

УДК 533.9

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

EDN: NBKFWI



Развитие исследований в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в России в 2022 году

*(Обзор материалов L Международной Звенигородской конференции
по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 20–24 марта 2023 г.)*

И. А. Гришина, В. А. Иванов

Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на юбилейной L Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся с 20 по 24 марта 2023 года в г. Звенигород Московской области. Проведен анализ достижений в основных направлениях развития исследований в области физики плазмы в России и их сравнение с работами за рубежом.

Ключевые слова: физика плазмы, термоядерный синтез, процессы в низкотемпературной плазме, плазменные и лучевые технологии, международный проект ITER, конференция, результаты.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-3-189-212

Введение

Юбилейная L Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигород Московской области с 20 по 24 марта 2023 года.

На конференции было представлено 273 научных доклада из 69 российских и 8 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым

технологиям. Общее количество зарегистрированных авторов докладов составило более 900 человек.

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

1. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия – 57
2. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия – 35
3. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия – 32
4. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ITER», Москва, Россия – 27
5. Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Московская обл., Россия – 24
6. Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия – 22
7. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия – 21

Гришина Ирина Анатольевна¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Иванов Вячеслав Алексеевич^{1,2}, гл.н.с., к.ф.-м.н.,
доцент.

E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова
Российской академии наук (ИОФ РАН).
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

² Национальный исследовательский ядерный
университет МИФИ.

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 37.

Статья поступила в редакцию 19.05.2023

Принята к публикации 25.05.2023

© Гришина И. А., Иванов В. А., 2023

8. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия – 21
9. ФИЦ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия – 21
10. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва, округ Троицк, Россия – 17
11. Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия – 17
12. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия – 16
13. Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия – 15
14. Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия – 14
15. ФИЦ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия – 13
16. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия – 12
17. ФИЦ Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия – 10
18. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия – 6
19. Российский университет дружбы народов, Москва, Россия – 6
20. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия – 6
21. Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ), г. Казань, Россия – 6
22. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия – 4
23. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ технической физики им. академика Е. И. Забабахина, г. Снежинск, Россия – 3
24. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия – 3
25. ООО «Плазма-ВСТ», г. Казань, Россия – 3
26. Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия – 3
27. Институт химии растворов РАН им. Г. А. Крестова, г. Иваново, Россия – 3
28. Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва, Россия – 3
29. Центр фундаментальных и прикладных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, ГК «Росатом», Москва, Россия – 3
30. Координационный центр «Управляемый Термоядерный Синтез – Международные Проекты», Москва, Россия – 2
31. АО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург, Россия – 2
32. Псковский государственный университет, г. Псков, Россия – 2
33. НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва Россия – 2
34. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия – 2
35. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия – 2
36. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия – 2
37. Ивановский государственный университет, г. Иваново, Россия – 2
38. Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия – 1
39. Исследовательский центр им. М. В. Келдыша, Москва, Россия – 1
40. Институт радиотехники и электроники РАН им. В. А. Котельникова, Фрязинский филиал, г. Фрязино, Россия – 1
41. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия – 1
42. Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург, Россия – 1
43. Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия – 1
44. Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова Минздрава России, Москва, Россия – 1
45. Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, Москва, Россия – 1
46. «Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатов-

ский институт», г. Гатчина, Ленинградская обл., Россия – 1

47. ООО «Русские технологии», Санкт-Петербург, Россия – 1

48. Нижнетагильский технологический институт, филиал Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Нижний Тагил, Россия – 1

49. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежала, Москва, Россия – 1

50. Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследований» РАН, Москва, Россия – 1

51. ООО ПТО «Медтехника», г. Казань, Россия – 1

52. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Россия – 1

53. НПО «ЛИТ», Москва, Россия – 1

54. Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), г. Казань, Россия – 1

55. АО «Красная Звезда», Москва, Россия – 1

56. Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия – 1

57. ООО Иоффе Фьюжн Текноложи, Санкт-Петербург, Россия – 1

58. Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия – 1

59. Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия – 1

60. Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия – 1

61. Институт механики МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия – 1

62. Институт лазерно-физических исследований, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия – 1

63. Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия – 1

64. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия – 1

65. Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ, Москва, Россия – 1

66. АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А. Г. Иосифьяна, Москва, Россия – 1

67. АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара», Москва, Россия – 1

68. ОАО «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности», Москва, Россия – 1

69. ООО «Эдвансд Пропалшн Системс», Москва, Россия – 1

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

1. ITER Organization, Cadarache, Saint-Paul-Lez-Durance, France – 2

2. University of Wisconsin, Madison, USA – 2

3. German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, Germany – 1

4. Institut Jean Lamour, Université de Lorraine, Nancy, France – 1

5. Национальный ядерный центр республики Казахстан, Курчатов, Казахстан – 1

6. ЗАО «Спектроскопия, Оптика и Лазеры – Авангардные Разработки» (СОЛАР), г. Минск, Беларусь – 1

7. Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан – 1

8. Тартуский университет, Тартус, Сирийская Арабская Республика – 1

Основная часть

На конференции были представлены доклады по пяти 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.

5. Проект ITER: шаг в энергетику будущего.

На конференции состоялось четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 16 обзорных докладов о результатах отечественных и мировых исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям, и по проекту международного термоядерного экспериментального реактора ITER (ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor). Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 83 устных 174 стендовых доклада. Были также представлены доклады по смежным с физикой плазмы научно-техническим проблемам.

С обзорным докладом, посвященным 50-летию юбилею конференции, выступил сопредседатель Организационного комитета конференции **В. А. Иванов** (ИОФ РАН). В докладе сообщалось, что первая конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу была проведена осенью 1973 года в Физическом институте им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР. Организатором этой конференции был Научный совет по физике высокотемпературной плазмы, созданный академиком Л. А. Арцимовичем (1909–1973) в рамках АН СССР. В 1973 году Совет возглавил профессор М. С. Рабинович. В первой конференции участвовали около 100 ученых из России, Украины, Белоруссии и других республик, входивших в состав СССР. Основные проблемы, которые обсуждались на конференции, были связаны с прорывными исследованиями, выполненными в Курчатовском институте на установке токамак, на которой была получена рекордная для того времени электронная температура плазмы около 10 млн градусов. В то же время в СССР развивались и другие методы удержания плазмы, и строились установки для получения горячей плазмы: Z-пинчи, стеллараторы, открытые ловушки. С 1974 года конференции по физике высокотемпературной плазме стали проходить ежегодно в городе Звенигороде Московской области. Конференция 1974 года была посвящена памяти академика Л. А. Арцимовича, который внес значительный вклад в развитие исследований по физике высокотемператур-

ной плазмы и управляемому термоядерному синтезу в СССР. Оргкомитет конференции обратился в Президиум АН СССР с ходатайством о приглашении 19 видных ученых из ведущих научных центров США, Европы, Японии для чтения лекций и представления обзорных докладов по фундаментальной физике плазмы, проблемам управляемого термоядерного синтеза, а также прикладным аспектам физики плазмы. Этот прецедент открыл возможность на следующих конференциях также приглашать иностранных ученых для представления научных работ, выполненных в передовых иностранных научных центрах, что позволило, начиная с 1998 года, организовывать звенигородские конференции как международные.

В этом году исполнилось 120 лет со дня рождения академика Михаила Александровича Леонтовича (07.3.1903 – 30.3.1981), выдающегося физика-теоретика, чьи личные труды и труды его учеников в рамках двух созданных им научных школ по радиофизике и физике плазмы заложили в масштабах мировой науки теоретический фундамент этих дисциплин. Доклад, посвященный этому юбилею, представил **В. С. Лисица** (НИЦ «Курчатовский институт»). Основные фундаментальные достижения М. А. Леонтовича включают получение условий на границе хорошо проводящей среды (получивших название граничных условий Леонтовича), уравнение для волновых полей с медленно меняющимися амплитудами (параболическое уравнение Леонтовича), теорию распространению радиоволн вдоль поверхности Земли и (совместно с М. Л. Левинным) теорию тонких проволочных антенн. В 1951 г. М. А. Леонтовичу поручают руководство теоретическими исследованиями по проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС) в Лаборатории измерительных приборов АН СССР (ЛИПАН), позднее ставшей Институтом атомной энергии им. И. В. Курчатова. В первые годы работы в ИАЭ М. А. Леонтович создал теорию инерционного сжатия плазмы с током. Его идеи об уравновешивании тороидального растяжения плазмы с током при помощи проводящего кожуха и о стабилизации плазменного шнура сильным тороидальным магнитным полем лежат в основе удержания плазмы в системе «токамак».

В. С. Лисица также представил доклад, посвященный юбилею другого выдающегося российского ученого. В этом году исполняется 100 лет со дня рождения профессора Владимира Ильича Когана (11.06.1923 – 07.12.2013) – создателя научной школы в теории излучательных процессов в горячей плазме, признанного авторитета в теории излучения плазмы и квантовой механике. В. И. Когану принадлежит разработка теоретических основ расчета радиационных характеристик горячей плазмы, существенных для ее диагностики и энергобаланса. Им были выполнены пионерские работы по теории уширения спектральных линий, радиационных потерь энергии плазмы, теории тормозного излучения. Последние его работы были посвящены разработке «Крамерсовской электродинамики» и разбору концепций Н. Бора, А. Эйнштейна и других классиков науки в области соотношения между классической и квантовой теориями излучения.

