

УДК 533.9
EDN: TRYHJL

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b



**Состояние и перспективы развития исследований
по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу в России
(по итогам LI Международной (Звенигородской) конференции
по физике плазмы и УТС, март 2024 г.)**

И. А. Гришина, В. А. Иванов

Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на LI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся с 18 по 22 марта 2024 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, плазменные и лучевые технологии, международный проект ITER, конференция, результаты.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-3-233-257

Введение

LI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигород Московской области с 18 по 22 марта 2024 года. На конференции было представлено 256 научных докладов из 58 российских и 6 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее количество авторов докладов составило 1245 человек.

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

E-mail: grishina@fpl.gpi.ru

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 19.04.2024

Принята к публикации 25.05.2024

© Гришина И. А., Иванов В. А., 2024

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

1. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия – 73

2. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия – 33

3. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия – 31

4. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия – 28

5. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия – 23

6. ФИЦ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия – 21

7. Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия – 20

8. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия – 19

9. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Московская обл., Россия – 18

10. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия – 17
11. Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия – 16
12. Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия – 14
13. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Москва, округ Троицк, Россия – 14
14. ФИЦ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия – 14
15. Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия – 11
16. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия – 11
17. ФИЦ Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия – 9
18. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия – 6
19. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия – 5
20. Российский университет дружбы народов, Москва, Россия – 5
21. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия – 5
22. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия – 4
23. Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия – 3
24. Координационный центр «Управляемый Термоядерный Синтез – Международные Проекты», Москва, Россия – 3
25. АО Спектрал-Тех, Санкт-Петербург, Россия – 3
26. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежала, Москва, Россия – 3
27. Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН, Москва, Россия – 3
28. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ технической физики им. академика Е. И. Забабахина, г. Снежинск, Россия – 2
29. Центр фундаментальных и прикладных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, ГК «Росатом», Москва, Россия – 2
30. НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва Россия – 2
31. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия – 2
32. Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия – 2
33. Российский технологический университет МИРЭА, Москва, Россия – 2
34. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия – 1
35. Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия – 1
36. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия – 1
37. Санкт-Петербургский государственный технологический институт, Санкт-Петербург, Россия – 1
38. Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Гатчина, Ленинградская обл., Россия – 1
39. Нижнетагильский технологический институт, филиал Уральского федерального университета им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Нижний Тагил, Россия – 1
40. Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия – 1
41. ООО Иоффе Фьюжн Текноложи, Санкт-Петербург, Россия – 1
42. Институт механики МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия – 1
43. Институт динамики геосфер им. академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия – 1
44. АО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения», г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., Россия – 1
45. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия – 1

46. ООО «Электровакuumные технологии», Москва, Россия – 1

47. ООО Вириал, Санкт-Петербург, Россия – 1

48. ЗАО Научно-производственное предприятие «ГИКОМ» (Гиротронные комплексы), г. Нижний Новгород, Россия – 1

49. Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия – 1

50. Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия – 1

51. АО «Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыткарино Московской обл., Россия – 1

52. ООО «Лазеры и оптические системы», Санкт-Петербург, Россия – 1

53. Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия – 1

54. АО «Средне-Невский судостроительный завод», Санкт-Петербург, Россия – 1

55. Федеральный центр двойных технологий «Союз», г. Дзержинский, Московская обл., Россия – 1

56. ООО «Сибирские технологии защитных покрытий», г. Новосибирск, Россия – 1

57. Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН, Москва, Россия – 1

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

2. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada – 1

3. The Cooper Union for the Advancement of Science and Art, New York, USA – 1

4. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui, China – 1

5. Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь – 1

6. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь – 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 ИТЭР: шаг в энергетику будущего.

На конференции состоялось четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 17 обзорных докладов о результатах отечественных и мировых исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям, и по международному проекту ИТЭР (ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor). Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 92 устных 164 стендовых доклада. Были также представлены доклады по смежным с физикой плазмы научно-техническим проблемам. В этом году конференция состоялась в пятьдесят первый раз.

На открытии конференции выступил президент НИЦ «Курчатовский институт» М. В. Ковальчук с обзорным докладом, освещавшим основные направления деятельности подразделений Курчатовского института. Упомянулось об экспериментах на ускорительном комплексе У-70 по поиску гипотетической элементарной частицы «аксион». Нейтринные исследования, проводимые в институте, позволили, помимо фундаментальных исследований свойств нейтрино, перейти к созданию новых технологий для создания систем дистанционного контроля ядерных реакторов. НИЦ «Курчатовский институт» осуществляет научное руководство энергоблоками атомных электростанций, расположенных в нашей стране и за рубежом. Рассказывалось о создании атомного ледокольного флота России, научное руководство которым осуществлял А. П. Александров. В институте также ведутся работы по созданию учебно-тренировочных средств ВМФ на основе технологии «цифровой двойник». В подразделениях НИЦ «Курчатовский институт» также ведутся работы по проектированию обитаемых подводных ап-

паратов, которые могут работать на глубинах до 2250 м, а также строительство обитаемых подводных аппаратов. налажено мелкосерийное производство сверхбольших интегральных схем, и создается производство дискретных транзисторов и монолитных интегральных схем. Ведутся работы по созданию термоядерного источника нейтронов, который ляжет в основу концепции ядерной энергетики с замкнутым топливным циклом. Энергетический пуск токамака T15-МД явился важным шагом в этом направлении. Начато строительство инновационного реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем и смешанным нитридным уран-плутониевым топливом. В Центре также ведутся работы по созданию безэлектродного плазменного ракетного двигателя. Создается научно-образовательный центр ядерной медицины, включающий в себя различные комплексы лучевой терапии, созданные на базе отечественного оборудования. В биологическом подразделении Курчатовского института проводятся работы по радиобиологии, генетике и селекции промышленных микроорганизмов, а также расшифровке полного генома человека и созданию национальной базы генетической информации.

