плазмы, возникающей под действием гравитационного поля (и иных действующих на массу сил) в массивных астрофизических объектах вследствие различия масс ионов и электронов. Эта поляризация приводит в условиях локального термодинамического равновесия к существованию стационарного электростатического

поля, равного по своей величине (в расчете на один протон) гравитационному полю. Эффекты кулоновской неидеальности вводились в рассмотрение как еще один источник такой поляризации. Изучение было ограничено упрощенной ситуацией поляризации в термодинамически равновесной звезде без учета эффектов релятивизма и влияния магнитного поля. Рассмотрены как общий случай, так и предельные ситуации, отличающиеся степенью вырождения электронов. Дается краткий исторический комментарий. Обсуждались наиболее заметные особенности структуры и динамики массивных объектов, которые возможны как результат обсуждаемой поляризации и участия в ней "фактора неидеальности".

Темы следующих четырех пленарных докладов охватывали большинство наиболее важных направлений физики высоких плотностей энергии и инерциального термоядерного синтеза.

В докладе **С. А. Белькова, С. Г. Гаранина, Н. В. Жидкова, Г. Г. Кочемасова и С. А. Сухарева** "Экспериментальные исследования на лазерных установках РФЯЦ-ВНИИЭФ. Обзор последних результатов" (Институт лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ) рассказывалось о работах по созданию мощных лазеров и их применению для исследований в области лазерного термоядерного синтеза и физики высоких плотностей энергии. Отмечалось, что в институте создан уникальный комплекс мощных лазерных установок. Это двенадцатиканальный йодный лазер ИСКРА-5, четырехканальный лазер ЛУЧ на неодимовом стекле, петаваттный комплекс ФЕМТО. В докладе был дан краткий обзор текущего состояния каждой установки. Отмечалось, что на установке ИСКРА-5 была проведена большая серия экспериментов по исследованию мишеней непрямого (рентгеновского) сжатия. Были исследованы режим прогорающей оболочки и режим абляционного сжатия. Также проведена большая серия экспериментов по исследованию уравнений состояния вещества, спектральных пробегов излучения в условиях облучения исследуемых образцов квазипланковским рентгеновским излучением. На установке ЛУЧ проведена большая серия экспериментов по исследованию ударной сжимаемости различных материалов при прямом воздействии лазерного импульса на образец. Важнейшим этапом развития исследований в области высоких плотностей энергии не только в РФЯЦ-ВНИИЭФ, но и в стране в целом, стало введение в строй петаваттного лазера ФЕМТО. На установке ФЕМТО получен лазерный импульс с длительностью 45 фс и энергией 30 Дж. Начаты первые эксперименты по исследованию генерации рентгеновского излу-

чения при облучении плоской мишени ультракоротким лазерным импульсом.

Вопросы возможного практического использования существующих мощных лазеров на пути получения энергии в реакторе на основе лазерного термоядерного синтеза обсуждались в **докладе В. Д. Зворыкина "Импульсно-периодические DPSSL и KrF-лазерные драйверы для энергетических установок на основе термоядерного синтеза"** (Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН). Были проанализированы существующие типы мощных лазеров и сделан вывод, что для построения реактора на основе лазерного термоядерного синтеза только твердотельные лазеры с диодной накачкой (Diode Pumped Solid State Lasers — DPSSL) и газовые KrF-лазеры с накачкой релятивистским электронным пучком обладают необходимой высокой эффективностью и могут быть масштабированы до требуемых энергий. В докладе был дан обзор исследований по импульсно-периодическим лазерам-драйверам, разрабатываемым для будущих энергетических установок на основе ЛТС. Рассмотрены перспективы создания лазерного драйвера с КПД не менее 6—7 % и частотой повторения импульсов не менее 5 Гц. Особое внимание было уделено реализации перспективных схем раздельного сжатия мишеней и быстрого зажигания термоядерной реакции ускоренными частицами или мощной ударной волной, позволяющих уменьшить энергию основного лазерного драйвера до ~500 кДж. Возможности такого подхода и требования к лазерам были рассмотрены на примере KrF-лазерной программы FTF (Fusion Test Facility) и программ на основе DPSSL лазеров LIFE (Laser Inertial Fusion Energy System) и HiPER (High Power Laser Energy Research Facility).

Принципиальной задачей в области инерциального термоядерного синтеза является повышение эффективности энергетического цикла получения ядерной энергии. Одно направление решения этой задачи представляет собой увеличение коэффициента усиления термоядерной мишени. Работы в этой области активно ведутся во всех крупнейших лабораториях мира и основываются на двух подходах инициирования горения — быстром зажигании и зажигании сфокусированной ударной волной. Оба подхода были предложены в нашей стране и неоднократно обсуждались на Звенигородской конференции. Пленарный доклад **В. Б. Розанова, В. Л. Ромоданова, В. В. Харитонова и А. Н. Шмелева "Гибридная энергетика на основе лазерного термоядерного синтеза"** (НИЯУ "МИФИ") был посвящен другому направлению повышения эффективности энергетического цикла за счет вовлечения в него ядерной составляющей,

инициируемой термоядерными нейтронами. В докладе был дан обзор работ по концептуальному проектированию лазерных термоядерных реакторов с делящимися материалами в бланкетах. Обсуждались положительные факторы гибридной схемы: снижение требований к лазеру и мишени, повышение ядерной безопасности (подкритичность системы), возможность трансмутации и сжигания отработанного ядерного топлива реакторов деления и ряд других. Первые предложения по гибридной энергетике относятся к середине 70-х годов прошлого века. В нашей стране и США этому направлению уделялось большое внимание вплоть до начала 90-х годов, когда интерес к нему стал ослабевать в связи с преобладанием в то время нацеленности на чистую термоядерную энергетику. Можно сказать, что сейчас наблюдается период ренессанса гибридного подхода, который ознаменовался публикацией в конце 2008 г. проекта Ливерморской лаборатории (США) LIFE, посвященного созданию гибридного реактора на основе усовершенствованного лазера NIF для достижения энергетического усиления вплоть до значений 600. Возрождающийся интерес к этому направлению связан с новыми предложениями в области глубокого сжигания ядерного топлива.