Б. В. Кутеев (НИЦ Курчатовский институт) с согласия М. Грязневича представил пленарный доклад, где были рассмотрены история развития сферических токамаков (СТ), а также полученные на этих установках важнейшие достижения с точки зрения создания коммерческого термоядерного реактора. В докладе отмечалось, что термоядерный реактор на базе СТ обладает рядом преимуществ, по сравнению с традиционным реактором, который планируется создать, идя по пути JET–ITER–DEMO. Для реактора на базе СТ переход от пилотной демонстрационной установки к силовой может быть осуществлен только за счет увеличения линейных размеров установки без существенных изменений в применяемых технологиях. Использование высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) в СТ обеспечит как высокое магнитное поле, так и компактный размер установки. Поэтому может оказаться, что создать электростанцию на базе СТ окажется быстрее и дешевле, чем на базе традиционного токамака. К настоящему времени показано, что энергетическая эффективность термоядерного реактора зависит, главным образом, от вырабатываемой термоядерной мощности, а не от размера реактора. Поэтому компания Tokamak Energy Ltd (United Kingdom) разработала компактный прототип реактора на основе сфери-

ческого токамака ST40 с сильным магнитным полем, в котором уже была получена температура плазмы, превышающая 100 млн градусов. В экспериментах на ST40 было подтверждено, что энергетическая эффективность сферического токамака значительно возрастает с увеличением магнитного поля. Ожидается, что использование ВТСП открывает возможность увеличения магнитного поля в ST40 до 24 Тесла, что позволит уменьшить размер индуктора токамака и освободить место для создания эффективной нейтронной защиты будущего реактора.

Обзор результатов плазменных исследований, выполненных на сферическом токамаке Глобус-М2, был представлен **В. Б. Минаевым** (ФТИ им. А. Ф. Иоффе). Эксперименты проводились при тороидальном магнитном поле до 0,9 Тл и токе плазмы до 0,44 МА (90 % от максимальных проектных значений). Впервые в режиме с нейтральной инжекцией (пучок атомов дейтерия с энергией 30 кэВ и импульсной мощностью 0,7 МВт) был продемонстрирован нагрев ионов плазмы до температуры около 4 кэВ. Температура электронов составила 1,5 кэВ при средней плотности плазмы $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В экспериментах по безындукционному возбуждению электрического тока в плазме этот ток регистрировался при вводе электромагнитных волн нижнегибридного диапазона частот (2,45 ГГц) с помощью как тороидально, так полоидально ориентированной антенны-грилла. Доля возбуждаемого безындукционного тока превысила 50 % от полного тока разряда 0,25 МА. Достигнутые значения эффективности $\eta \approx (0,2-0,4) \times 10^{19} \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ сравнимы с результатами, полученными на обычных токамаках. Скейлинг для сферических токамаков, демонстрирующий сильную зависимость времени удержания энергии от магнитного поля и умеренную от тока плазмы ($\tau_E^{\text{GLB}} \sim I_p^{0,43} B_T^{1,9}$), был подтвержден для магнитных полей до 0,8 Тесла. Были также представлены результаты последних экспериментов по исследованию влияния возбуждаемых альфвеновских мод на удержание быстрых частиц в плазме сферического токамака Глобус-М2.

Второй доклад группы исследователей, работающих на токамаке Глобус-М2 (докладчик **Н. Н. Бахарев**, ФТИ им. А. Ф. Иоффе),

был посвящен исследованию транспорта и потерь ионов высокой энергии во время развития в удерживаемой плазме тороидальных альфвеновских мод (ТАЕ). ТАЕ является кандидатом на роль самой опасной неустойчивости с точки зрения удержания быстрых частиц в будущих термоядерных установках. ТАЕ возбуждаются популяцией альфа-частиц с энергиями в несколько МэВ, которые рождаются в процессе термоядерной реакции синтеза дейтерия и трития. Развитие ТАЕ может приводить к катастрофическим последствиям для плазмы, удерживаемой в СТ. Основная опасность заключается в том, что взаимодействие альфвеновских волн с быстрыми частицами может провоцировать их аномальный транспорт на периферию плазменного шнура, создавая локальные нагрузки на стенку токамака, а также снижая эффективность нагрева плазмы и генерации токов увлечения. Экспериментальные данные токамаков Глобус-М и Глобус-М2, а также моделирование взаимодействия частиц с волной, были использованы в докладе для анализа механизмов транспорта быстрых ионов; локальности потерь во времени и пространстве; ширины области резонанса; особенностей эволюции моды во времени из-за взаимодействия с быстрыми ионами и фоновой плазмой; зависимости потерь быстрых частиц от амплитуды моды, тороидального магнитного поля, тока плазмы и особенностей удержания быстрых частиц при ТАЕ в компактных сферических токамаках. Проведенный анализ позволяет дать благоприятный прогноз для будущих установок типа СТ.

Пленарный доклад **И. В. Шиховцева** (ИЯФ СО РАН) был посвящен разработке атомарных инжекторов в ИЯФ СО РАН. В докладе отмечалось, что в настоящее время производится сборка прототипа атомарного инжектора для нагрева плазмы в установке «Газодинамическая ловушка» (ГДЛ). Мощность пучка быстрых атомов водорода составляет 1,7 МВт при энергии атомов 15 кэВ. Длительность импульса пучка 30 мс в базовом варианте и 300 мс для варианта ионного источника с охлаждаемыми электродами ионно-оптической системы. Отличительная особенность атомарного инжектора – рекордный ток первичного ионного пучка 150 А. Также ведется разработка ионного источника с энергией

ионов 100 кэВ и током пучка 75 А. После нейтрализатора атомарный пучок будет иметь мощность 3,5 МВт при работе на дейтерии. Кроме того, в ИЯФ СО РАН разрабатывается проект атомарного инжектора на основе отрицательных ионов водорода с энергией 500 кэВ, который может быть прототипом атомарного инжектора для нагрева плазмы в новом разрабатываемом российском токамаке с реакторными технологиями TRT.

В Институте прикладной физики РАН ведется разработка сильноточных ЭЦР источников протонов для линейных ускорителей. Этой теме был посвящен доклад **В. А. Скалыги** (ИПФ РАН). В докладе отмечалось, что источники ионов являются одним из ключевых элементов любых ускорителей тяжелых заряженных частиц. С повышением характеристик ускорительных систем растут и требования к инжекторам ионов. Одним из перспективных источников ионов является источник на основе разряда, поддерживаемого в открытых магнитных ловушках мощным излучением гиротронов в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). Использование мощного СВЧ-излучения современных гиротронов с длинами волн миллиметрового диапазона обеспечивает поддержание разряда с рекордно высоким для ЭЦР ионных источников удельным энерговыделением (до 200 Вт/см³). Это позволяет создавать и поддерживать плазму с плотностью до 10¹⁴ см⁻³ и температурой 50–100 эВ, оптимальной для диссоциации и ионизации водорода. В экспериментах были получены непрерывные и импульсные протонные и дейтронные пучки с током до 500 мА и RMS нормализованным эмиттансом на уровне 0,2 п-мм-мрад. Продемонстрирована возможность генерации чистого протонного пучка при доле примесных молекулярных ионов менее 0,1 %.

Л. М. Василяк (ОИВТ РАН) выступил с пленарным докладом, посвященным созданию мощных высокоэффективных источников ультрафиолетового излучения и их применению для обеззараживания и очистки воды и воздуха от вредных газов и микро- и наночастиц. Известно, что УФ-излучение весьма эффективно для дезинфекции воды, воздуха и поверхностей, а также для возбуждения фотохимических реакций в воздухе и воде. В докладе

сообщалось, о создании в ОИВТ РАН мощных (500 Вт и выше) высокоэффективных амальгамных ламп низкого давления и источников питания к ним. КПД преобразования электрической энергии в бактерицидное УФ-излучение на длине волны 254 нм составляет около 40 %, рабочий ресурс – до 12000 часов при спаде мощности УФ-излучения в конце периода эксплуатации всего на 15 %. Установки на основе этих мощных УФ-ламп позволяют проводить обеззараживание в потоке воды при больших расходах. Перспективным методом очистки воздуха от запахов и вредных веществ является фото-сорбционно-каталитический метод. Очищаемый воздух обрабатывается ультрафиолетовым излучением амальгамных ламп с длинами волны 185 нм и 254 нм, что приводит к образованию активных частиц: радикала гидроксила OH , атомарного кислорода O , озона O_3 и др. Процессы окисления и трансформации идут вначале в объемной части фотореактора, затем воздух подается на сорбционно-каталитическую ступень, где недоокисленные компоненты адсорбируются и доокисляются в более медленных процессах активными частицами из газовой фазы, а также кислородом воздуха. Такая комбинация методов и процессов позволяет обеспечить высокую степень очистки при наличии широкого спектра примесей, таких как, сероводород, меркаптаны, аммиак, летучие органические соединения и др. Проведены эксперименты по очистке воздуха от примеси сероводорода. В проточном фотореакторе прямоугольной формы с поперечным сечением 176×220 см и длиной 160 см перпендикулярно потоку воздуха с расходом 5000 куб.м/час были установлены 24 УФ-лампы мощностью 620 Вт каждая. Далее поток воздуха проходил через каталитический блок с засыпкой из активированного угля. В экспериментах эффективность очистки составила 98,5–99,9 % при концентрации сероводорода на входе от 10 до 80 мг/м³.

В докладе **А. В. Аржанникова** (ИЯФ СО РАН) были подведены итоги 50-летних исследований релаксации сильнотоочного релятивистского электронного пучка (РЭП) в плазме. Эксперименты по релаксации релятивистского (энергия электронов около 1 МэВ) электронного пучка с килоамперным током в

замагниченном плазменном столбе начались в ИЯФ СО АН СССР в начале 1970-х годов. Наивысший результат по параметрам нагретой плазмы при релаксации РЭП был достигнут в РФ на установке ГОЛ-3 при токе пучка 20 кА и длительности импульса около 10 мкс. Наряду с бесстолкновительным нагревом плазмы, был исследован важный эффект генерации излучения на плазменных частотах, возникающий в результате интенсивного пучково-плазменного взаимодействия. В дальнейшем механизмы генерации излучения в ходе релаксации пучка нерелятивистских электронов в плазме были предложены для объяснения потоков радиоизлучения из солнечной короны. В результате исследований, проведенных на установке ГОЛ-ПЭТ, была получена генерация электромагнитного излучения мощностью 10 МВт при микросекундной длительности импульсов на частотах 0,2–0,3 ТГц (верхнегибридный диапазон частот), распространяющегося в свободном пространстве в виде направленного потока.