Обзор результатов исследований по нагреву и термоизоляции плазмы в условиях инъекции высокоэнергетичных атомных пучков в плазму сферического токамака Глобус-М2 был представлен Г. С. Курскиевым (ФТИ им. А. Ф. Иоффе). Ввод в эксплуатацию второго инжектора на токамаке Глобус-М2 и нового комплекса диагностики томсоновского рассеяния лазерного излучения позволил существенно расширить область исследований по нагреву плазмы атомными пучками. При тороидальном магнитном поле 0,8–0,9 Тл и токе плазмы 0,35–0,4 МА при инъекции нейтральных частиц с энергией до 45 кэВ при мощности пучка 0,75 МВт получен двукратный по сравнению с омическим режимом нагрев электронов плазмы. Дополнительное включение второго пучка с энергией частиц до 30 кэВ мощностью 0,5 МВт позволило получить режим с горячими ионами в диапазоне значений средней плотности плазмы $(1,6\div 10)\times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. По данным активной спектроскопии и корпускулярной диагностики

температура ионов достигала величины 4 кэВ при плотности плазмы $8\times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в горячей зоне, превысив температуру электронов более чем в 2,5 раза. Эксперименты и проведенные расчеты показали, что скейлинги, полученные ранее на установках Глобус-М, MAST и NSTX и предполагающие сильную зависимость времени удержания энергии от магнитного поля и умеренную от тока плазмы ($\tau_E^{\text{GLB}} \sim I_p^{0,43} B_T^{1,19}$), выполняются для сферического токамака и в области более высоких значений магнитного поля B_T – до 0,8 Тл.

Большой интерес вызвал доклад Y. Kamada, который является заместителем генерального директора по науке и технологиям компании ITER Organization. Доклад был посвящен современному состоянию работ по сооружению токамака ITER и некоторым концептуальным изменениям плана работ. Состояние завершенности работ по сборке деталей конструкции токамака было оценено около 80 %. Однако в части элементов тепловой защиты была обнаружена механическая коррозия. Часть этих повреждений будет устранена на месте, а часть элементов будет изготовлена заново. При сборке элементов вакуумной камеры обнаружилось, что точность изготовления некоторых элементов ниже допустимой. Монтаж системы электропитания установки в значительной степени завершен. Система отвода тепла также практически готова к вводу в эксплуатацию. Она сможет отводить от реактора тепловую мощность порядка 1,2 ГВт. Криогенное оборудование также практически готово к вводу в эксплуатацию. На сроки пуска реактора повлияет принятое командой ITER решение о замене материала первой стенки с бериллия на вольфрам. Основанием для принятия такого решения послужили опасения о возможном плавлении бериллия из-за особенностей конструкции первой стенки и более короткий срок службы бериллиевой стенки по сравнению с вольфрамовой. Кроме того, в будущем реакторе DEMO планируется использование вольфрама в качестве материала первой стенки. Поэтому использование вольфрама на ITER может дать новые результаты, важные для строительства реактора следующего поколения.

В докладе, представленном П. П. Хвостенко от имени большого коллектива авторов (НИЦ

«Курчатовский институт», МФТИ (НИУ), НИЯУ МИФИ, АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», АО ГНЦ РФ ТРИНИТИ, НИУ МЭИ, МГУ им. М. В. Ломоносова) были представлены результаты первых двух экспериментальных компаний, проведенных в 2023 году на недавно вступившем в строй токамаке T-15MD. Установка T-15MD – токамак с низким аспектным отношением ($A = 2,2$, $R = 1,48$ м, $a = 0,67$ м), тороидальным магнитным полем до $B_t = 2,0$ Тл, D-образным сечением плазменного шнура с эллиптичностью до 1,8 и треугольностью до 0,4. Эксперименты были проведены с лимитерной конфигурацией плазмы (графитовый лимитер, $a = 0,67$ м) и тороидальным магнитным полем $B_t = 1-1,2$ Тл. Для пробоя газа и оптимизации стадии подъема тока использовался гиротрон предыонизации с частотой СВЧ-излучения 82,6 ГГц и мощностью 1 МВт. В ходе экспериментов были получены плазменные разряды с током до 260 кА, электронной температурой $T_e = 3-3,5$ кэВ и среднечордовой плотностью $n_e = 6 \times 10^{18} \text{ м}^{-3}$. При токе плазмы 190 кА достигнута рекордная для отечественных токамаков длительность импульса 2 с. В дальнейшем планируется ввод в работу систем дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока, дооснащение токамака диагностикой, установка дивертора и облицовка камеры графитом.