Еще один **пленарный доклад "Экспериментальное исследование режимов взаимодействия субпетаваттного лазерного излучения с газовой струей"**, представленный от имени большого коллектива авторов **М. В. Стародубцевым** (Институт прикладной физики РАН), был посвящен одному из наиболее интересных направлений физики высоких плотностей энергии — взаимодействию мощного ультракороткого лазерного импульса с веществом. Были представлены результаты экспериментов по ускорению электронов при воздействии лазерного импульса с длительностью 40—50 фс и энергией 10—15 Дж на газовые мишени. В этих экспериментах ускорение электронов происходило в лазерной плазме, образующейся при фокусировке лазерного излучения на переднюю границу газовой мишени. Под действием пондеромоторного давления лазерного импульса электроны вытесняются из области, занятой ЭМ-полем (обычные размеры этой области порядка $15 \times 15 \times 15$ мкм — так называемая 3D-фокусировка), вследствие чего в этой области образуется значительный положительный заряд, приводящий к захвату группы релятивистских электронов и их последующему ускорению до больших энергий в кулоновском поле положительно заряженной области. Сообщалось, что в ИПФ РАН на базе лазерного комплекса PEARL создана установка по ускорению электронов мощным фемтосекундным лазерным импульсом, который фокусировался в

струю гелия. В экспериментах были получены параметры пучка электронов, сопоставимые с лучшими мировыми результатами в аналогичных схемах: заряд электронов в пучке составил 10 пК, энергия электронов — 200 МэВ, ширина энергетического спектра — 10 %, угловая расходимость пучка — 2,5 миллирадиана, что сопоставимо с лучшими мировыми результатами в аналогичных схемах ускорения. Указывалось, что подобные компактные источники ускоренных электронов могут быть использованы в разнообразных прикладных задачах, таких, например, как создание лазера на свободных электронах и пр., а также при проведении фундаментальных исследований взаимодействия оптического излучения и пучков заряженных частиц с веществом.

Возможности метода атомной и молекулярной спектроскопии при исследовании параметров плазмы, образующейся при лазерном пробое, обсуждались в докладе **К. Дж. Париггера** "*Atomic and Molecular Spectroscopy Following Laser-induced Optical Breakdown*" (Center for Laser Applications, University of Tennessee Space Institute, USA). Были рассмотрены примеры использования спектральных линий водорода Бальмеровской серии (H_α , H_β и H_γ) для диагностических целей — определения электронной плотности и температуры плазмы. Также были проиллюстрированы возможности анализа молекулярных эмиссионно-рекомбинационных спектров двухатомных газов для определения параметров плазмы, образующейся при пробое. Часть доклада посвящалась исследованию процесса лазерного пробоя с помощью высокоскоростной фотографии. Обсуждались также последние достижения в области теории атомных и молекулярных спектров, в частности возможности компьютерного моделирования при описании спектров высоковозбужденных уровней атомов и молекул.

Особенности турбулентных процессов в низкотемпературной плазме рассматривались в докладе **Э. Е. Сона** "*Турбулентность низкотемпературной плазмы*" (ОИВТ РАН). Отмечалось, что турбулентность низкотемпературной плазмы отличается от турбулентности высокотемпературной плазмы тем, что вследствие высокой плотности среды она имеет гидродинамическую природу, но вместе с тем имеет отличающие ее особенности, связанные с наличием магнитных полей, слоев объемного заряда и плазмохимических реакций. Основные характеристики турбулентности плазмы, как и других гидродинамических объектов, определяются вихревой структурой и диссипацией. Первая приводит к каскаду Ричардсона и формированию инерционного спектра, а вторая — вязкой диссипации. В низкотемпературной плазме

существует воздействие турбулентности на процессы переноса и обратное воздействие явления (плазмохимических реакций, излучения, электромагнитных полей) на турбулентность. В большинстве случаев эти процессы должны исследоваться самосогласованно. В докладе была изложена полупирическая теория турбулентности плазмы в магнитном поле при произвольных магнитных числах Рейнольдса. Метод основан на применении переменных Эльзассера для совместного описания турбулентности гидродинамического и магнитного полей. В результате сформулированы RANS модели для произвольных магнитных чисел Рейнольдса, описывающие результаты для малых магнитных чисел Рейнольдса. Кроме того, в докладе рассматривались основы управления аэродинамикой газа при воздействии диэлектрических барьерных и СВЧ-разрядов на поток.

Отдельно было уделено внимание задаче спиральной турбулентности плазмы, известной в астрофизике, но рассмотренной в докладе применительно к низкотемпературной плазме, когда вращение под действием электрического и магнитного полей приводит к концентрированным вихрям. Действие концентрированных вихрей в турбулентном движении приводит к большим разрушениям (вихри, смерчи, торнадо, например, Саяно-Шушенская ГЭС), а в плазме — к перестройке структур и процессам перезамыкания магнитных силовых линий. В заключение доклада автор остановился на актуальных проблемах низкотемпературной плазмы, таких как алюминиоводородная энергетика, топливные элементы и водородная энергетика.

В обзорном докладе **С. В. Щепетова** "*Фрактальные процессы и возможность их идентификации в турбулентной плазме*" (ИОФ РАН) была предпринята попытка привлечь к исследованию плазменной турбулентности методы, успешно опробованные в различных областях знания, таких как, эконометрика, астрофизика и физика нейтральных жидкостей. Значительная часть этих методов основана на предположении (проверяемом), что изучаемый процесс соответствует какому-либо фрактальному процессу.

В обзоре кратко обсуждались идеи, лежащие в основе подобных представлений, и проводилась классификация тех фрактальных процессов, которые могут быть использованы при анализе процессов, характерных для плазменной турбулентности. Особое внимание было уделено процессам с дальнедействующими корреляциями. Поскольку математическая теория фрактальных процессов с дальнедействующими корреляциями и ее прикладные аспекты в настоящее время продолжают

развиваться, в докладе также были представлены практически важные выводы общего характера. Были рассмотрены методы обнаружения самоподобных процессов, что весьма важно, поскольку самоподобие процесса может свидетельствовать о наличии доминирующего физического механизма. Подробно обсуждались методы обнаружения дальнедействующих корреляций при исследовании турбулентной плазмы в L- и H-режимах токамаков.