Основные достижения в создании лазерных источников ультрарелятивистских электронов, гамма-излучения и частиц высоких энергий были представлены в докладе **Н. Е. Андреева** (ОИВТ РАН). В сообщении отмечалось, что интенсивные пучки фотонов и частиц в диапазоне энергий масштаба десятков и сотен МэВ являются эффективными инструментами во многих областях исследований, таких как создание и диагностика вещества в экстремальных состояниях в экспериментах по УТС, ядерная физика и материаловедение, а также в медицинских и биофизических приложениях. Были рассмотрены различные процессы лазерно-плазменного ускорения электронов. Например, кильватерное ускорение электронов в режиме самоодуляции лазерного импульса, которое лежит в основе создания платформы для диагностики сжатого вещества мишени в ряде крупных лабораторий, ведущих исследования в области термоядерного синтеза с инерционным удержанием. Была рассмотрена концепция создания эффективных источников γ -излучения и нейтронов на основе генерации релятивистских электронов в режиме прямого лазерного ускорения. Отмечалось, что лазерные системы петаваттного класса мощности, которые могут

генерировать короткие субпикосекундные и фемтосекундные импульсы, сфокусированные до ультрарелятивистской интенсивности, являются хорошими кандидатами для создания сильноточных пучков ультрарелятивистских электронов в протяженной плазме с плотностью, близкой к критической. Это было подтверждено в экспериментах, проведенных в ФИАН, в которых полимерные аэрогели низкой плотности использовались для создания плазменных мишеней. В экспериментах была зарегистрирована генерация ультрарелятивистских электронов, гамма-излучения и нейтронов с рекордными эффективностями преобразования энергии лазерного импульса в энергию вторичных источников, например, до 2 % энергии лазерного излучения преобразуется в потоки электронов с энергией более 7 МэВ.

О реализации проекта XCELS (eXawatt Center for Extreme Light Studies) рассказывалось в докладе от большого коллектива авторов из ИПФ РАН (докладчик **И. Ю. Костюков**). Проект направлен на создание в России исследовательской инфраструктуры – Центра исследований экстремальных световых полей. Ядром инфраструктуры должен стать многоканальный (12 каналов) источник света с рекордной субэкзаваттной мощностью. Важной особенностью установки XCELS является ее многоканальность, что предполагается использовать для формирования в области фокуса сложных распределений световых полей, оптимизирующих различные параметры лазерного излучения, например, максимальную напряженность лазерного поля. Основной задачей инфраструктуры является исследование фундаментальных процессов взаимодействия лазерного излучения экстремально высокой интенсивности с веществом. Можно надеяться, что проект XCELS позволит достичь новых рубежей в физике сильных электромагнитных полей, а также позволит исследовать некоторые фундаментальные процессы. Это такие процессы как преобразование света в материю посредством квантово-электродинамических каскадов, эффекты поляризации вакуума в сильном поле, например, четырехволновое взаимодействие, соответствующее упругому фотон-фотонному рассеянию, а также интенсивное лазерно-плазменное взаи-

модействие, приводящее к образованию плазменных структур, состоящих из вторичных частиц, например, электрон-позитронных пар. По мнению авторов доклада, уникальные особенности установки XCELS сделают возможным создание источников частиц и вторичного излучения с беспрецедентными параметрами.

Доклад **С.-И. Глазырина, Е. М. Урвачева и С. И. Блиникова** (ВНИИА им. Н. Л. Духова, ФИАН и НИЦ Курчатовский институт) был посвящен возможностям, которые открывает наблюдение сверхновых звезд с точки зрения изучения как крупномасштабной структуры Вселенной, так и удаленных ее частей. Развитие астрономии позволило открывать вспышки сверхновых сотнями за сутки в автоматическом режиме, что значительно повысило точность получаемых данных, таких как спектры, кривые блеска, которые также несут информацию о плазменных процессах в сверхновых звездах. Экстремальные состояния вещества в звезде позволяют изучать эффекты, недоступные для лабораторного исследования на Земле. В качестве примера в докладе были рассмотрены термоядерные сверхновые (SNIa), благодаря которым было открыто ускоренное расширение Вселенной. Кривая блеска таких сверхновых имеет особенность: абсолютная светимость в максимуме коррелирует с шириной кривой блеска, что и позволяет их использовать в космологических приложениях. Для некоторых типов сверхновых (SNIa, SLSN) возможно определить их абсолютную светимость, что позволяет использовать их как «стандартную свечу» в космологических приложениях. Вспышки SNIa возникают при термоядерном горении белых карликов в двойных системах: при слиянии звезд, либо из-за развития неустойчивостей в результате аккреции вещества с компонента двойной звезды. Фундаментальная проблема таких сверхновых связана с физикой горения, его неустойчивостями, турбулентностью, а также переходом в детонацию. Такие сверхновые не могут быть использованы напрямую в космологии при измерении расстояний до удаленных объектов, и требуют калибровки. Другой класс сверхновых (SLSN, сверхмощные новые), у которых наблюдаются узкие линии в спектре, позволяет построить прямой метод измерения расстояний. Метод

строится на основе того, что в таких объектах свечение определяется фронтом радиативной ударной волны. Эти сверхновые помимо вклада в космологию представляют интерес для проверки моделей радиационной гидродинамики.

Современному состоянию строительства токамака ITER был посвящен доклад **Л. Н. Химченко и А. В. Красильникова** (Проектный центр ITER). В докладе отмечалось, что на данном этапе ITER находится на наиболее сложном этапе строительства – этапе сборки токамака. Знаковым достижением является сборка первого сектора вакуумной камеры со сверхпроводящими катушками тороидального магнитного поля; этот сектор уже прошёл «притирку по месту» в шахте токамака. Этап сборки токамака качественно отличается от предыдущих этапов. Здесь должно стыковаться оборудование и части единых систем, выполненных в странах с различной культурой производства и национальными стандартами. Спустя два с половиной года после начала этапа сборки токамака, ITER столкнулся с первой серьёзной проблемой: были выявлены дефекты в двух ключевых компонентах токамака – в теплозащитных экранах и секторах вакуумной камеры. Несмотря на то, что из-за пандемии Covid-19 темп сборки токамака несколько замедлился, все стороны продолжают выполнять свои обязательства. Это в полной мере относится к российским обязательствам. За прошедший период на площадку сборки ITER были поставлены 4 гиротронных комплекса для системы дополнительного нагрева плазмы, 27 трейлеров различной коммутирующей аппаратуры для подвода электроэнергии к токамаку, 3 удлинительных верхних патрубка и биметаллические пьедесталы вакуумной камеры. Была завершена и отправлена на площадку ITER сверхпроводящая катушка полоидального поля PF-1, которая является основным изделием в рамках российских обязательств. Участие России в проекте ITER позволяет иметь доступ к самым «продвинутым» термоядерным технологиям и держать свой высокий технологический уровень.

Вопросам проектирования в России токамака с реакторными технологиями (TRT) был посвящен доклад **А. В. Красильникова,**

С. В. Коновалова и Ю. А. Кашука (Проектный центр ITER). В докладе отмечалось, что токамак TRT разрабатывается как полномасштабный прототип будущего термоядерного реактора, а также термоядерного источника нейтронов для гибридного реактора. Основными целями создания TRT являются: разработка и интеграция в одной установке ключевых инновационных термоядерных технологий; проведение пионерских исследований работы токамака в режиме горения термоядерной плазмы, при котором выход термоядерной энергии по отношению к вложенной энергии в плазму Q превысит 1, с интенсивным нагревом альфа-частицами в центре плазменного шнура в дейтерий-третиевых экспериментах; а также интеграция технологических разработок ITER в российскую программу УТС. Российская Федерация имеет право использовать в национальной термоядерной программе все технологии, созданные в рамках проекта ITER. Программа исследований, которые предполагается проводить на TRT включает в себя ключевые моменты, необходимые для создания промышленных термоядерного и гибридного реакторов: генерация квазистационарного тока, разработка квазистационарных реакторных режимов взаимодействия плазма – стенка, разработка инновационного прототипов квазистационарного дивертора, исследования прототипов экспериментальных модулей blankets, и многие другие задачи. Важно, что разработка программы исследований TRT ведётся параллельно с определением необходимых для её реализации диагностик.

Пленарный доклад, посвященный статусу токамака T-15МД, был представлен **П. П. Хвостенко** от имени большого авторского коллектива сотрудников НИЦ Курчатовский институт. Российское термоядерное сообщество с нетерпением ожидает энергетического пуска и проведения первых плазменных экспериментов на этой установке, которые должны состояться в 2023 году. Установка T-15МД – токамак, основной особенностью которого является сочетание низкого аспектного отношения ($A = 2,2$) и высокого тороидального магнитного поля ($B = 2$ Тл). К ноябрю 2022 г. были закончены работы по подключению всего электротехни-

ческого оборудования от электрической подстанции № 745 к электромагнитной системе токамака Т-15МД. Проведена установка в камеру защитных графитовых плиток. Полностью смонтирован и отъюстирован вакуумный волноводный тракт для ввода мощности гиротрона предьонизации, в камеру токамака введена СВЧ-мощность 1 МВт в течение 50 мс. Создана система контроля радиационной обстановки с регистрацией интенсивности жесткого гамма и нейтронного излучений, как в зоне установки, так и за ее пределами. Проведена вакуумная подготовка разрядной камеры, включая омический прогрев камеры и обработку стенок камеры тлеющим разрядом. Диагностический комплекс установки предусматривает набор различных диагностик, которые позволят проводить широкий спектр фундаментальных и прикладных исследований в области физики горячей плазмы в токамаках.

На секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы» (председатель секции – А. И. Мещеряков) было представлено 78 докладов. Тематика докладов связана, прежде всего, с исследованиями, проводимыми на действующих установках с магнитным удержанием плазмы, таких как токамаки Глобус-М2, ТУМАН-3М, Т-11М, стелларатор Л-2М, открытые ловушки ГДЛ, ГОЛ-3, и открытая ловушка с винтовыми пробками СМОЛА. Кроме того на секции был представлен ряд работ с результатами обработки экспериментальных данных на закрывшемся в 2018 году токамаке Т-10. Ряд представленных работ был посвящен моделированию систем и диагностик токамака Т-15МД, энергетический пуск которого ожидается в 2023 году. Кроме этого, впервые после большого перерыва был представлен доклад ученых, работающих на токамаке КТМ (Казахстан).