Возможный эффективный путь к созданию термоядерного реактора в России обсуждался в докладе А. В. Красильникова (Проектный центр ИТЭР). В докладе подчеркивалось, что в настоящий момент на пути к созданию термоядерного токамака – реактора остаются неразрешенными ряд фундаментальных проблем, прежде всего, таких как экспериментальная демонстрация квазистационарного термоядерного горения; генерация неиндуктивного квазистационарного тока, разработка плазменных технологий материалов первой стенки и дивертора. Для их решения создаётся Международный экспериментальный термоядерный реактор ITER, разрабатываются проекты демонстрационных реакторов DEMO, в России разрабатывается Токамак с Реакторными Технологиями (TRT), а в Китае начато сооружение токамака BEST. Технологические платформы ITER, TRT и

BEST вместе содержат полный, по современным представлениям, набор технологий и производств, требуемых для реализации будущего термоядерного реактора. Создание и экспериментальная эксплуатация технологических платформ ITER, TRT и BEST, с учётом опыта реализации других крупных термоядерных экспериментов партнёров по ITER, позволит на следующем шаге успешно реализовать сооружение как чистого термоядерного, так и гибридного (синтез-деление) реактора в нашей стране.

С докладом, посвященным наиболее интересным результатам, доложенным на 29-й конференции МАГАТЭ FEC-2023, выступил С. В. Лебедев (ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН). На конференции докладывались результаты исследований, полученные в течение последних двух лет по наиболее актуальным вопросам термоядерного синтеза. Среди наиболее интересных были отмечены результаты DT компании на токамаке JET. В экспериментах получена рекордная термоядерная энергия – 59 МДж в течение 5 с в обогащенной тритием плазме (отношение n_T/n_D составило 85/15). На конференции также обсуждался запуск токамака JT-60SA, построенного в рамках Европейско-Японского сотрудничества. Его размеры превышают JET, но магнитное поле $B_T = 2,25$ Тл почти вдвое ниже, чем у JET, и невозможна работа с тритием. Наиболее амбициозным проектом, представленным на конференции, явился проект токамака SPARC на основе высокотемпературного сверхпроводника с магнитной индукцией $B_T = 12,2$ Тл, в котором планируется достигнуть выхода термоядерной энергии, превышающей вложенную в плазму энергию нагрева ($Q > 1$). Частная компания CFS совместно с Массачусетским технологическим институтом намерены в 2025 г. запустить новый токамак, а в 30-е годы построить коммерческий реактор ARC, производящий 400 МВт электрической мощности. Среди достижений было отмечено получение квазистационарных разрядов с полным замещением тока в течение 1000 с и с 400-секундным H-режимом на китайском токамаке EAST, а также с 400-секундным разрядом с улучшенным удержанием на корейском токамаке KSTAR. Большой интерес аудитории вызвали результаты, полученные на сфериче-

ских токамаках Глобус-М2 и ST40, в которых была продемонстрирована возможность достижения субтермоядерных температур в компактных установках.

В докладе И. Ю. Родина (АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова») был дан обзор опыта использования высокотемпературных сверхпроводников при разработке проектов электромагнитных систем (ЭМС) перспективных установок УТС, таких как SPARK, TRT, ST-HTC и др. В докладе отмечалось, что в электромагнитной системе установки ITER будут использованы низкотемпературные сверхпроводники. Однако, в последние годы в мире ясно прослеживается увеличение интереса к компактным установкам УТС со сверхпроводниковыми ЭМС, работающими на более высоких уровнях магнитных полей. Прогресс в разработке высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2), подтвержденный изготовлением сверхпроводниковых магнитов с рабочими значениями магнитной индукции до 30 Тл, дает основание говорить о технической реализуемости амбициозных проектов, целевыми параметрами которых являются: конструктивная плотность тока в сверхпроводниковых обмотках 70–100 А/мм²; магнитная индукция на обмотке 18–22 Тл; рабочая температура сверхпроводника 10–25 К. Преимущества ВТСП-2 уже реализуются в проектах по созданию ряда современных установок, таких как SPARK, TRT, ST-HTS.

Доклад Л. Н. Химченко и А. В. Красильникова (Проектный центр ИТЭР) был посвящен подробному анализу проблем, возникших перед международным и, в частности, российским термоядерным сообществом, в связи с обнаружением серьезных технических неисправностей, выявленных при сборке установки ITER в 2022 году после изготовления тепловой защиты и секторов вакуумной камеры. В проект были заложены инновационные технические решения. Это было необходимо при строительстве установки, которая далеко оторвалась по параметрам скейлингов от действующих современных токамаков. Поэтому трудности и неудачи являются неотъемлемой частью первых этапов сооружения такой установки. Так как ITER во Франции проходит как ядерный объект, то у ядерного регуля-

тора Франции также вызвали большие сомнения использование бериллия в качестве материала первой стенки. Поэтому (и по ряду других причин) было принято решение об отказе от бериллия, материала с низким Z , и о его замене на вольфрам. Это потребовало некоторого пересмотра всего проекта, и в частности, сроков получения первой плазмы. Использование вольфрама создает проблему переизлучения энергии из центральной области плазменного шнура. Поэтому для дальнейшего продвижения проекта требуется, например, изменение структуры дополнительного нагрева плазмы. Россия будет принимать активное участие в решении возникших проблем. Одним из аспектов этого участия может стать строительство в России термоядерной установки, где можно было бы осуществлять проверку технологий для термоядерного реактора.