Идея использования водорода как универсального вторичного энергоносителя, наряду с другим вторичным энергоносителем — электроэнергией, обсуждалась в докладе **С. П. Малышенко** "Водородные технологии для энергетики" (ОИВТ РАН). Отмечалось, что многие исследования, выполненные к настоящему времени, показали высокую экономическую и экологическую эффективность систем энергообеспечения, использующих оба энергоносителя для наиболее эффективного использования первичных энергоресурсов при решении задач устойчивого развития общества. В настоящее время в США, Германии, странах ЕС, Японии, Китае, в нашей и многих других странах реализуются масштабные программы по созданию новых водородных технологий, ориентированные на близкую и отдаленную перспективы. Естественно, эти программы в основном ориентированы на решение задач наиболее важных для каждой конкретной страны, но существуют и общие проблемы (защита окружающей среды, истощение наиболее дешевых природных энергоресурсов, использование возобновляемых энергоисточников и т. д.), которые стимулируют объединение усилий специалистов разных стран в области водородной энергетики. Основное содержание доклада было посвящено новым водородным технологиям для энергетики, в особенности тем, которые наиболее важны для нашей страны с учетом Энергетической стратегии России на период до 2030 г. Обсуждались наиболее интересные результаты работ, выполненных к настоящему времени в Российской Федерации по проблемам производства, хранения и использования водорода, и задачи прикладных и фундаментальных исследований, которые с точки зрения автора наиболее важны для развития отечественной энергетики.

• На секции "Магнитное удержание высокотемпературной плазмы" (председатель секции А. И. Мещеряков) было представлено 84 доклада (из них 18 на устных и 66 на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками 24 российских научных центров, 13 докладов выполнены совместно с сотрудниками научных центров Франции, Японии, Германии, Великобритании и Украины.

На секции был представлен ряд работ, в которых исследуется возможность использования магнитных ловушек в качестве термоядерного источника нейтронов (ТИН). Мотивация такого применения термоядерных установок хорошо известна — это использование термоядерных технологий для решения актуальных задач ядерной энергетики, таких как наработка топлива для ядерных реакторов на быстрых и тепловых нейтронах, трансмутация долгоживущих радиационно-токсичных нуклидов, замыкание ядерного цикла. Например, в докладе "О концепции источника 14 МэВ нейтронов на базе компактного токамака", представленном **Б. В. Кутеевым**, было предложено использовать сферический токамак в качестве источника нейтронов. Целью предложенного проекта является создание опытного образца системы "синтез—деление" с мощностью реакции синтеза до 10 МВт и мощностью деления от 10 до 100 МВт, демонстрирующего возможности производства 14 МэВ нейтронов синтеза D+T, трансмутации высокоактивных нуклидов, наработки ядерного топлива — ^{239}Pu из ^{238}U и ^{233}U из ^{232}Th . Стоимость создания такого образца ТИН не должна превышать 6 млрд рублей. Проведенные в докладе оценки показывают, что сферический токамак является наиболее подходящим для концепции ТИНа, в силу его компактности и невысокой стоимости. Были проделаны расчеты для конкретного проекта ТИНа на основе сферического токамака с параметрами: $R = 47$ см; $a = 27$ см; $B = 1,35$ Тл; $Q = 0,5$; $P_{\text{fus}} = 5$ МВт.

В докладе **А. А. Голикова и Б. В. Кутеева** "Выбор параметров режима стационарного разряда в компактном токамаке" были исследованы различные волновые схемы генерации тока в токамаке с низким аспектным отношением и сделаны оценки их эффективности. Предлагаются возможности их использования для создания тока как в центре плазмы, так и на ее периферии, а также для решения задач устойчивости и контроля радиального профиля тока. Эта работа также была посвящена анализу возможности создания стационарного термоядерного источника нейтронов на основе сферического токамака.

В докладе **В. Ю. Сергеева** "Выбор концепции дивертора для компактного источника нейтронов на основе сферического токамака" были проанализированы условия работы дивертора в ТИНе на основе сферического токамака (СТ). Известно, что в диверторной конфигурации тепловые потоки на диверторные пластины определяются отношением P/R вкладываемой мощности P к большому радиусу установки R . Компактность ТИНа на основе СТ и необходимость использования достаточно боль-

шой мощности для нагрева и стационарного поддержания тока [SOFE] создают предпосылки для напряженной работы дивертора. В докладе рассмотрены различные варианты реализации диверторных конфигураций на существующих токамаках с акцентом на их особенности для СТ. Обсуждались достоинства и недостатки открытых и закрытых конфигураций с одной и двумя X точками, а также способов снижения тепловых нагрузок на диверторные пластины. Авторами доклада сделан вывод о том, что наиболее перспективным для ТИНа на основе СТ является режим, недавно обнаруженный в экспериментах на установке NSTX, с большими параметрами вытянутости и треугольности, в нижней однонулевой конфигурации, с большим расширением магнитного потока в излучающем диверторе (т. н. "a highly shaped lower single null LSN configuration with a high magnetic flux expansion radiative divertor"). В этих экспериментах удалось значительно (в несколько раз) снизить уровень плотности теплового потока на диверторные пластины до приемлемых значений 1—2 МВт/м² при 4—7 МВт вкладываемой мощности.

Интерес вызвали также работы, выполненные на стеллараторе J-2M. Так, в работе **Л. М. Коврижных** "Условие квазинейтральности и устранение многозначности разрывных решений уравнений переноса в стеллараторах" детально проанализирован вопрос разрывности амбиполярного электрического поля в тороидальной магнитной ловушке стеллараторного типа и показано, что для корректного определения амбиполярного поля необходимо решать полную систему уравнений переноса. В результате проведенного анализа показано, что учет объемного заряда плазмы приводит к появлению в уравнениях для плотности и амбиполярного электрического поля дополнительного слагаемого, пропорционального второй производной электрического поля по радиусу. В результате этого стационарные решения становятся, очевидно, непрерывными, а главное устраняется их явная зависимость от начальных значений амбиполярного поля, т. е. решения становятся однозначными. Однако в зависимости от параметров плазмы в принципе возможны два режима. В первом — решение относительно плавное и не зависит от начальных условий. Во втором — в зависимости от типа начальных условий могут существовать два вида решений, существенно отличающихся друг от друга. При этом внутри каждого из этих видов решений имеются стационарные решения, которые являются единственными и не зависят от начальных условий.

На установке "Стелларатор J-2M" продолжены экспериментальные исследования режимов с улуч-

шенным удержанием энергии плазмы. В докладе **Д. Г. Василькова и О. И. Федянина** "Критерий перехода в режим с улучшенным удержанием в стеллараторе J-2M" обнаружено, что при ЭЦР-нагреве наблюдаются импульсы, в которых энергосодержание плазмы на 20—30 % превышает энергосодержание, вычисленное по скейлингу стелларатора J-2M. Эти импульсы названы режимом с улучшенным удержанием плазмы.