Среди действующих установок наибольшее количество докладов представляло результаты, полученные на сферическом токамаке Глобус-М2. На этой установке была проведена модернизация магнитной системы и системы энергопитания. В результате в 2022 году на установке проводились эксперименты с магнитным полем до 0,9 Тесла и током плазмы до 0,44 МА. Температура электронов достигала 1,5 кэВ при средней

плотности плазмы $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Были проведены эксперименты по нагреву ионной компоненты плазмы с использованием двух нейтральных инжекторов. В сценарии с одновременной работой инжекторов был получен режим с «перегретыми» ионами. В широком диапазоне значений плотности плазмы центральная температура ионов ($T_i \approx 4 \text{ кэВ}$) превышала центральную температуру электронов ($T_e \approx 1,6 \text{ кэВ}$). Анализ результатов измерений энергобаланса плазмы показал, что ионная температуропроводность находится на уровне неоклассических значений для режимов работы с двумя инжекторами.

Применение на токамаке Глобус-М2 интенсивного нагрева плазмы (нагрев нейтральными пучками и волнами нижнегибридного диапазона частот) ведет к возникновению в плазме популяции высокоэнергичных ионов. В 2022 году на токамаке Глобус-М2 был введен в действие компактный анализатор атомов перезарядки СНРА-09, который регистрирует частицы в диапазоне энергий 0,8÷60 кэВ в случае дейтерия или 0,8÷120 кэВ в случае водорода. Прибор имеет 44 канала и позволяет за один разряд получать подробный энергетический спектр вылетающих из нагретой плазмы атомов перезарядки. В рамках экспериментальных кампаний были проведены измерения потоков атомов в разрядах с нейтральной инжекцией и в омическом режиме нагрева плазмы. Получены энергетические спектры атомов перезарядки. Продолжается модернизация действующих диагностик, а также идет разработка новых систем диагностики. Например, на конференции были представлены первые результаты новой диагностики, разработанной для токамака Глобус-М2, которая предназначена для получения детальной информации о профилях концентрации и температуры электронов на периферии плазмы. Она использует напуск гелия в краевую плазму и основана на измерении соотношений интенсивности излучения линий нейтрального гелия (He I).

Много интересных результатов, полученных на открытых ловушках, было представлено участниками конференции из ИЯФ СО РАН. На открытой ловушке СМОЛА исследован новый метод подавления продольных потерь: динамическое многопробочное удержание вращающейся плазмы в магнитном поле с ге-

ликоидальной симметрией. Были представлены результаты исследования течения плазмы при различных направлениях вращения плазмы в широком диапазоне плотностей, соответствующем изменению длины свободного пробега иона от одного периода винтового магнитного поля $\lambda \sim h$ до полной длины винтовой магнитной системы $\lambda \sim L$. Было показано, что при направлении вращения, отвечающем улучшенному удержанию, подавление потока истекающей плазмы наблюдается во всём диапазоне плотностей. На газодинамической ловушке (ГДЛ), которая является одной из крупнейших открытых ловушек с субтермоядерными параметрами плазмы, создана система регистрации спектров коллективного рассеяния излучения гиротрона. Основанная на измерениях таких спектров диагностика позволяет восстанавливать функцию распределения популяции надтепловых (горячих) ионов, а также контролировать развитие микронеустойчивостей в плазме ГДЛ. Источником излучения для диагностики служит мощный (450 кВт/54,5 ГГц) гиротрон, излучение которого инжектируется в плазму ГДЛ в центральном сечении ловушки. Гиротрон изготовлен в ИПФ РАН. Измерение рассеянного на флуктуациях плазмы излучения, отфильтрованного от шумов и подвергнутого соответствующей цифровой обработке, позволяет восстановить функцию распределения ионов по энергии. С помощью этой диагностики проведены первые измерения. Такая диагностическая система позволит изучать удержание горячих ионов в ГДЛ. Это особенно важно в связи с отсутствием адекватной теоретической модели этого процесса для ГДЛ.

В докладах участников конференции, работающих на стеллараторе Л-2М (ИОФ РАН), были представлены результаты исследований процессов самоорганизации плазмы. Показано, что после выключения микроволнового нагрева при остывании плазмы процессы самоорганизации играют ключевую роль в удержании плазмы. В этой фазе разряда самоорганизация плазмы приводит к установлению в плазме канонических профилей давления. Это соответствует состоянию, когда потери энергии из плазмы минимальны. Для этой фазы получен скейлинг для времени удержания энергии и показано, что он близок к скейлингу для квазистационарной фазы. Это связано с

тем, что в квазистационарной фазе внешнее воздействие со стороны нагревающего микроволнового излучения приводит к дополнительным потерям энергии и отклонению профилей давления от канонического. В это же время процессы самоорганизации стремятся вернуть плазму в состояние с минимальными потерями. Для фазы после выключения микроволнового нагрева получена зависимость минимальной мощности потерь от энергосодержания плазмы. Показано, что при возрастании энергосодержания мощность потерь возрастает пропорционально кубу энергосодержания плазмы.

Среди работ, проделанных с использованием базы данных токамака Т-10, интерес представляет доклад, сделанный **Ю. Н. Днестровским**. В докладе представлена концепция эквивалентных разрядов токамака и стелларатора, имеющих одинаковые температуры электронов и ионов, при одной и той же плотности плазмы и СВЧ-мощности, поглощенной при ЭЦР-нагреве. Эта концепция была разработана ранее по отношению к экспериментальным импульсам токамака Т-10 и стелларатора ТЖ-П. В представленной на конференции работе рассмотрены примеры эквивалентных экспериментальных разрядов стелларатора Л-2М и модельных разрядов токамака Т-10. Показано, что эмпирическая формула для эффективности нагрева, полученная ранее на основе экспериментов на токамаке Т-10 и стеллараторе ТЖ-П, справедлива и для стелларатора Л-2М, и ее можно будет применять для токамака Т-15МД.

Несколько работ было посвящено проектируемым и создаваемым установкам. Токамак Т-15МД (НИЦ «Курчатовский институт») уже построен, и в ближайшее время ожидается его энергетический пуск. Поэтому много работ было посвящено моделированию рабочих режимов Т-15МД и методов нагрева плазмы, а также диагностическим системам этого токамака. Были представлены результаты моделирования омического режима токамака Т-15МД на первой стадии работы с уменьшенными значениями магнитного поля $B = 1-1,8$ Тл и тока плазмы I около 1,5 МА. С использованием стандартной транспортной модели канонических профилей были получены профили электронной температуры для различных значений магнитного поля. Полу-

ченные профили сравнивались с экспериментальными профилями температуры плазмы для омического режима токамака Т-10. Показано, что при варьировании магнитного поля и тока плазмы в определенных пределах профили температуры для Т-10 и Т-15МД практически совпадают в пределах среднеквадратичного отклонения RMS (root mean square) 6–8 %. Сообщалось о проводимых на установке работах по вводу СВЧ-излучения гиротрона в вакуумную камеру, и о модернизации системы инъекции нейтральных пучков. Ведутся расчеты и разрабатываются схемы диагностики многоканального рентгеновского спектрометра. Также была предложена концепция диагностики теплового гелиевого пучка, предназначенной для определения температуры и плотности плазмы в пристеночной области.

Продолжается разработка технологий тритиевого цикла для проекта ДЕМО-ТИН. Разработан подход к моделированию потоков частиц в системах тритиевого топливного цикла термоядерного источника нейтронов на базе токамака, основанный на непрямом объединении кодов ASTRA, SOLPS4.3 и FC-FNS. Реализуется обратная связь между системами откачки и инъекции в виде изменения изотопного состава основной и диверторной (пристеночной) плазмы. В коде ASTRA вместо электронов в уравнениях переноса частиц используются ионы. Это позволяет более корректно оценивать парциальные времена удержания в плазме ионов от разных источников. Ведутся работы по созданию стендов для отработки технологий термоядерного топливного цикла.

На конференции были представлены результаты последних экспериментов по омическому нагреву плазмы, полученные на казахстанском токамаке КТМ ($R = 1$ м, $a_p = 0,45$ м, диверторная конфигурация с вытянутостью шнура $k = 1,7$, $B_0 = 1$ Т). Токамак КТМ представляет собой специализированную установку, предназначенную для исследования конструкционных и функциональных материалов, элементов и узлов будущих установок термоядерного синтеза. В настоящий момент на токамаке КТМ достигнуты следующие параметры плазменного разряда в режиме омического нагрева: ток плазмы $I_p \approx 500$ кА, плотность плазмы $1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, длительность разряда около 1 с.

По результатам работы секции, можно сделать вывод, что уровень экспериментальных работ, выполняемых на российских термоядерных установках, по-прежнему, заметно отстает от уровня работ, выполняемых в таких странах, как США, Япония, Южная Корея, Китай, и в странах Евросоюза. Это связано с устаревшей технической базой установок и низким уровнем текущего финансирования работ, связанных с термоядерными исследованиями. Тем не менее, можно отметить и ряд весьма значимых исследований, проведенных за последний год на российских установках. К ним относятся работы на токамаке Глобус-М2 и на открытых ловушках ИЯФ СО РАН. Российские ученые, работающие в области магнитного удержания высокотемпературной плазмы, возлагают большие надежды на новый российский токамак Т-15МД. Участники конференции, работавшие в секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы», отмечали, что с 2021 года началось некоторое увеличение финансирования термоядерных исследований, включая строительство новых экспериментальных и технологических установок, которое может быть реализовано в ходе выполнения Комплексной программы Российской Федерации «Развития техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии на период до 2024 года», в состав которой входит важная для работ по УТС подпрограмма «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий».

По тематике секции «Инерциальный термоядерный синтез» (председатель секции Г. А. Вергунова) на конференции было представлено 23 доклада (7 устных и 16 стендовых). Можно перечислить несколько основных направлений исследований по инерциальному термоядерному синтезу (ИТС). К ним относятся лазерный термоядерный синтез (ЛТС), мощные сильноточные короткоимпульсные разряды, физика высоких плотностей энергии в плазме, Z-пинчи, физические процессы в системах типа плазменный фокус, численное моделирование в указанных областях, а также смежные проблемы, на которых сосредоточены усилия российских научных коллективов, задействованных в данной сфере.