Статус работ по развитию проекта ГДМЛ был представлен в докладе П. А. Багрянского (ИЯФ СО РАН). Отмечалось, что в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера в течение многих лет проводятся исследования, направленные на развитие технологий, необходимых для реализации приложений термоядерного синтеза на основе магнитных ловушек открытого типа с линейной осесимметричной конфигурацией. В ближайшей перспективе в качестве таких приложений видятся мощные источники нейтронов DT-синтеза, а при успешном дальнейшем развитии и относительно компактные энергетические реакторы. Газодинамическая многопробочная ловушка (ГДМЛ) должна продемонстрировать успешность развиваемых технологий. В настоящее время завершены работы по созданию эскизного проекта ГДМЛ, одной из отличительных особенностей которого являются магнитные пробки на основе ВТСП второго поколения с магнитной индукцией до 20 Тл. Миссией ГДМЛ является экспериментальная демонстрация в стационарных условиях кардинального улучшения удержания плазмы по сравнению с классическим пробкотроном Будкера-Поста. Такого результата планируется достичь за счет использования торцевых многопробочных или винтовых секций, способных ограничить уход частиц и энергии плазмы вдоль оси установки, а также за счет перехода

в режим диамагнитного удержания, когда относительное давление плазмы $\beta \rightarrow 1$. В поддержку проекта ГДМЛ в ИЯФ созданы и успешно работают четыре экспериментальных установки, где решаются ключевые проблемы проекта, связанные с продольным удержанием и удержанием при $\beta \rightarrow 1$.

В. П. Пастухов, Д. В. Смирнов и Н. В. Чудин (НИЦ «Курчатовский институт») представили эффективную динамическую модель плазменной турбулентности и результирующих процессов переноса в плазме центральной области токамака. Модель основана на специальной системе нелинейных слабо диссипативных адиабатически редуцированных уравнений МГД-типа, которые самосогласованно описывают как турбулентные флуктуации плазмы, так и результирующий недиффузионный перенос тепловой энергии, тороидального момента и плотности плазмы. Одной из наиболее важных особенностей модели, выявленной в ходе расчётов, является тенденция поддержания плазмы вблизи турбулентно-релаксированных состояний с профилями давления, близкими к «каноническим» профилям давления, наблюдаемым во многих экспериментах на токамаках. Результаты расчетов с использованием этой модели демонстрируют быструю нелокальную реакцию результирующих транспортных процессов на быстрые изменения вводимой внешней мощности и находятся в разумном согласии с экспериментами, выполненными на различных токамаках.

Фундаментальная проблема равновесия плазмы в осесимметричной магнитной конфигурации обсуждалась в докладе Е. А. Сорокиной (НИЦ «Курчатовский институт»). Известно, что для идеализированного случая осевой симметрии, описываемого каноническим уравнением Грэда-Шафранова, имеются различные типы решений, в том числе аналитические и численные примеры равновесных систем с тороидально вложенными магнитными поверхностями. В отсутствие симметрии существование таких систем не только не является очевидным, но и подвергается постоянным сомнениям на протяжении уже более 60 лет развития теории равновесия плазмы. В реальности идеально симметричных магнитных систем нет. В токамаках неизбежна

асимметрия из-за дискретности магнитных катушек, наличия нагревных и диагностических портов, присутствия внешних полей. В рамках компьютерного моделирования до сих пор не удавалось получить наглядных гладких решений, не обладающих пространственной симметрией, что в течение многих лет служило аргументом в поддержку гипотезы Грэда о несуществовании невырожденных трёхмерных равновесий плазмы со вложенными магнитными поверхностями. В докладе был предъявлен класс аналитических решений уравнений равновесия с истинными магнитными поверхностями, удовлетворяющими условию замыкания токов. Развитый формализм доказывает ошибочность гипотезы Грэда и открывает возможности для адекватного моделирования трёхмерных равновесных осесимметричных плазменных конфигураций.

Теоретическое обоснование эффекта аномального излучения и поглощения СВЧ-волн в экспериментах по электронному циклотронному резонансному нагреву (ЭЦРН) плазмы, наблюдаемого на многих тороидальных установках, было представлено в докладе Е. З. Гусакова и А. Ю. Попова (ФТИ им. А. Ф. Иоффе). В докладе был дан обзор экспериментальных наблюдений аномальных явлений в экспериментах по ЭЦРН. Была также представлена теоретическая модель, принимающая во внимание возможность локализации дочерних волн и низкопорогового возбуждения параметрической распадной неустойчивости (ПРН) в следующих случаях: при наличии немонотонного профиля плотности в центральной части разряда, в магнитном острове, в плазменном филаменте или за счёт эффекта «density pump out». Эта модель позволяет объяснить низкопороговое возбуждение ПРН. Аномальное излучение плазмы и нагрев ионов в этой модели объясняются, как результат вторичных нелинейных волновых процессов, сопровождающих первичную низкопороговую ПРН, ведущую к возбуждению запертых в плазме волн. Первичная ПРН в этой модели насыщается как в результате каскада вторичных распадов, так и вследствие истощения волны накачки. При этом аномальное излучение плазмы генерируется при слиянии параметрически возбужденных плазменных волн и волны накачки. Этот механизм позволяет де-

тально объяснить структуру спектра аномального излучения и его высокий уровень, который может мешать работе микроволновых диагностик. В то же время он предсказывает аномальное поглощение накачки на уровне 10–70 % от вводимой в плазму СВЧ-мощности и объясняет передачу энергии ионной компоненте плазмы как результат поглощения ионных мод, возбужденных в ходе насыщения параметрической распадной неустойчивости.