Вызвал интерес и доклад **Е. Н. Снежкина** "Волны на мелкой воде при круговом сверхзвуковом движении возмущения". В докладе рассмотрен вопрос о генерации волн при криволинейном сверхзвуковом движении возмущения. Он возник в практической и теоретической аэродинамике в связи с нетривиальным поведением звуковых ударных фронтов от плавно поворачивающихся реактивных самолетов. Внутренний из двух фронтов, пройдя некоторое расстояние к центру кривизны траектории, испытывал резкий излом, похожий на результат отражения, и затем шел в обратном направлении от центра. Оказалось, что волны на мелкой воде от искусственного возмущения в виде небольшого тела, погруженного в тонкий слой жидкости и движущегося там по круговой орбите, действительно ведут себя точно так, как ударные фронты от сверхзвуковых самолетов. Оказалось, что геометрия наблюдаемых волн (фронтов Гюйгенса—Маха) качественно и количественно прекрасно описывается уравнением эвольвенты круга с радиусом круговой эволюты, равным отношению линейной скорости ("звуковых") волн к угловой скорости возмущения. Исследованные волны могут играть важную роль в таких процессах, как неустойчивость сверхотражения криволинейных сверхзвуковых течений. Лабораторное гидродинамическое моделирование таких процессов на мелкой воде является физически адекватным в существенно сверхзвуковых режимах с заведомо конечными амплитудами возмущений.

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. Вырос вклад российских ученых в международные проекты по исследованию высокотемпературной плазмы. Возросла по сравнению с прошлым годом численность молодых ученых, принимавших участие в работе секции.

• По тематике секции "Инерциальный термоядерный синтез" (председатель секции Р. В. Степанов) было представлено 4 доклада на пленарных заседаниях конференции, 14 докладов на

двух устных сессиях и 46 — на двух стендовых сессиях.

Большое число докладов устного и стендового заседаний лазерно-плазменной тематики было посвящено изучению взаимодействия с веществом ультракороткого лазерного импульса и генерации быстрых частиц. Это отражает повышенный интерес исследователей к этой области как со стороны фундаментальной, так и прикладной физики. Среди этих научных материалов следует отметить доклад коллектива исследователей из РФЯЦ-ВНИИТФ (докладчик **П. А. Толстоухов**), посвященный экспериментальным исследованиям радиационных процессов в плазме, образованной в результате воздействия лазерного импульса с интенсивностью 10^{19} Вт/см². К этой категории докладов следует отнести совместную работу ФИАН и МГУ (докладчик **А. В. Брантов**), содержащую теоретические и экспериментальные результаты по управлению энергией и спектром быстрых частиц лазерной плазмы, а также доклады, представленные **С. Г. Бочкаревым** (ФИАН), **Е. А. Говрасом** (ФИАН), **И. Ю. Костюковым** (ИПФ РАН), **А. А. Фроловым** (ОИВТ РАН), посвященные исследованию механизмов генерации быстрых частиц в лазерной плазме. Несколько докладов было посвящено режимам зажигания мишеней при реализации схемы инерциального термоядерного синтеза. Так, в докладе **В. А. Щербак** (РФЯЦ-ВНИИЭФ) обсуждался критерий зажигания мишени, фокусирующей ударной волной, а доклад **В. Е. Шермана** (СПИМАШ) был посвящен физике быстрого зажигания мишени пучком быстрых ионов.

Важное место в программе конференции занимали работы в области физики и технологии создания мишеней для инерциального термоядерного синтеза. Среди результатов в этой области следует отметить значительные достижения в области высокочастотного формирования и доставки в область взаимодействия специальных криогенных мишеней, полученные объединенным коллективом исследователей из ФИАН, ВНИИЭАЭ, ВЦ РАН, МГУ, ИОФАН и ФГУП "Красная Звезда". Результаты этих работ были представлены в докладе **Е. В. Коршевой** (ФИАН). В основе этих работ лежит разработанная в ФИАН технология свободно движущихся мишеней (Free-Standing Targets), на каждой стадии замкнутого цикла приготовления мишени (заполнение мишени дейтерием, формирование криогенного слоя и контроль его состояния) она остается в "свободном состоянии".

В области физики мощных лазеров следует отметить цикл докладов сотруddников РФЯЦ-

ВНИИЭФ, в которых содержались наиболее важные результаты по развитию методов формирования и контроля параметров мощных лазерных пучков, реализованных при создании установки ЛУЧ, это доклады **Л. В. Львова**, **А. Н. Маначинского**, **Н. А. Петражицкой** и **Ю. В. Долгополова**.

Тематика электроразрядной плазмы была, в основном, связана с высокоточными импульсными установками. Цикл докладов, посвященный экспериментам с многопроволочными лайнерами на установке АНГАРА-5-1, был представлен исследовательской группой из ГНЦ РФ ТРИНИТИ. Коллектив успешно продолжает детальные исследования параметров плазмы, возникающей при пропускании сильного электрического тока через специальные многопроволочные сборки. Разработанная система диагностики на установке АНГАРА-5-1 включает измерения магнитного поля в плазме (доклад **А. Ю. Кошелева**), спектральные измерения излучения плазмы (доклад **А. П. Шевелько**), а также диагностику исследования режимов имплозии сборок различной конфигурации (доклад **А. Н. Грицука**) и структуры возникающей плазмы (доклад **К. Н. Митрофанова**). Выполнены работы по совершенствованию методов диагностики плазмы многопроволочных лайнеров на различных стадиях ее эволюции, включая временные измерения в оптическом, рентгеновском и ВУФ-диапазонах (доклады **Г. М. Олейника**, **Г. С. Волкова**, **И. Н. Фролова**, **А. П. Шевелько**).

Новые результаты получены в результате исследования плазмы пинчевых разрядов различного типа. В экспериментах РНЦ "Курчатовский институт" на установке С-300 исследована динамика образования горячих точек в Z-пинче из малоплотного дейтерированного полиэтилена (доклад **Е. Д. Казакова**). Зарегистрирован выход DD-нейтронов, превышающий уровень 10^9 нейтронов за импульс. Следует отметить прогресс в понимании масштабных зависимостей параметров плазмы X-пинча, достигнутый на основе результатов экспериментов, проведенных в различных условиях, отличающихся как по общей энергетике установки, так и по скорости нарастания тока (доклады **Т. А. Шелковенко** и **И. Н. Тилик**).

Обзор состояния работ в области высокотемпературной плазмы с электростатическим удержанием — еще одном направлении инерциального синтеза — был представлен в докладе **Ю. К. Куриленкова** (ОИВТ РАН). После демонстрации повторяющегося режима образования плазмы в электростатических системах исследования в этом направлении УТС активно развиваются во многих лабораториях мира и в первую очередь в лабораториях США. В нашей стране эксперименты в

этой области не проводятся. Работы отечественных ученых в этой интересной области сводятся пока к теоретическим исследованиям и к участию в экспериментах, проводимых на зарубежных установках.