На заседаниях секции было представлено несколько докладов, посвященных экспериментальным исследованиям на мощных электроразрядных установках. Прежде всего, следует отметить результаты, полученные коллективом ТРИНИТИ на установке «Ангара-5-1». На этой установке при имплозии вольфрамовых многопроволочных сборок образуется Z-пинч, который является источником импульса мягкого рентгеновского излучения (МРИ) мощностью до 10 ТВт с длительностью около 8 нс. Это обеспечивает плотность мощности до 1 ТВт/см^2 и плотность энергии до 10 кДж/см^2 на поверхности мишени, которая состояла из майларовой пленки толщиной 0,6 мкм с напыленным слоем гадолиния толщиной от 40 до 80 нм. На этой установке продолжают работы по дальнейшему увеличению мощности получаемого импульса МРИ. Экспериментально показана возможность повышения в 3 раза пиковой мощности импульса МРИ (в диапазоне энергий квантов более 100 эВ), возникающего при имплозии вложенных волоконно-вольфрамовых сборок по сравнению с одиночной вольфрамовой сборкой той же массы при одном и том же уровне разрядного тока. При этом было обнаружено, что происходит существенное увеличение спектральной плотности мощности излучения Z-пинча в диапазоне длин волн 20–40 Å вблизи максимума импульса МРИ.

На установке «Ангара-5-1» проведены эксперименты по измерению спектральной прозрачности высокотемпературной плазмы гадолиния (Gd), созданной облучением при имплозии вольфрамовых многопроволочных сборок. В эксперименте было получено, что коэффициент пропускания плазмы мишени Gd+майлар вблизи максимума импульса облучения многократно увеличивается по сравнению с коэффициентом пропускания «холодного» материала мишени в диапазоне длин волн 50–200 Å. Кроме того, в высокотемпературной плазме мишени наблюдается узкая полоса поглощения в области длин волн 65–70 Å.

На заседаниях секции обсуждалось теоретическое описание свойств Z-пинчей (МГТУ им. Н. Э. Баумана). Отмечалось, что экспериментально наблюдаемые свойства Z-пинчей не могут быть исчерпывающе описаны в рам-

ках одной модели. Начальная стадия динамики плазмы хорошо описывается в рамках газодинамического подхода. Стадия сильного сжатия перетяжки Z-пинча корректно описывается кинетической моделью, позволяющей учитывать энергетическое распределение ионов. Анизотропия нейтронного излучения должна рассматриваться на основе динамики отдельных высокоэнергетичных частиц. Корректное объяснение спектра ускоренных ионов требует совместного использования кинетического описания, макроскопической динамики плазмы и электромагнитных полей. Но даже в этом случае ряд параметров модели требует уточнения, информация для которого может быть получена на основе моделирования траекторий отдельных частиц в нестационарном электромагнитном поле Z-пинча.

Был сделан обзор и дан теоретический анализ методов нагрева плазмы до термоядерных температур в Z-пинчах (НИЦ «Курчатовский институт»). Показано преимущество нагрева ионов плазмы методом сжатия плазмы магнитным полем разрядного тока по сравнению с методами нагрева ионным пучком в системах с магнитным удержанием или нагревом плазмы излучением в системах с инерционным удержанием.

В рамках двумерного осесимметричного МГД-моделирования изучалось развитие перетяжки Z-пинча с учетом коротковолновых малых возмущений, т. е. с учетом развития двумерной турбулентности (РФЯЦ-ВНИИЭФ). Расчеты показали, что из-за развития турбулентности не происходит формирования перетяжки с неограниченно уменьшающимся радиусом и вытеканием плазмы из зоны сжатия. Вместо этого происходит перемешивание и закрытие струями плазмы зоны сжатия. В итоге, давление, плотность и магнитное поле в зоне сжатия не растут неограниченно по мере сжатия, а стабилизируются. Из-за отсутствия неограниченного сжатия в перетяжке Z-пинча, зажечь плазму в перетяжке затруднительно даже при мульти-мегаамперных электрических токах в разрядах.

Были представлены результаты исследования электрического взрыва плоских алюминиевых фольг толщиной 16 мкм с искусственным периодическим рельефом, созданных методом лазерного гравирования с целью

управления неустойчивостями (ФИАН). Эксперименты показали, что предварительная лазерная гравировка поверхности фольги в виде канавок (ширина 50 мкм с шагом 50 и 100 мкм) в направлении, параллельном току и перпендикулярном ее собственной структуре, приводит к заметному сглаживанию неоднородностей.

Было проведено лабораторное моделирование джетов молодых звезд на установке плазменный фокус ПФ-3 в НИЦ «Курчатовский институт». Результаты моделирования показывают, что различие в пространственной структуре плазменных выбросов при разряде в газах разного химического состава (неон, гелий и гелий с примесью неона) могут быть связаны с различием эффективности охлаждения исследуемых газов, как в самом плазменном выбросе, так и в ударной волне, возникающей при его движении через фоновый газ. Возможно, что основной причиной появления неоднородностей в плазменном сгустке, как и в случае объектов Хербига-Аро, являются различного рода неустойчивости, которые развиваются при наличии эффективного радиационного охлаждения. В случаях с несколькими потоками в составе одного выброса столкновение ударных волн, порождаемых каждым из сгустков, приводит к возникновению уплотнений, что также способствует формированию кружевной структуры плазменного выброса.

В докладах, представленных авторами из ФИАН, обсуждались перспективы использования увеличения давления за фронтом ударной волны в пористом веществе по сравнению с давлением за фронтом ударной волны в однородном веществе эквивалентной сверхкритической плотности. Обсуждается перспективность применения этого эффекта в мишенях ЛТС для сглаживания неоднородностей, а также в качестве абляторов для усиления сжатия.

Ряд докладов был посвящен физике и технологии изготовления и транспортировки мишеней ЛТС (ФИАН). Рассказывалось о разработке технологии получения малоплотных полимерных мишеней, о методах изучения их пористой структуры и об исследовании свойств при их лазерном облучении. Изготавливаются мишени с упрочняемыми слоями из

металлосодержащих наноматериалов, которые более стойки при перемещениях и при откачке вакуумной камеры лазерной установки. Проводилось моделирование основных стадий реализации метода работы со свободной мишенью (FST): разгерметизации мишенного контейнера (МК) и формирования твердого топливного слоя внутри бесподвесных оболочек, свободно движущихся в спиральном канале формирования. Результаты моделирования позволили определить ряд параметров, критически важных для работы метода FST: температуру, при которой обратная диффузия газа из оболочки пренебрежимо мала для исследуемого класса полимеров; температуру разгерметизации, при которой возможно удаление топлива из МК без разрушения оболочек внутренним давлением.

Исследование спектров мягкого рентгеновского излучения лазерной плазмы различных материалов в широком спектральном диапазоне (5–100 Å) проводились совместно ФИАН и ИОФ РАН на лазерной установке «Камертон-Т». Анализ полученных экспериментальных данных показал, что для использования лазерной плазмы в качестве источника излучения в спектральной области «водяного окна» (23–44 Å) для применений в области биологии и медицины лучше всего подходят мишени из вольфрама, тантала или титана. Для реконструкции изображения плазмы в мягком рентгеновском диапазоне впервые была использована кодирующая апертура.

В ФИАН был предложен новый способ получения коротких (30 фс) вспышек термоядерных нейтронов на уровне 10^{15} за выстрел и метод создания сверхъяркого источника термоядерных DD-нейтронов с ожидаемым пиковым потоком плотностью около 10^{18} 1/(см²с) на проектируемой установке XCELS. Такая схема осуществима при умеренно релятивистской интенсивности лазера масштаба 10^{18} Вт/см², который фокусируется в достаточно большой объем микрокластерной среды; в этом случае диаметр фокусного пятна должен быть порядка 500 мкм.

Несколько докладов участников конференции были посвящены развитию экспериментальных и вычислительных методик, а также общетеоретическим проблемам, связанным с тематикой секции.

В целом, работа секции «Инерциальный термоядерный синтез» была успешной и прошла на высоком научном уровне. Представленные доклады относились к поисковым направлениям, связанным с исследованиями процессов в мощных короткоимпульсных электроразрядных установках и в установках лазерного термоядерного синтеза.

На конференции в рамках работы секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» (председатель секции Ю. А. Лебедев) был представлен 51 доклад, 26 из которых были устными. Заседания проводились в смешанном очно-заочном режиме. Число участников секции значительно превышало таковое в 2022 году. При этом большинство участников лично присутствовали на заседаниях и доложили свои результаты.

На секции традиционно были представлены результаты исследований в следующих основных направлениях: элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы различных типов электрических разрядов (ВЧ, СВЧ-разряды, ЭЦР-разряды, разряды постоянного тока, дуги, разряды в жидкостях), различные применения низкотемпературной плазмы, исследование плазмы, возникающей в импульсных процессах, физика атмосферных процессов, а также промышленные и биомедицинские приложения низкотемпературной плазмы. Ряд докладов был связан с прикладными аспектами низкотемпературной плазмы.

Все доклады можно разделить на две большие группы. Первая группа докладов связана с экспериментальными исследованиями разрядов, включая разработку новых и усовершенствование старых методов диагностики плазмы. Вторая группа докладов связана с моделированием процессов в плазме и моделированием плазменных систем.

Так, в НИЦ «Курчатовский институт» проводятся исследования, направленные на создание отечественного безэлектродного плазменного ракетного двигателя (БПРД). Одна из ключевых задач заключается в исследовании физических процессов, протекающих в магнитном сопле БПРД. В докладе сообщалось, что разработан диагностический ком-

плекс для исследования плазменных процессов в магнитном сопле. Приведены результаты разработки и тестирования тензорезистивного датчика для измерения тяги мощных электроразрядных двигателей. Приводятся первые результаты, полученные на установке для изучения взаимодействия плазмы с материалами на основе ВЧ-источника геликонного типа.