Большой интерес вызвал доклад коллектива авторов из ИПФ РАН, посвященный вопросам двухчастотного ЭЦР-нагрева в компактных плазменных системах. Доклад представлял В. А. Скалыга. В докладе отмечалось, что нагрев высокотемпературной плазмы в лабораторных магнитных ловушках в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) в бихроматическом поле представляет значительный интерес как для фундаментальных исследований физики взаимодействия электромагнитных волн с плазмой, так и для практических приложений. Наличие двух пространственно разнесенных зон ЭЦР, отвечающих разным СВЧ-частотам, может быть использовано для управления профилем энерговклада и стабилизации плазмы в тороидальных системах. С другой стороны, перекрытие зон ЭЦР, наиболее естественно реализуемое в открытых магнитных ловушках, обеспечивает эффективную стохастизацию и уширение области циклотронного взаимодействия в фазовом пространстве. При этом, например, за счет перекрытия близких циклотронных гармоник появляется возможность подавить ограничение максимальной энергии ускоряемых электронов, связанное с уходом из резонанса за счет релятивистских эффектов. Был сделан акцент на относительно новом явлении, обнаруженном в экспериментах с двухчастотным ЭЦР-нагревом в компактных технологических магнитных ловушках, используемых в качестве ЭЦР-источников многозарядных ионов. Эффект проявляется в виде существенного увеличения эффективности работы такого источника в условиях подавления кинетических неустойчивостей, обусловленных мощным СВЧ-нагревом плазмы.

Результаты первых экспериментов на многофункциональном исследовательском комплексе мегаджоулевой лазерной установ-

ки были представлены коллективом авторов из РФЯЦ-ВНИИЭФ. Доклад представил В. Н. Деркач. Установки мегаджоульного класса позволяют получать уникальные экспериментальные данные по поведению вещества в экстремальных состояниях, проводить в лабораторных условиях уточнение и калибровку расчетных моделей, реализовывать программы работ по инерциальному термоядерному синтезу. В конце прошлого года был завершён первый этап создания российской установки такого класса. На сегодня завершён монтаж 32 каналов, создана инфраструктура, обеспечивающая работу установки в целом, и введён в эксплуатацию многоцелевой исследовательский комплекс МИК, на котором начаты эксперименты по физике высоких плотностей лазерной энергии. На настоящий момент на МИК проведено более ста экспериментов по нескольким экспериментальным программам, включающим в себя отработку энергетических характеристик лазерной системы и проведение первых экспериментальных кампаний по облучению мишеней разного типа. Создание установки МИК в Институте лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ является важным этапом развития исследований в области инерциального термоядерного синтеза в нашей стране, который открывает возможности проведения экспериментов по взаимодействию лазерного излучения с энергией в несколько десятков килоджоулей с мишенями различного типа.

В докладе В. М. Асташинского и О. Г. Пенязькова (ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси) были представлены результаты исследований квазистационарных газоразрядных и эрозионных плазмодинамических систем, перекрывающих широкий диапазон запасаемой в накопителях энергии (от 1 до 215 кДж). Такие системы предназначены для решения ряда научных и технологических задач, таких как заполнение плазмой магнитных ловушек различного типа, моделирование условий на первой стенке термоядерного реактора, создание плазменных двигателей космического назначения, а также для эффективной модификации поверхностных свойств материалов. В ИТМО созданы сильноточные плазменные ускорители, в которых реализуется ионно-дрейфовое ускорение замагниченной плазмы. Ускорите-

ли генерируют компрессионные плазменные потоки заданного состава, по совокупности параметров превосходящие все существующие плазодинамические системы. При встречном столкновении таких потоков открывается возможность получения плазменных образований с экстремально высоким энергосодержанием. За счет процессов вязкой диссипации (термализации) обеспечивается переход кинетической энергии сталкивающихся потоков во внутреннюю энергию формирующегося сферического плазменного образования, удерживаемого собственным магнитным полем без «щелей» и устойчиво существующим около 100 мкс. Также были рассмотрены вопросы плазменной модификации поверхностей с помощью компрессионных потоков. Получаемые поверхности могут найти свое применение, например, при создании противометеорной защиты или в области поверхностной плазменной металлургии.