Отметим, что в рамках работы секции "Инерциальный термоядерный синтез" 12 докладов было представлено молодыми учеными.

Основываясь на материалах конференции, приходится констатировать весьма узкий фронт экспериментальных исследований в России в области инерциального термоядерного синтеза в сравнении с периодом 80-х годов прошлого века. Фактически, серьезные эксперименты в области воздействия лазерных пучков высокой энергии на вещество ведутся в двух научных центрах: РФЯЦ-ВНИИЭФ и ИПФ РАН. Несколько лучше развиваются исследования в области сильноточных установок, но и здесь крупномасштабный эксперимент ограничивается возможностями только двух российских установок — Ангары 5-1 и С-300. В области импульсного электростатического удержания плазмы экспериментальные исследования в России не ведутся ввиду отсутствия финансирования. Не было представлено докладов по тяжелоионному синтезу. Благодаря, в основном, работам ИПФ РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ и РФЯЦ-ВНИИТФ имеется прогресс в создании петаваттных лазерных систем, однако пока параметры этих установок уступают зарубежным аналогам, а экспериментальные исследования физики взаимодействия таких лазеров с веществом находятся на начальной стадии. Понятно, что эта ситуация является следствием трудностей, возникших в развитии физики плазмы в России в последние 20 лет. Однако исследования в области физики лазерного термоядерного синтеза имеют важное фундаментальное и прикладное значения не только для решения энергетической проблемы, но и для развития новых технологий, обеспечивающих обороноспособность России, и должны быть поддержаны специальной национальной программой, так же как это сделано в США, Франции, Японии, Китае и ряде других стран.

• На конференции в рамках Совета РАН по проблеме "Физика низкотемпературной плазмы" работала секция "**Физические процессы в низкотемпературной плазме**" (председатель секции В. С. Воробьев). Было представлено 3 обзорных, 24 устных и 94 стендовых докладов.

Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям:

1) термодинамические свойства и кинетические свойства низкотемпературной плазмы (докладчики В. С. Воробьев, В. Г. Новиков, А. Л. Хомкин, С. А. Триггер, Г. В. Шпатаковская и др.);

2) различные виды разрядов в квазистатических, импульсных электрических полях и в электромагнитных полях различных частотных диапазонов (докладчики В. А. Шкляев, К. Н. Ульянов, Ю. А. Лебедев, А. В. Недоспасов, С. А. Майоров, К. В. Ходатаев и др.);

3) пылевая плазма, возникающая в импульсных процессах (докладчики Л. М. Василяк, И. Л. Богданкевич, А. Г. Франк и др.). По этим же направлениям были распределены и стендовые доклады, которых было значительно больше устных, и эти доклады в значительной степени связаны с технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований пылевой плазмы и плазмы газовых разрядов, развивающихся во внешнем магнитном поле. Было заслушано четыре устных доклада по этой тематике. Интерес вызвал доклад **А. Л. Хомкина и А. С. Шумихина "Плотность состояний и распределение по энергиям электрона в неидеальной атомарной плазме. Теория и результаты численного эксперимента"**, в котором дана ясная физическая интерпретация новым результатам по численному моделированию плотности состояний в атомарной неидеальной плазме. Полученная прямыми методами функция распределения электронов служит дополнительным аргументом в пользу сформулированного авторами утверждения, что в неидеальной, казалось бы, полностью ионизованной плазме всегда присутствует заметная доля связанных состояний, лежащих вблизи порога ионизации.

В докладе **В. С. Воробьева и В. Г. Новикова "Необычные свойства водорода, возникающие при его плавлении в мегабарном диапазоне давлений"**, обсуждалась проблема о состоянии водорода при мегабарных давлениях. Эта проблема является одной из главных проблем в физике высоких давлений, физике планет и астрофизике. Существенный прогресс в этом направлении был достигнут благодаря измерениям температуры плавления при рекордно высоких давлениях (~300—400 ГПа), полученных в специальных алмазных наковальнях. Оказалось, что кривая плавления водорода при давлениях <100 ГПа обнаруживает нормальный ход — температура плавления растет с ростом давления, и происходит фазовый переход типа молекулярный кристалл — молекулярная жидкость. Однако при больших давлениях температура плавления, достигнув максимума, начинает падать, снижаясь практически до нуля при давлении ~600 ГПа. Для описания состояния жидкости в этих условиях использовалась модель полностью

экранированных ячеек Вигнера—Зейтца, в которых каждый водородный ион находится в центре и окружен связанным состоянием и частично свободными электронами. Рассчитывается полная энергия электрона в ячейке с учетом кинетической энергии электронных состояний, взаимодействия электронов с центральным ионом, электрон-электронного и обменного взаимодействий.

Дискуссию вызвал доклад **Н. А. Журы** "*Обобщенная теория электромагнетизма и квантовая механика*", в которой предпринята попытка объединения классической теории электромагнетизма и квантовой механики.

Рекордное количество докладов (94) было представлено на двух заседаниях стендовой секции "Физика низкотемпературной плазмы". Значительная часть из них была связана с технологическими применениями низкотемпературной плазмы. В качестве примера можно упомянуть доклад **В. А. Гавриловой и Н. Ф. Кашапова** "*Коронный разряд в процессах нанесения функциональных покрытий*".

Другая часть докладов была связана с исследованием свойств и процессов в низкотемпературной плазме, в частности, таких как взаимодействие наномасштабных частиц с акустико-гравитационными вихрями на ионосферных высотах (**Ю. Н. Беседина, С. И. Попель**).

Третья группа докладов связана с развитием методов диагностики низкотемпературной плазмы. Сюда можно отнести, например, доклад **С. В. Горячева и др.** "*Локальные контуры спектральных линий как инструмент исследования состояния плазмы*" и ряд других докладов.

В целом, работа секции "Физические процессы в низкотемпературной плазме" была успешной и прошла на высоком уровне. Количество представленных докладов возросло по сравнению с 2009 г. Увеличилось число университетов и научных институтов, представивших на конференцию доклады по исследованию процессов в низкотемпературной плазме.

• В рамках секции "*Физические основы плазменных и лучевых технологий*" (председатель секции А. Ф. Александров) было проведено 2 устных заседания, на которых были заслушаны 17 докладов, и 2 стендовых заседания, на которых были представлены 54 доклада. На секции были заслушаны результаты работ более 40 ведущих научных центров России, Узбекистана и Украины. Большое число работ было доложено представителями научных коллективов ведущих учебных заведений России.