В ИОФ РАН проводятся лабораторные исследования, которые позволят понять физику высокоскоростных потоков плазмы, которые регистрируются и исследуются в магнитосфере Земли с помощью искусственных спутников. Сопоставление изменений структуры магнитных полей, токов и электродинамических сил в токовых слоях, с одной стороны, и динамики потоков плазмы, с другой стороны, позволило установить, что существенную роль в ограничении длительности потоков играет возбуждение токов обратного направления у боковых концов токового слоя.

Проведены эксперименты и численное моделирование структуры СВЧ-разряда, поддерживаемого стоячей поверхностной волной. Исследования направлены на изучение возможностей использования таких систем в качестве плазменных антенн.

Ряд интересных результатов был представлен сотрудниками ИПФ РАН. В частности, была рассмотрена задача формирования интенсивных качественных пучков легких ионов, которая является актуальной на текущий момент. В основном, такие пучки применяются для инъекции ионов в ускорители. Разрабатываются системы, способные извлекать пучки ионов с плотностью тока порядка 1 А/см^2 , и исследуются режимы их работы при различных внешних условиях: давление напускаемого газа, мощность СВЧ-излучения для создания плазмы и нагрева ионов, геометрия экстрактора. Более детально были рассмотрены некоторые аспекты, затронутые в пленарном докладе авторов из ИПФ РАН, посвященном сильноточным ЭЦР источникам протонов для линейных ускорителей, построенных с использованием гиротронов. В частности были описаны эксперименты, в которых были получены непрерывные и импульсные протонные и дейтронные пучки с током до

100–500 мА и RMS нормализованным эмиттансом на уровне $0,2 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

В одном из докладов приводились результаты исследования зависимости параметров плазмы в ЭЦР-разряде с мощным нагревом плазмы гиротроном от давления нейтрального газа (водород и гелий) и мощности СВЧ-излучения в широком диапазоне их значений. Знание этих зависимостей полезно для настройки источника ЭЦР на желаемый режим работы.

В докладе из ИНХС РАН и НИЯУ МИФИ сообщалось о результатах экспериментов по получению водорода в СВЧ-разряде в растворах этанола при атмосферном давлении. Этот тип разряда наименее исследован, и в России такие работы ведутся только в ИНХС РАН. Исследовались как физические, так и химические характеристики разряда и показано, что по эффективности получения водорода разряд соответствует лучшим результатам среди известных из научной литературы.

В ИСЭ СО РАН проводятся лабораторные эксперименты, направленные на изучение плазмы атмосферных разрядов на высотах 20–100 км над уровнем моря. Эти разряды были названы транзиентными световыми явлениями, к которым относят красные спрайты, голубые струи, эльфы и гало. Проведённые исследования показали, что при давлениях воздуха и азота в диапазоне 0,01–3 Торр, создавая плазму с помощью импульсно-периодического барьерного разряда с различными конструкциями электродов, можно формировать плазменные диффузные струи – цилиндрические стримеры с формой близкой к форме спрайтов «столбчатого» типа.

В СПбГУ в течение многих лет проводится изучение явлений, наблюдающихся в пылевой плазме, в частности, изучается вращение плазменно-пылевых структур в магнитном поле. Установлено, что в магнитном поле свыше 0,1 Тл в неоне (произведение холловских параметров $\omega_e \tau_e \omega_i \tau_i = 1$) расположение частиц в структуре перестраивается. Радиальное межчастичное расстояние сокращается до 0,1 мм, а при дальнейшем увеличении магнитного поля оно не меняется. Эти изменения коррелируют с измерением диаметра структуры в магнитном поле. При этом в перпендику-

лярном магнитному полю сечении формируются круги вместо гексагонального расположения частиц.

Ряд докладов был представлен сотрудниками ОИВТ РАН. В одном из них рассмотрены возможности обобщения законов подобия для исследования фазовой диаграммы на случай систем, содержащих заряженные компоненты. Для решения задачи были использованы разработанные химические модели для ряда металлов.

В другой работе рассматривалась двухкомпонентная равновесная электронейтральная система, состоящая из классических макроионов конечных размеров с зарядом $Z \gg 1$ и точечных противоположно заряженных микроионов с единичным зарядом, в приближении Пуассона–Больцмана в средней сферически-симметричной ячейке Вигнера–Зейтца и в корреляционной полости. В работе рассчитана полная энергия взаимодействия всех частиц в системе.

В докладе из ИПМ им. М. В. Келдыша РАН был проведен анализ экспериментальных и расчетных потенциалов ионизации $I_N^{(Z)}$ (эВ) из основного состояния многозарядных ионов средних и тяжелых элементов от аргона ($Z = 18$) до америция ($Z = 95$). Эти данные, рассмотренные в специальных координатах, выявляют закономерности в зависимости от атомного номера элемента Z и числа электронов в ионе N . Обнаруженные закономерности позволяют аппроксимировать большое количество табличных значений простыми полиномами.

В организации КФУ разработана самосогласованная математическая модель, позволяющая рассчитывать основные характеристики струйного ВЧ-разряда и плазменной струи и определять параметры слоя положительного заряда. Плазма такого разряда при давлении $p = 13,3\text{--}133$ Па применяется для модификации поверхностей различных материалов, таких как сталь, титан, полиэтилен, кожа, мех.

В работе, представленной участниками из ИЯФ СО РАН и НГУ, на основе численной модели была исследована динамика зажигания разряда электронным пучком в установке ГДЛ (газодинамическая ловушка). Было рассчитано распространение тепла за счёт клас-

сической электронной теплопроводности в неоднородном магнитном поле, а также обработка плазмы тепловыми электронами за счёт ударной ионизации. Проведено сравнение результатов моделирования с данными интерферометрических и зондовых измерений.

В докладе авторов из ИЭЭ РАН и СПбГТУ была представлена экспериментальная установка плазмохимического синтеза карбида вольфрама, созданная на базе дугового плазмотрона переменного тока со сменными электродами (вольфрам, графит) в смеси водорода и метана. Установлено, что в магнитных пробках образуется порошок карбида вольфрама и графит, причем количество образующегося материала находится в прямой зависимости от времени нахождения прекурсора в высокотемпературной зоне плазмохимического реактора.

В целом, работа секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» была успешной, удобной оказалась и очно-заочная форма проведения конференции. Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований по физике низкотемпературной плазмы, проводимых в России, которые во многом являются пионерскими.

На секции «Физические основы плазменных и лучевых технологий» (председатель секции С. А. Двинин) были заслушаны 16 устных и 37 стендовых докладов. Обсуждались результаты исследований, проводимых в институтах РАН, вузах СНГ и других ведущих научных центрах России.

Были заслушаны доклады, относящиеся к широкому спектру различных направлений плазменных технологий: развитие технологий создания новых веществ в твердой или газовой фазах, модификация поверхности материалов, создание плазмы с помощью электронных и ионных пучков. Докладывались работы по разрядам в жидкостях, СВЧ-разрядам, плазменной аэродинамике и инициации горения, а также по плазменной медицине и воздействию плазмы на биологические объекты. Значительное число докладов было посвящено генерации СВЧ-волн в различных системах и прохождению излучения через вещество, а также ускорению электронов в электромагнитных полях. Несколько докладов были

посвящены созданию плазменных электроразрядных устройств для космических спутников, генерации нейтронов и ультрафиолетового излучения, а также диагностике плазмы. Примерно две трети докладов представляли результаты экспериментальных исследований.

В работах большого коллектива из ИЯФ СО РАН и НГУ был исследован процесс генерации терагерцового излучения сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) в замагниченной плазме. Основным механизмом генерации основан на возбуждении электронным пучком плазменных колебаний и последующей трансформации этих колебаний в поток электромагнитного излучения с частотой, соответствующей области верхне-гибридных плазменных частот. Получено излучение в диапазоне частот 0,15–0,8 ТГц при коллективной релаксации электронного пучка с параметрами 0,6 МэВ/15 кА/5 мкс в плазме плотностью $(3-5) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в соленоиде с многопробочным магнитным полем 4,8/3,6 Тл.

В ОИВТ РАН проведены исследования плазмохимического синтеза графена в объеме при пиролизе углеводородов в плазменных струях плазмотрона постоянного тока мощностью до 45 кВт. В смеси гелия с добавкой пропан-бутановой смеси был достигнут максимальный выход графена, содержащего водород. В смеси ацетилена и азота, формируется азотсодержащий графен при давлении 100 Торр. При введении метана в плазму аргона при давлении в реакторе 350 Торр на выходе наблюдалось образование малодефектных наноструктур с латеральным размером до 2000 нм.

В докладах из МГУ имени М. В. Ломоносова обсуждалось взаимодействие гидродинамических возмущений с гидродинамическими потоками, возмущенными газовыми разрядами. Были рассмотрены динамика свечения наносекундных разрядов в сверхзвуковых потоках воздуха с ударными волнами и остывание зоны разрядов, скользящих по поверхности диэлектрика. В совместных исследованиях МГУ имени М. В. Ломоносова и АО ВНИИЭМ были получены первые результаты по разработке модели электрической двигательной установки, использующей в качестве рабочего тела газы, составляющие остаточную атмосферу Земли. Модель состоит из устройства забора атмосферных газов и электрического

двигателя, способного создавать тягу, компенсирующую аэродинамическую силу трения. Для проведения расчетов была использована глобальная модель индуктивного ВЧ-двигателя, а также значения коэффициента трения на сверхнизких высотах. В докладе, представленном авторами из НИУ МЭИ и НИИЯФ МГУ, было проведено теоретическое описание процессов рассеяния легких ионов на основе данных по сечениям упругого и неупругого рассеяния, имеющих в литературе. Рассмотрено как отражение потоков легких ионов, так и прохождение их сквозь слои поликристаллических образцов. Авторы из ИСЭ РАН и Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники представили результаты экспериментальных исследований разрядной системы на основе планарного магнетронного разряда с дополнительной инжекцией электронов. Инжекция электронов осуществлялась с обратной стороны распыляемой мишени через центральное отверстие. Использование дополнительной инжекции электронов в катодной слой магнетронного разряда позволило в $2\div 3$ раза уменьшить нижнее предельное рабочее давление магнетронного разряда.