Пленарный доклад Н. А. Булычева (МАИ) был посвящен вопросам получения наноразмерных функциональных материалов в плазменных разрядах в жидкости под действием интенсивного ультразвука. Были приведены исследования плазмохимических процессов, которые определяются сочетанием воздействия на жидкофазные среды термически неравновесной низкотемпературной плазмы и интенсивных ультразвуковых колебаний в режиме развитой кавитации. Разработанный метод реализации плазмохимических превращений представляет значительный интерес для создания новых наноразмерных (2–50 нм) материалов с особыми свойствами, т. к. позволяет направленно варьировать электрофизические и акустические характеристики процесса при осуществлении плазмохимических реакций. Практическим следствием решения данной проблемы является создание метода направленного синтеза технологически значимых материалов. Было показано, что в таком акустоплазменном разряде можно синтезировать наночастицы металлов и их оксидов различного состава, в том числе наночастицы полиметаллических оксидов. Синтезированные в таких условиях наночастицы различного состава обладают активированной поверхностью с большим количеством нескомпенсированных связей и дефектов, образующихся в результате действия на них интенсивного ультразвука.

Тем самым образовавшиеся наночастицы способны к эффективному взаимодействию с органическими и неорганическими соединениями, матрицами и веществами, что дает возможность создавать на их основе новые гибридные органо-неорганические композиционные материалы.

Результаты исследований процессов электронно-ионно-плазменной модификации поверхности материалов и изделий были представлены в докладе Н. Н. Коваля (ИСЭ СО РАН). Поверхности подвергались воздействию объемной однородной плазмы, создаваемой самостоятельными и несамостоятельными дугowymi и тлеющими разрядами при давлениях 0,01–1 Па с токами от единиц до сотен ампер, обеспечивая концентрацию заряженных частиц 10^9 – 10^{11} см⁻³ в объемах до долей кубического метра. Помещенные в плазму материалы и изделия подвергались бомбардировке ионами, извлеченными из плазмы и ускоренными в пристеночном слое пространственного заряда. Это приводило к модификации поверхности, улучшая её физико-химические и функциональные свойства. В качестве примера оборудования, созданного с использованием данной технологии, были приведены описание и основные характеристики комплексной электронно-ионно-плазменной установки «КОМПЛЕКС». Она сочетает в едином вакуумном цикле электродуговые устройства для очистки, активации поверхности материалов и плазменно-ассистированного напыления функционального слоя толщиной до нескольких микрометров с дальнейшим электронно-пучковым миксингом покрытия для получения высокоадгезионного упрочнённого слоя с улучшенными характеристиками. Реализованная технология позволяет в разы увеличить износостойкость поверхности материалов и изделий.

Доклад Н. Н. Скворцовой (ИОФ РАН) был посвящен вопросам определения цитотоксичности микродисперсных материалов, синтезированных в цепных реакциях, инициируемых микроволновым излучением мощного гиротрона в смеси порошков металлов и диэлектриков. В ИОФ РАН разработана плазмохимическая установка на основе гиротронного комплекса МИГ-3 стелларатора Л-2М, на которой был экспериментально осуществлен синтез материалов для формирования микро-

и наноструктурных керамик. Полученные структуры обладают повторяемыми характеристиками, привлекательными для многочисленных применений: от создания новых типов гетерогенных катализаторов и люминесцентных материалов до биомедицинских материалов. В докладе была представлена разработанная методика анализа получаемых мелкодисперсных материалов на цитотоксичность. Она была применена для анализа микро- и наноматериалов, синтезированных в разных смесях порошков металлов и диэлектриков (Pt/Al₂O₃, Ag/Al₂O₃ и др.). Была выявлена низкая токсичность на клеточном уровне, что указывает на потенциал безопасного использования предлагаемых микроструктур, но для возможного дальнейшего применения требуется дальнейшее тестирование безопасности на биологических организмах.

На секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы» (председатель секции – А. И. Мещеряков) было представлено 88 докладов. Это ощутимо больше, чем число докладов, представленных в прошлом 2023 году. Тематика докладов связана, прежде всего, с исследованиями, проводимыми на действующих установках с магнитным удержанием плазмы, таких как токамаки T-15МД, Глобус-М2, ТУМАН-3М, T-11М, стелларатор Л-2М, открытые ловушки ГДЛ, ГОЛ-3, и открытая ловушка с винтовыми пробками СМОЛА. Кроме того на секции был представлен ряд работ по результатам обработки экспериментальных данных на закрывшемся в 2018 году токамаке T-10. Почти четверть работ, представленных на секции, было посвящено моделированию и вводу в строй систем и диагностик токамака T-15МД, а также первым результатам, полученным в 2023 году в двух первых экспериментальных компаниях этой установки.

В рамках работы секции был заслушан интересный доклад об успехах Программы термоядерных исследований в КНР, целью которой является промышленное получение термоядерной энергии. Реализацией этой программы занимается Институт физики плазмы Академии наук КНР. От имени генерального директора Института физики плазмы Yuntao Song, доклад представила В. Саклакова.