В устном докладе **Н. А. Попова** "*Исследование формирования лидерного канала и скорости его*

распространения в воздухе" отмечалось, что зарождение лидера (или стримерно-лидерный переход) является одним из наиболее важных и, по-видимому, наименее изученных этапов лидерного процесса. В работе была представлена самосогласованная модель, позволяющая исследовать образование лидерного канала и скорость его распространения в воздухе. Модель включает процессы ассоциативной ионизации, реакции, приводящие к быстрому нагреву газа, а также систему уравнений для описания газодинамических процессов в лидерном канале. Показано наличие двух этапов в развитии осесимметричного токового канала. Первый этап развития токового канала протекает при практически постоянной плотности газа, в течение времени, значительно меньшего характерных газодинамических времен. На втором этапе развития токового канала, протекающем в течение времени, когда уже важно газодинамическое разрежение канала, изменение разрядных параметров связано в основном с развитием ионизационно-перегревной неустойчивости. В результате происходит дальнейшее "стягивание" разряда в приосевую область и формирование тонкого сильно проводящего шнура. В работе представлены результаты расчетов зависимости скорости лидера от величины тока при различных начальных давлениях газа. Полученные теоретические результаты согласуются с имеющимися в научной литературе экспериментальными данными.

В устном докладе **В. А. Битюрин и Е. А. Филимоновой** "*О влиянии разряда на многостадийное воспламенение*" рассматривалась кинетическая модель, которая описывает как высокотемпературную, так и низкотемпературную стадию воспламенения топливно-воздушных смесей, содержащих метан, этан, пропан, ацетальдегид и др. Приводятся результаты моделирования многостадийного воспламенения в зависимости от начального состава, температуры и давления. Источником тепла и первичных радикалов являются процессы, проходящие в электрическом разряде. Получено хорошее совпадение рассчитанных значений с полученными экспериментальными результатами. Показано, что для низкотемпературной стадии кинетический механизм воспламенения существенно отличается от механизма высокотемпературной стадии. При этом веществом, обуславливающим вырожденно-разветвленный характер окисления метана или пропана, является ацетальдегид, который при разложении дает перекиси. Эти, а также возможно и другие продукты при дальнейших превращениях дают свободные радикалы легче, чем исходные вещества. Проведенные расчеты показали, что указанные выше

радикалы уменьшают время индукции холодного воспламенения, и, в результате, суммарное время индукции горения становится меньше.

В устном докладе **И. М. Минаева с сотрудниками** "*Четвертьволновая вибраторная плазменная приемная антенна*" рассматривалась возможность создания эффективной плазменной антенны. Показано, что характеристики плазменных антенн могут отличаться от характеристик передающих антенн за счет характера возбуждения плазменного столба, спектра собственных шумов, определяемых составом газа и током. Проводится сравнение характеристик приемной плазменной антенны с характеристиками металлической антенны.

В докладе **И. Л. Богданкевич с соавторами** "*Использование большого тока релятивистского электронного пучка в плазменном релятивистском генераторе*" рассматривалась возможность работать на больших токах реально существующих ускорителей для повышения мощности СВЧ-генератора, что не удавалось использовать до сих пор как в вакуумных СВЧ-генераторах, так в плазменных СВЧ-генераторах. При этом рассмотрена задача повышения СВЧ-мощности плазменного релятивистского генератора за счет повышения тока (при сохранении КПД генерации), а также проанализирована возможность быстрой электронной перестройки частоты генерируемого СВЧ-излучения в несколько раз. Экспериментальные исследования сопровождались соответствующим численным моделированием. Обнаружено, что определенное изменение формы коллектора позволяет в несколько раз увеличить длительность СВЧ-импульса плазменного релятивистского генератора.

В докладе **М. А. Лобаева с соавторами** "*Исследование мультипакторного разряда на поверхности различных диэлектрических материалов*" отмечалось, что мультипакторный (вторично эмиссионный) разряд рассматривается как крайне нежелательное явление, препятствующее генерации и транспортировке мощного СВЧ-излучения. В работе представлены результаты экспериментального исследования мультипакторного разряда, возникающего в неоднородных СВЧ-полях на поверхности диэлектрических окон в вакууме. Эксперименты проводились при высоких значениях напряженности электрического поля $E \geq 30$ кВ/см, соответствующих плотности потока мощности 2—3 МВт/см². Определены пороги возникновения и поддержания разряда в зависимости от рода материала и шероховатости поверхности. Экспериментально показано, что существенное влияние на пороговые характеристики разряда оказывает величина и направление пондеромоторной силы,

возникающей в неоднородных электромагнитных полях вблизи поверхности диэлектрика за счет градиента высокочастотного потенциала.

В докладе **Г. И. Змиевской и А. Л. Бондаревой** "*Кристаллические островки тонких пленок полупроводника: эксперимент и модели*" был реализован кинетический подход к моделированию широкого круга задач флуктуационной стадии нанесения нанопленок. Моделирование ведется на основе кинетической теории, модели броуновского движения и метода стохастического аналога. К достоинствам представляемого подхода относятся строгая математическая база, квазилинейность решаемых уравнений, нестационарность зародышеобразования, совместимая с импульсным воздействием на процесс. Особое внимание в модели уделяется влиянию энергии Гиббса образования зародыша и связи энергии Гиббса с физическими параметрами как материалов покрытия, так и подложки, а также связь с параметрами плазмы, взаимодействующей с поверхностью подложки.

На стендовых заседаниях было представлено 54 доклада.

В докладе **Ходатаева К. В. с соавторами** "*Вихревой СВЧ-плазмотрон атмосферного давления*" рассмотрен вихревой безэлектродный СВЧ-плазмотрон атмосферного давления. Особенностью предлагаемого устройства является организация возвратно-вихревого потока плазмообразующего газа (воздуха) в камере. При этом область локализации горячего плазмоида изолирована от стенок камеры и выходного сопла. В исследованном диапазоне мощностей СВЧ-генератора 0,5—2,5 кВт (магнетрон, длина волны 12,2 см) камера не требует водяного охлаждения, выпускное сопло во время работы остается практически холодным. Предлагаемый генератор плазмы может обеспечить высокую чистоту плазмохимических процессов получения и обработки материалов и имеет срок службы, многократно превышающий срок службы используемого источника СВЧ-излучения.