Авторы из АО ГНЦ «Центр Келдыша» представили расчетно-экспериментальную методику оценки параметров плазмы, созданной генератором электронного пучка с подачей газа в разрядный канал в смеси газов среднего давления. Показано, что в плазме, созданной электронным пучком в смеси газов среднего давления ключевую роль в рекомбинации играет диссоциативная рекомбинация частиц. В докладе авторов из НИУ «МЭИ» и НИЦ «Курчатовский институт» исследованы эмиссионные свойства модифицированной поверхности вольфрама с наноструктурой типа «пуч».

На конференции также обсуждалась проблема генерации СВЧ-излучения. Были представлены работы, посвященные вопросам корреляционного анализа шумовой генерации плазменных релятивистских микроволновых источников (ИОФ РАН) и экспериментальному исследованию плазменного релятивистского СВЧ-усилителя с полосой усиления около 1,5 ГГц с максимальным значением коэффициента усиления на частоте около 3 ГГц (ИОФ

РАН, НИЦ Курчатовский институт, МГУ имени М. В. Ломоносова). Широкая полоса усиления этой схемы усилителя ранее позволила продемонстрировать перестройку частоты усилителя от 2,4 до 3,1 ГГц. На электронном пучке с током 2 кА и энергией электронов 500 кэВ было получено СВЧ-излучение мощностью 100–150 МВт и длительностью импульса 300 нс.

В докладе большого коллектива авторов из ИММ РАН, НИИ перспективных материалов и технологий, ИПМ РАН и ФИАН была продемонстрирована возможность осаждения тонких пленок тугоплавких металлов на стекла через диафрагмы на установке плазменный фокус.

В ИПФ РАН было проведено трехмерное моделирование проницаемости релятивистски неплотной плазмы для экстремально интенсивных лазерных импульсов. Моделирование проводилось методом частиц в ячейках, которое продемонстрировало аномально высокое поглощение лазерного поля для интенсивности излучения выше 3×10^{24} Вт·см⁻² для длины волны 1 мкм. Согласно расчетам, поглощение связано с излучением гамма-квантов и последующим образованием электрон-позитронных пар в сильном поле. Доклад авторов из НИУ МЭИ и Германского центра авиации и космонавтики был посвящен развитию количественной методики расчета профилей изотопов водорода в бериллии и углероде на основе расшифровки спектров электронов, отраженных упруго и неупруго. В НИЦ «Курчатовский институт» была рассмотрена возможность определения тяги двигателя БПРД-100 по локально измеренным параметрам плазменной струи, вытекающей из него, таким как энергия ионов и плотность ионного тока, для измерения которых был разработан соответствующий диагностический комплекс. Разница между значениями тяги, полученными с помощью тягоизмерительного устройства и рассчитанными на основе измеренных параметров плазменной струи, находится в пределах ± 10 %.

Доклады, представленные КФУ, КНИТУ и ООО «Плазма-ВСТ», были посвящены математическому моделированию ВЧ-плазменной модификации сверхвысокомолекулярного полиэтилена и применению струйного ВЧЕ-

разряда для создания композиционного материала с применением волокнистых материалов. Целью последнего исследования являлось повышение смачиваемости волокнистого материала путем модификации поверхности в плазменной струе ВЧЕ-разряда. Также исследовалась ВЧ-плазменная модификация стекловолокна.

Моделированию газовых разрядов были посвящены три доклада. В первом (МГУ имени М. В. Ломоносова, РУДН, ФНЦ ЦНИИСИ РАН) моделировались электродинамические характеристики ЭЦР-разряда в плазмотроне. Во втором была построена глобальная модель СВЧ-разряда с большой площадью электродов, на основе которой рассмотрены два механизма нарушения симметрии в разряде, связанные с изменением толщины слоев пространственного заряда у электродов и возбуждением поверхностной волны с азимутальным номером m . Третий доклад (ИПМ РАН) был посвящен моделированию капиллярного разряда в частотном режиме работы. Большой коллектив авторов из НИЦ «Курчатовский институт», НИУ МЭИ, НИУ МФТИ, и РУДН представил результаты исследования особенностей распространения ударной волны, создаваемой сильноточным электронным пучком в твердотельной мишени на границе раздела сред. ФИАН и ИММ РАН представили доклады, посвященные исследованию особенностей морфологии расплава на поверхности металла при воздействии плазмы на установке плазменный фокус. В НИЯУ МИФИ была разработана методика прогнозирования нейтронных характеристик малогабаритных ускорительных трубок нового поколения по данным экспериментов с пробными дейтериевыми мишенями. По данной методике осуществлялась успешная интерпретация результатов экспериментов с ионными диодами. Доклад авторов из НИИ механики МГУ был посвящен исследованию протяжённых сильноточных электрических дуг атмосферного давления на установке П-2000. В ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» было теоретически исследовано растекание тока в тонких фольгах или плоских токовых слоях в качестве приложения к задачам переброса тока с помощью электровзрывных размыкателей.

Плазменной медицине был посвящен доклад авторов из ИОФ РАН, РУДН и РНИМУ

им. Н. И. Пирогова. В нем было исследовано применение холодной плазмы атмосферного давления при лечении онкологических заболеваний.

Два доклада авторов из МГУ имени М. В. Ломоносова были посвящены изучению воздействия коронного разряда на поверхность зараженного грибами зерна озимой пшеницы и образованию плазмоидов при воздействии капиллярного разряда на металлы.

В ИОФ РАН работы в области плазменных технологий ведутся по многим направлениям. Были проведены оптические измерения в экспериментах по синтезу микро и наночастиц с контролируемым составом и структурой в плазме микроволнового разряда. Разряды инициировались импульсами излучения мощного гиротрона в тонких слоях порошковых смесей со свободной верхней поверхностью. Использовалось излучение гиротрона с длиной волны 4 мм, длительностью импульса от 1 до 8 мс при мощности 100–500 кВт. Авторами из ИОФ РАН и РУДН исследовалось влияние подаваемого газа (воздух, Ar) на образование активных форм кислорода и азота в водных растворах с помощью многоискрового кольцевого разряда с инъекцией газа в разрядных промежутках. Проводились исследования наработки долгоживущих кислород- и азот-содержащих реактивных частиц (NO_3^- , NO_2^- , H_2O_2 , HONO) в дистиллированной воде при ее обработке прямым (без диэлектрического барьера) пьезо-разрядом. Исследовались также инициация и развитие микроволнового разряда, возникающего при прохождении миллисекундного СВЧ-импульса гиротрона по поверхности кварцевой подложки с внедренными в нее микрочастицами металла. Были приведены результаты микроволновых измерений поглощения СВЧ-излучения в этом процессе, оценены скорости движения фронта разряда вдоль поверхности пластины, и получена зависимость температуры подложки от длительности СВЧ-импульса. Также были приведены результаты спектрального анализа – вращательные и колебательные температуры молекул. Кроме того, были представлены результаты измерений излучательных характеристик микроволновых безэлектродных аргон-ртутных ламп низкого давления в диапазоне 10^{-2} –2 Торр.

Работа секции в целом показала, что в области плазменных и пучковых технологий ведется активная исследовательская работа, причем число работ, имеющих технологическую направленность, растет. На секции были представлены доклады по большинству направлений развития современных технологий. Все доклады были выполнены на высоком уровне и вызвали интерес слушателей. По сравнению с конференциями, которые проходили несколько лет назад, увеличилось общее число докладов и пропорционально увеличилось число докладов, представляющих результаты экспериментов. Заметна активность по модернизации больших экспериментальных установок и появлению новых диагностик. Исследователи стремятся к увеличению эффективности исследований. Анализ докладов показывает, что экспериментальные установки становятся сложнее, увеличивается их размер.

На секцию «Проект ITER. Шаг в энергетику будущего» (председатель секции А. В. Красильников) в этом году было представлено 62 доклада. Доклады были посвящены состоянию работ по созданию систем ITER, разрабатываемых и изготавливаемых в России, и связанным с этим задачам.

Большое число работ были посвящены инженерным разработкам, выполняемым в НИИЭФА им. Д. В. Ефремова. Там ведутся работы по нескольким направлениям.

Несколько докладов были посвящены разработке и изготовлению оборудования системы электропитания для проекта ITER. Доклады были как о текущем состоянии работ в целом, так об отдельных компонентах оборудования: о гибридном коммутационном аппарате, защитном размыкателе, сильноточном высоковольтном предохранителе, системе управления коммутационной аппаратурой.

В НИИЭФА ведутся работы по разработке, изготовлению прототипов и испытаниям центральной сборки дивертора. К настоящему времени компоненты центральной сборки дивертора успешно прошли испытания на нагрузку высокими тепловыми потоками, а прототип сборки успешно прошел гидравлические испытания на расход воды и давление, а также испытание на утечку горячего гелия.

В НИИЭФА ведутся также проектные и экспериментальные работы по первой стенке токамака ITER. Доклады были посвящены изготовлению макетов первой стенки, особенностям пайки бериллиевой облицовки на первую стенку, ультразвуковому контролю качества сварных и паяных соединений конструкции первой стенки.

В ИЯФ СО РАН уже много лет ведется проектная работа и подготовка к изготовлению оборудования диагностических портов ITER, включая портовые заглушки (порт-плаги). Работы включают проектирование и интеграцию экваториального диагностического порта № 11 и верхних диагностических портов №№ 02, 07, 08. За прошедший год был успешно завершён финальный проект интеграции экваториального порта № 11 и начата подготовка к его изготовлению. В докладах обсуждалась подготовка производственных мощностей ИЯФ СО РАН к изготовлению и сборке оборудования для размещения диагностических систем в соответствии с правилами и требованиями французского кода RCC-MR 2007. В частности, идёт процесс квалификации специальных производственных технологий, используемых в процессе изготовления вакуумных изделий для ITER, классифицируемых как часть объекта ядерной энергетики.