В докладе была представлена стратегия и конкретный план развития исследований по термоядерному синтезу с магнитным удержанием. Эта стратегия стартовала с токамака EAST (токамака с полностью сверхпроводящей электромагнитной системой и некруглым поперечным сечением), на котором получен режим с самым длительным в мире удержанием плазмы (на сегодняшний день, 403 с). Научными целями токамака EAST являются получение плазменного тока 1 МА, температуры 100 миллионов градусов и длительности разряда 1000 секунд. Дальнейшая стратегия включает в себя строительство целого ряда установок, каждая из которых является значимым шагом в достижении цели – строительства промышленного термоядерного реактора. Параллельно со строительством международного токамака-реактора ITER, было решено построить в КНР свою установку CRAFT, строительство которой началось в 2019 году и которую планируется запустить к 2025 году. При строительстве этой установки ученые Института физики плазмы используют двадцатилетний опыт своего активного участия в исследованиях и разработках по проекту ITER. С учетом некоторых неудач, выявленных при сборке ITER, возможно, пуск установки CRAFT состоится даже раньше, чем установки ITER. Основная цель установки – тестирование основных систем и диагностик для токамаков следующего поколения (BEST и CFETR). В 2027 году планируется запуск токамака BEST, который будет работать на смеси DT, и сможет проводить эксперименты в поддержку проекта ITER. На BEST ожидается получение термоядерной мощности 20–200 МВт, коэффициент превышения термоядерной мощности над мощностью нагрева плазмы $Q = 1-5$, а также предполагается осуществить длительное импульсное устойчивое безопасное управление горячей плазмой. В начале 2030-х годов планируется запуск CFETR, инженерный и концептуальный проекты которого уже завершены. Научной миссией проекта является получение термоядерной мощности 2 ГВт и коэффициента размножения трития превышающего 1. В 2050-х годах планируется запуск термоядерной электростанции мощностью 1 ГВт.

Энергетический пуск токамака T-15МД, состоявшийся в 2023 году, явился важным со-

бытием для российского научного сообщества, выполняющего исследования в области удержания высокотемпературной плазмы в тороидальных магнитных ловушках. В первых экспериментах на токамаке Т-15 МД на стадии энергетического пуска были измерены спектры мягкого рентгеновского излучения. Из анализа полученных спектров следует, что в плазменных разрядах функция распределения электронов плазмы по скоростям не может быть описана только максвелловской функцией распределения. В разрядах, где тепловая компонента спектра может быть надежно отделена от надтеплого спектра, электронная температура плазмы составляет 1,5–3,5 кэВ в зависимости от условий и стадии разряда. Анализ надтепловой части излучения говорит о развитии пучков ускоренных электронов, что дополнительно подтверждается измерениями надтеплого и жесткого рентгеновского излучения в диапазоне энергий 30 кэВ – 10 МэВ. Были представлены первые результаты измерений электронной температуры и плотности с помощью диагностики Томсоновского рассеяния. Профили температуры и плотности зарегистрированы по шести пространственным каналам в диапазоне большого радиуса плазмы от $R = 0,81$ м до $R = 2$ м. В области $R > 2$ м, вероятно, параметры плазмы находились за пределами измеряемого диагностикой диапазона. В импульсе с рекордной длительностью 2 с диагностика обеспечивала измерения в течение всего разряда. Показано, что в этом импульсе при токе плазмы в 190 кА и мощности дополнительного СВЧ-нагрева в 1 МВт на квазистационарной стадии разряда температура плазмы достигала 2,5 кэВ. Основной задачей осенней кампании было получение разряда с током плазмы в диапазоне сотен килоампер. Для этого предварительно был проведен численный анализ разрядов весенней пусконаладочной кампании. На основании моделирования разрядов с неустойчивым равновесием плазмы по вертикали была отработана методология формирования устойчивого по вертикали плазменного шнура, сценария роста тока плазмы, контроля расстояния между шнуром и стенками вакуумной камеры и управления его перемещениями. Для получения требуемых конфигураций плазмы в за-

данном месте необходимо было с хорошей точностью уметь определять границу плазменного шнура. С использованием измеренных экспериментальных данных (датчики напряжения на обходе, токи в полоидальных обмотках и плазменный ток) была разработана методика восстановления границ плазменного шнура. Восстановленные из эксперимента равновесные конфигурации были в хорошем согласии с данными моделирования с использованием кода TOKAMEQ.

На токамаке Глобус-М2 за прошедший год были запущены второй инжектор и новый комплекс Томсоновского рассеяния. Профили электронной температуры T_e и плотности плазмы n_e , измеренные новой диагностикой, позволили провести моделирование процессов переноса тепла на токамаке Глобус-М2. Прямое сравнение профилей T_e и n_e даёт качественное представление о термоизоляции электронов в конкретных разрядах токамака. Для более общего анализа термоизоляции был проведён совместный анализ баланса энергии, частиц и полоидального магнитного потока. Решение обратной транспортной задачи с помощью кода ASTRA позволило оценить коэффициенты температуропроводности, диффузии, а также время удержания энергии. Запуск второго инжектора позволил получить режим с горячими ионами в диапазоне значений средней плотности плазмы $(1,6 \div 10) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. По данным активной спектроскопии и корпускулярной диагностики температура ионов достигала величины 4 кэВ при плотности плазмы $8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ в горячей зоне, превысив температуру электронов более чем в 2,5 раза. В экспериментах по нагреву плазмы методом нейтральной инжекции при высоком тороидальном магнитном поле был обнаружен изотопный эффект. Он состоит в том, что инжекция пучка дейтерия в дейтериевую плазму позволяет получить существенно большие значения температуры ионов, чем при нагреве дейтериевой плазмы водородным пучком, причем в обоих случаях ионная температура существенно превышает электронную, и плазма находится в режиме с горячими ионами. Время удержания энергии плазмы при нагреве дейтериевым пучком в два раза выше, чем при инжекции водорода, вследствие более высокой эффективности термоизоляции ион-

ного компонента плазмы, в то время как перенос тепла по электронному каналу находится на одном и том же уровне. При инъекции водородного пучка нагрев ионов оказался значительно менее эффективным из-за более высоких потерь тепла по ионному каналу.