В докладе **В. А. Иванова** "*Исследование влияния микроплазменной обработки титана на рост клеток костной биологической ткани на его поверхности*" исследуется влияние микроплазменной обработки образцов из сплава титана ВТ-1-0, широко применяемого в медицинских целях, на рост биологических клеток костного мозга на поверхности обработанных плазмой образцов. Экспериментально показано, что существуют режимы микроплазменной обработки, при которых на поверхности образцов возникают устойчивые условия адгезии жизнеспособных остеогенных клеток. Этот метод оказался единственным, в результате

применения которого на поверхности титанового сплава наблюдался рост не только отростков, но и живых клеток костного мозга. Полученные результаты могут быть использованы при разработке нового оборудования, предназначенного для обработки других медицинских сплавов и изделий из них для улучшения интеграции металлических имплантов в костную ткань.

Доклад И. Е. Иванова, П. С. Стрелкова, Д. В. Шумейко *"Широкополосный детектор СВЧ-импульсов на горячих носителях"* посвящен разработке устройства и исследованию характеристик охлаждаемого жидким азотом детектора-приемника СВЧ-импульсов на горячих носителях, регистрирующего электромагнитное излучение в диапазоне 2—10 ГГц с временным разрешением около 1 нс. Приемник предназначен для регистрации импульсного СВЧ-излучения большой плотности мощности (более 2 Вт/см²), устойчив к внешним помехам и не разрушается при попадании на него избыточной мощности. В отличие от существующих приемников представленный прибор имеет кабельный СВЧ-вход. В качестве детектора также использовался кристалл германия *p*-типа. Временное разрешение ограничивается только полосой пропускания осциллографа, который подключается к выходному кабелю.

В докладе **В. Л. Бычкова и С. А. Двинина** *"К теории распространения волн ионизации в многокомпонентной среде"* представлено развитие метода последовательного упрощения многокомпонентных систем уравнений с возможностью получения одного уравнения диффузии с "эффективными" нелинейным источником и коэффициентом диффузии. В результате получены простые выражения для скорости фронта ионизации в многокомпонентных средах. Рассмотрены также следующие процессы: участие в химических реакциях заряженных частиц плазмы, процессы возбуждения амбиполярного поля в многокомпонентной смеси, а также влияние внешнего поля на распространение фронта ионизации. Обращено внимание на эффекты, связанные с двумерной неоднородностью разряда и генерацией при этом течений нейтрального газа.

В докладе **О. А. Синкевича с сотрудниками** *"Особенности вольтамперных характеристик вольфрамового катода в сильноточной электрической дуге"* проведен анализ вольтамперных характеристик (ВАХ) вольфрамового термоэмиссионного катода, работающего в аргоновой плазме в широком диапазоне температур поверхности. В ряде режимов работы катода могут возникать немонотонные ВАХ. Неоднозначные ВАХ наблюдаются как в случае самосогласованной задачи

(температура поверхности катода T_c определяется в процессе решения), так и в случае однородного катода (T_c — задается как параметр модели). В работе рассчитаны предельные ВАХ катода в условиях, когда температура катода не превышает температуру плавления материала катода T_s . Показано, что максимальное значение плотности тока с поверхности твердого вольфрамового катода без образования жидкой фазы составляет около 640 А/мм².

Доклад И. А. Косого с соавторами *"Микроволновая дуга"* посвящен представлению оригинальной конструкции микроволнового плазмотрона коаксиального типа. В качестве источника микроволновой энергии использовался бытовой магнетрон с частотой $f = 2,45$ ГГц, мощностью $P \approx 1$ кВт и изменяемой длительностью импульса излучения в диапазоне 5—1000 мкс. Эксперименты проводились в воздухе при атмосферном давлении. Для определения параметров разряда использовалась методика эмиссионной спектроскопии.

В докладе **А. Ф. Александрова, Е. А. Кралькиной с соавторами** *"Математическое моделирование разряда в канале Холловского плазменного двигателя"* показано, что электроны, эмитированные с катода, не попадают внутрь канала, а осциллируют в пространстве между катодом и корпусом двигателя. Часть электронов попадает на корпус двигателя, который заряжается до потенциала катода.

В докладе **А. Ф. Александрова, Е. А. Кралькиной с соавторами** *"Экспериментальное изучение закономерностей энерговклада в гибридный ВЧ-разряд низкого давления"* представлены результаты экспериментальных исследований, в которых изучались закономерности энерговклада в плазму новой модификации ВЧ-разряда, поддерживаемого с помощью узла ввода ВЧ-мощности в виде параллельно соединенных индуктора и обкладок конденсатора.

В докладе **В. М. Шибкова с соавторами** *"Воспламенение тонких углеводородных пленок с помощью разряда, создаваемого в режиме программированного импульса"*, рассмотрено влияние неравновесной плазмы на воспламенение и горение тонких углеводородных пленок (бензин, спирт, керосин) с помощью разряда, создаваемого в режиме программированного импульса.

В целом, работа секции была успешной. Представленные доклады свидетельствуют о большом разнообразии тематик, связанных с применением плазменных и лучевых технологий. По результатам конференции можно утверждать, что такого рода исследования проводятся как научными коллективами высших учебных заведений, так и ис-

следовательскими центрами России в основном с привлечением молодых ученых, аспирантов и студентов.

• В секции "*Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего*" было проведено три заседания: два устных и одно стендовое. В общей сложности было представлено 26 докладов.

Первая устная сессия была посвящена диагностическим системам ИТЭР, развиваемым в России. **К. Ю. Вуколов** (РНЦ Курчатовский институт) сделал обзор российских диагностических систем, **И. Б. Семенов** (Агентство ИТЭР) рассказал о методологии проектирования систем сбора и обработки данных. Отдельные доклады были посвящены каждой из диагностических систем: диагностика по анализу нейтральных атомов (**В. И. Афанасьев**, ФТИ РАН им. Иоффе), диагностика томсоновского рассеяния (**Е. Е. Мухин**, ФТИ РАН им. Иоффе), нейтронная диагностика (**А. В. Батюнин**, ГНЦ РФ ТРИНИТИ), диагностика активной спектроскопии (**С. Н. Тугаринов**, ГНЦ РФ ТРИНИТИ), диагностика на основе лазерной резонансной флюоресценции атомов (**И. В. Москаленко**, **А. В. Горбунов**, РНЦ "Курчатовский институт"), гамма-спектроскопическая диагностика высокотемпературной плазмы (**И. Н. Чугунов**, ФТИ РАН им. Иоффе). Кроме того, **И. В. Мазуль** (НИИЭФА им. Ефремова) сделал подробный доклад о проблемах создания элементов дивертора и первой стенки установки ИТЭР.