ИЯФ СО РАН также является разработчиком и изготовителем части диагностических систем: вертикальная нейтронная камера (верхняя и нижняя), диверторный монитор нейтронного потока, анализатор атомов перезарядки (внутривакуумная часть). Были представлены доклады по изготовлению макета детекторного узла вертикальной нейтронной камеры и изготовлению коллиматора для анализатора атомов перезарядки.

В ИЯФ СО РАН разрабатывается атомарный инжектор мегаэлектронвольтового диапазона энергий для нагрева плазмы, основанный на ускорении и нейтрализации пучка отрицательных ионов водорода. Для получения пучка используется высокочастотный поверхностно-плазменный источник. Был представлен доклад по анализу и сравнению ВЧ-драйверов с различными защитными экранами и ВЧ-антеннами в мультисекундных импульсах.

В ФТИ РАН в настоящее время идет разработка диагностики плазмы по потокам атомов перезарядки. Этот метод обеспечивает

возможность изучения, как ионной функции распределения, так и соотношения концентраций изотопов водорода. На конференции был представлен доклад, посвященный проектированию системы управления и сбора данных для этой диагностики.

В ФТИ РАН также ведутся работы по созданию диагностики Томсоновского рассеяния в диверторе токамака-реактора. Были представлены доклад о статусе разработки системы, а также доклады о разработке зеркал для диагностики и о моделировании осаждения примесей на оптические элементы и моделировании высокочастотного разряда для чистки зеркал.

НИЦ «Курчатовский Институт» представил доклад о разработке и изготовлении первого зеркала для диагностики плазмы ITER посредством спектроскопии водородных линий. В другом докладе был предложен способ быстрого расчёта синтетических изображений для видеокамер ITER, оснащённых оптическими фильтрами в видимом диапазоне длин волн. Такой расчет необходим для разработки и моделирования работы диагностики по водородным линиям.

В ГНЦ РФ ТРИНИТИ проводятся экспериментальные работы по исследованию модификации поверхности вольфрама и захвата дейтерия в нем после воздействия импульсными потоками плазмы. Облучение образцов материалов импульсными потоками плазмы производилось на квазистационарном сильноточном плазменном ускорителе КСПУ-Т. Выбранные экспериментальные параметры отражали условия ELM-событий, ожидаемых в ITER. В докладе были представлены результаты экспериментов.

ФИАН и НИЯУ МИФИ представили ряд докладов, посвященных исследованиям вакуумной дуги и модификации рельефа поверхности под воздействием плазменных потоков. Явление наноструктурирования поверхностных слоев проявляется в качестве нового свойства взаимодействия плазмы с поверхностью и приводит к более легкому инициированию самостоятельных электрических разрядов на первой стенке термоядерных установок.

В российском Проектном центре ИТЭР проводятся работы по разработке следующих

диагностических систем ITER: диверторный монитор нейтронного потока, вертикальная нейтронная камера и активная спектроскопия. Были заслушаны доклады, представляющие результаты по моделированию измерений термоядерной мощности токамака ITER с помощью нейтронных диагностик, созданию имитатора сигналов камеры деления для диверторного монитора нейтронного потока, созданию системы управления и сбора данных вертикальной нейтронной камеры, разработке диагностики активная спектроскопия, влиянию допусков коллиматорных каналов на работу вертикальной нейтронной камеры, моделированию измерений активной спектроскопической диагностики и разработке диагностической аппаратуры для активной спектроскопии.

В Проектном центре ИТЭР развивается аппаратно-инфраструктурная платформа информационно-коммуникационного пространства (АИП ИКП) как инструмент интеграции исследований в области УТС. Эта платформа обеспечивает для исследователей возможность участия в дистанционных экспериментах в области УТС исследований: получение и отображение научной информации, в том числе экспериментальных данных, тематических публикаций, справочной информации, проведение дистанционных совместных исследований и предоставление иных научных и телекоммуникационных сервисов для участников отечественного УТС сообщества. В докладе были продемонстрированы возможности развития АИП ИКП как инструмента интеграции отечественных и мировых УТС исследований с учётом стандартов и подходов, принятых в мировой практике, в том числе в международной Организации ITER.

Одной из составляющих АИП ИКП является российский центр удаленного участия в экспериментах на установке ITER, созданный в Проектном центре ИТЭР. На его основе проводились совместные с Международной Организацией ITER работы по отработке технологий и принципов дистанционного участия в эксперименте для других участников проекта, в том числе проведены исследование протоколов, методов и каналов передачи данных через существующие общедоступные сети с целью выработки стратегии подключения к

системе сбора данных ITER и тестирование различных интерфейсов удаленного доступа к данным ITER. Благодаря этой работе Российская Федерация стала одной из первых стран участниц проекта ITER, обеспечивших прямое подключение к технологическим данным площадки ITER.

Работа секции была успешной. Она показала существенный прогресс в научно-исследовательских и конструкторских работах в поддержку проекта ITER в рамках ответственности по поставкам Российской Федерации.

Заключение

1. I Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в России и странах СНГ. Она проходила уже в 50-й раз и собрала на свои заседания более 900 участников из научных центров России и других стран. Число российских (69) организаций, представивших доклады на конференцию, заметно возросло по сравнению с прошлым годом.

2. Конференция способствовала решению научных проблем по направлениям: магнитное удержание высокотемпературной плазмы, инерциальный термоядерный синтез, физические процессы в низкотемпературной плазме, физические основы плазменных и лучевых технологий, реализация международного проекта ITER. Ежегодно происходящий обмен информацией и опытом между учеными России и стран ближнего зарубежья способствует установлению и поддержанию научных контактов между научными центрами, занимающимися близкими проблемами. Это подтверждается работами, совместно выполненными сотрудниками российских и зарубежных научных центров.

3. В России в рамках комплексной программы «Развития техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии на период до 2024 года», постепенно формируется национальная программа по управляемому термоядерному син-

тезу, в планах которой предусмотрено развитие исследований на нескольких достаточно крупных установках УТС с ожидаемыми параметрами плазмы, близкими к условиям термоядерного реактора. Важным разделом национальной программы должно стать создание нескольких средних плазменных установок в университетах и исследовательских институтах для начального обучения студентов и подготовки аспирантов для работы с высокотемпературной плазмой. Это будет способствовать сокращению отставания российских научных центров, выполняющих исследования по управляемому термоядерному синтезу и термоядерным технологиям от исследований, ведущихся в технологически лидирующих странах. Необходимо также, чтобы последовали следующие шаги, которые в совокупности сформируют широкую национальную программу исследований по фундаментальным и прикладным направлениям физики плазмы. Важно иметь в виду, что в результате реализации программы международного проекта ITER, разработанные новые технологии должны быть освоены российскими учеными и инженерами для их успешного применения в разработках российских промышленных термоядерных реакторов, что невозможно в отсутствие национальной программы по физике плазмы и УТС.

4. Современный мировой уровень лазерно-плазменных исследований требует создания в крупных научных центрах России, по крайней мере, двух конкурирующих мультитераваттных лазерных систем, направленных на решение проблемы ЛТС и смежных задач. Также целесообразно создать сеть из нескольких лазерных установок с меньшей мощностью, на которых было бы возможно проверять новые идеи и экспериментальные схемы, а также проводить отработку новых диагностик. Так эффективно работают научные программы технологически развитых стран Японии, Китая, США и Европейского союза. В России принятых к реализации долгосрочных планов строительства таких лазерных установок нет, и это ведет к дальнейшему отставанию наших научных исследований по ЛТС от уже достигнутого мирового уровня.

5. За последний год снизилось на порядок число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными совмест-

но с учеными ведущих зарубежных научных центров. Сократилось в несколько раз число российских участников международных научных конференций, что негативно повлияет на работы по российским национальным программам и проектам. Оргкомитету не удалось пригласить ведущих мировых ученых для представления обзорных докладов на конференции, что связано в известными политическими событиями 2022–2023 гг.

6. Доля представленных на конференции работ, связанных с научными задачами управляемого термоядерного синтеза на основе магнитного удержания плазмы, составила 29 %.

7. Наибольшая доля (39 %) представленных на конференции работ, посвящены фундаментальным и прикладным исследованиям в области физики плазмы. Эта доля немного увеличилась в сравнении с прошлым годом, растет интерес к этим исследованиям среди научной молодежи. Это обусловлено сравнительно небольшими затратами для организации такого рода исследований, которые могут быть компенсированы при получении небольших грантов из российских фондов, а также более быстрым получением результатов при активном участии молодых ученых в работе на малых и средних установках.

8. Доля работ, выполненных по реализации диагностических комплексов и систем для международного проекта ITER в рамках ответственности России, увеличилось в 2 раза и составила 23 % от общего числа представленных на конференции докладов.

9. Доля докладов, посвященных проблемам ИТС, включая лазерный термоядерный синтез, немного снизилась по сравнению с 2022 годом и составила 9 %.

Оргкомитетом конференции издана книга «L Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу». Сборник тезисов докладов. М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. 346 с. ISBN 978-5-6042115-8-8. Материалы конференции также размещены на сайте конференции

http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/L/Zven_L.html.

ЛИТЕРАТУРА

1. «L Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» 20–24 марта 2023 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. – М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. – 346 с. ISBN 978-5-6042115-8-8.

2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/L/Zven_L.html

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

Development of research in the field of plasma physics and controlled fusion in Russia in 2022

(Review of reports of the L International Zvenigorod conference, 2023)

I. A. Grishina¹ and V. A. Ivanov^{1, 2}

¹ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov st., Moscow, 199911, Russia
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

² National Research Nuclear University “MEPHI”
37 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

Received 19.05.2023; accepted 25.05.2023

The review is given on the most interesting new results presented at the L International Zvenigorod conference on plasma physics and controlled fusion which took place in

Zvenigorod, Moscow region on March 20–24, 2023. The basic achievements are analyzed in the field of plasma physics in Russia and compared with the results of foreign scientific research.

Keywords: plasma physics, nuclear fusion, plasma and beam technologies, international project ITER, conference, results.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-3-189-212

REFERENCES

1. Proceedings of the L International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Zvenigorod, Russia. March 20–24, 2023. ISBN 978-5-6042115-8-8 (Published by PLAZMAIOFAN Co Ltd., 2023) [in Russian].
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/L/Zven_L.html.