Вторая устная сессия была посвящена, в основном, численному моделированию процессов в токамаке ИТЭР. Были представлены научные результаты, полученные в результате развития численных кодов и расчетно-теоретических исследований в поддержку проекта ИТЭР. Полученные в НИИЭФА им. Ефремова результаты таких исследований были представлены в докладе **А. Б. Минеева** "Моделирование начальной стадии разряда в ИТЭР с помощью кода TRANSMAK", а обзор работ по компьютерному моделированию и результаты расчетов, полученные ИФТ РНЦ "Курчатовский институт", были представлены **С. В. Коноваловым**. Доклад **В. Е. Жоголева** был посвящен исследованию возможности достижения режимов с зажиганием термоядерной реакции в ИТЭР, а в докладе **В. М. Леонова** представлены результаты моделирования сценариев инициации и гашения разряда в установке ИТЭР. В докладе **В. Л. Вдовина** обсуждался сценарий ВЧ-нагрева и генерации тока электромагнитными волнами диапазона частот вблизи ионного циклотронного резонанса.

На стендовой сессии были представлены доклады, касающиеся, в основном, диагностических систем ИТЭР, за создание которых в международ-

ном проекте отвечает Россия. Обсуждались как физические, так и конструкторские вопросы нейтронной диагностики, систем активной спектроскопии и спектроскопии водородных линий, диагностики томсоновского рассеяния, а также вопросам рефлектометрии плазмы со стороны высокого магнитного поля установки ИТЭР.

В целом доклады секции продемонстрировали существенный прогресс в научно-исследовательских и конструкторских работах в поддержку проекта ИТЭР.

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

Выводы

1. XXXVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является важнейшим ежегодным крупномасштабным научным форумом с участием доминирующей группы ученых России, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. Она проходила уже 37-й раз и собрала на свои заседания значительное число участников из научных центров России, стран СНГ и многих других стран. По сравнению с предыдущей конференцией выросло число российских и иностранных организаций, представивших доклады.

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

3. Остается заметным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными в ведущих научных центрах Европы, Японии и США. Это указывает на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых в области физики плазмы остаются пока достаточно высокими, чтобы быть востребованными мировым научным сообществом.

4. Увеличивается число работ, посвященных прикладным исследованиям в области физики плазмы, растет интерес к этим научным исследованиям среди молодежи, принявшей участие в ра-

боте конференции. Однако участники конференции отмечали значительные трудности, возникающие при внедрении результатов научных исследований на промышленных предприятиях России.

5. Продолжают существовать негативные факторы, влияющие на развитие фундаментальных исследований по физике плазмы. Эти факторы проявляются в физическом износе имеющихся в России установок и в слабом оснащении лабораторий современными научными приборами и оборудованием. Не менее значимым негативно действующим фактором является недостаточное финансирование научных институтов, работающих в области физики плазмы. Эти факторы реализуются в тенденциях, которые приводят к торможению фундаментальных исследований в перспективных областях физики плазмы. При сохранении этих негативных тенденций в ближайшем будущем Россия может попасть в положение аутсайдера в области научных фундаментальных исследований по физике плазмы на долгие годы. Последующая за этим утрата научных школ в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза существенно снизит научный потенциал России, восстановление которого при благоприятных условиях в будущем потребует многих лет и огромных средств.

6. Существуют также проблемы, затрудняющие в России реализацию научно-технических разработок, полученных в последнее время российскими учеными в области прикладной физики плазмы. Это, прежде всего, продолжающаяся тенденция примитивизации российской промышленности и фактически полное отсутствие спроса на инновационную продукцию на рынке товаров и услуг внутри России вследствие сильной монополизации крупных промышленных отраслей и, как следствие этого, подавленность реальной экономической конкуренции в крупном бизнесе, который потенциально способен финансировать инновации. В России также практически отсутствует сеть научно-производственных малых и средних предприятий инновационной направленности, имеющих материально-техническую базу и финансовые ресурсы для дальнейшей технологической разработки полученных результатов НИР и их дальнейшую трансформацию в конкретные образцы опытных или промышленных технологических установок и продуктов, способных выйти на внутренний и внешний рынки. В России слабо развита система технологических фондов, осуществляющих финансовую и материальную поддержку венчурных малых и средних фирм, ведущих инновационную деятельность. В России реализовался низкий уровень правовой защиты российских па-

тентов на технологические изобретения, полезные модели, устройства и другие объекты интеллектуальной собственности. Существуют также огромные трудности для экспорта из России высокотехнологичной продукции в силу сильной бюрократизации и крайне медленной работы таможенных служб, а также из-за чрезмерно большого количества объектов, включенных в список продукции двойного назначения. Неблагоприятный налоговый климат в России для инновационных российских и иностранных компаний, неразвитое законодательство препятствуют осуществлению даже слабой поддержки инновационной деятельности научно-технических организаций со стороны крупных и средних промышленных предприятий.

Эта сложившаяся к настоящему времени в России совокупность негативных факторов и тенденций фактически остановила развитие инновационного бизнеса в России на основе внедрения новых национальных научных достижений, в частности, в области физики плазмы и плазменных технологий.

Важно в кратчайшие сроки на государственном уровне разработать и провести комплексные мероприятия по переориентации российской правоприменительной и налоговой систем от режима подавления инновационного бизнеса на режим благоприятствования. Можно прогнозировать, что в результате комплексного введения благоприятных и долговременных условий, способствующих развитию инновационного процесса в стране, стабильный рост экономики России на основе инноваций может составить 3—5 % в год.

*Работа выполнена в рамках
Программы РАН
"Фундаментальные проблемы физики
высокотемпературной плазмы
с магнитной термоизоляцией".*

Л и т е р а т у р а

1. Тезисы докладов XXXVII Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС. — М.: ЗАО НТЦ "ПЛАЗМАИОФАН", 2010.
2. WWW.Plasmaiofan.ru/conferences
3. WWW.GPI.ru

Actual development trends of studies on plasma physics and controlled fusion in Russia in 2009

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

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, 38 Vavilov str.,
Moscow, 119991, Russia
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

The article provides a review of papers presented at the annual XXXVII International (Zvenigorod) Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion which was held from 8 to 12 February 2010 in the town of Zvenigorod, Moscow region. There were analyzed the main trends and the complexity of development of scientific research in the field of plasma physics in Russia.

PACS: 52.55.-s; 52.25.-b

Keywords: plasma, conference, physics, thermonuclear fusion, reports.

Bibliography — 3 references.

Received September 1, 2010