Интересные результаты, полученные на открытых ловушках, были представлены участниками конференции из ИЯФ СО РАН. Магнитные ловушки открытого типа с улучшенным продольным удержанием частиц, могут быть основой для создания реакторов ядерного синтеза с коэффициентом усиления мощности $Q \gg 1$. Такие реакторы способны работать с альтернативными видами топлива, не содержащими радиоактивный тритий. Проект прототипа такого реактора разрабатывается в настоящее время в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера РАН. Ключевым параметром является энергетическая эффективность системы, а значит, изучение возможных каналов потерь энергии из системы критически важно для проектирования будущих термоядерных установок на базе открытой магнитной ловушки. Такие исследования ранее проводились на установке ГДЛ в конфигурации с длительностью атомарной инъекции 1 мс. Современная установка ГДЛ оснащена инжекторами длительностью 5 мс, сценарий создания и поддержания разряда также претерпел изменения, полученные параметры приблизились к термоядерным величинам, поэтому задача изучения энергобаланса в настоящее время особенно актуальна. Для решения этой задачи на ГДЛ разработан ряд диагностических систем, которые позволили выполнить измерения потоков энергии в область магнитных пробок установки, на радиальные лимитеры, а также на стенку вакуумной камеры. Получены значения полных энергетических потерь плазмы, создаваемой в установке ГДЛ в разных режимах ее работы.

На установке СМОЛА в ИЯФ СО РАН проводятся эксперименты по проверке концепции винтового удержания. Ранее была показана принципиальная возможность подавления потока плазмы винтовой магнитной пробкой и соответствие экспериментальных скейлингов теоретическим оценкам, наблюдалось повышение плотности плазмы в области удержания в 1,6 раза. В настоящее время здесь

проводятся исследования эффективности удержания плазмы в пробкотроне с использованием многопробочной секции и винтового поля, и сравнение их эффективности. Оказалось, что при равной длине и глубине гофрировки винтовая пробка эффективнее осесимметричной. Если винтовую пробку скомбинировать с обычной пробкой с пробочным отношением $R = 6$, то можно получить эффективное пробочное отношение $R_{eff} = 34,7 \pm 9,4$.

Вызвал интерес доклад, представленный по результатам экспериментов на стеллараторе Л-2М (ИОФ РАН). В докладе обсуждались результаты экспериментов на токамаке Т-10 в режимах с дополнительным ЭЦР-нагревом, в которых при напуске в плазму примесей (гелий, неон) наблюдалось улучшение удержания плазмы (рост ее энергосодержания), несмотря на значительное увеличение радиационных потерь. На Л-2М были проведены эксперименты в режиме ЭЦР-нагрева, в которых были получены экспериментальные зависимости времени удержания энергии плазмы от мощности радиационных потерь. Полученные зависимости свидетельствуют о том, что увеличение радиационных потерь из краевой плазмы на стеллараторе Л-2М не приводит к ухудшению удержания плазмы, равно как и к его улучшению. То есть удержание плазмы в Л-2М не зависит от величины радиационных потерь. На основании проведенных экспериментов было предложено объяснение эффекта увеличения энергосодержания плазмы, наблюдаемого при дополнительном напуске примесей в токамаках (режим линейного омиического удержания, LOC). В режиме LOC рост энергосодержания наступает в результате конкурирующего действия двух процессов. С одной стороны в самоорганизованной плазме токамака суммарные потоки тепла из плазмы не зависят от величины радиационных потерь (возрастут радиационные потери, уменьшатся потери в других каналах потерь). С другой стороны, напуск примесей приводит к некоторому охлаждению периферии плазмы, сопровождающемуся уменьшением ее проводимости. Это увеличивает отношение коэффициентов запаса устойчивости на периферии и в центре, что ведет к увеличению энергосодержания плазмы за счет подавления турбу-

лентных потерь (эксперименты на токамаке Туман-3). Чем выше радиационные потери, тем лучше происходит подавление турбулентности. При некотором уровне радиационных потерь турбулентные потери оказываются полностью подавленными, и энергосодержание плазмы выходит на некоторое плато (режим насыщенного омического удержания, SOC). А в стеллараторах угол вращательного преобразования задается магнитной системой установки и не меняется при изменении радиационных потерь. Поэтому удержание самоорганизованной плазмы в них не зависит от величины радиационных потерь.

Продолжается работа по исследованию возможности создания квази-изодинамического стелларатора с малым аспектным отношением. В квази-изодинамических стеллараторах топология линий магнитной индукции $B = \text{const}$ на магнитных поверхностях определяется наличием гофрировки продольного поля. В сечениях с экстремумами продольного поля кривизна магнитной оси конфигурации обращается в ноль. Период конфигурации между сечениями с максимумами магнитного поля является криволинейным равновесным элементом, что уже приводит к существенно уменьшению вторичных токов. Дальнейшего уменьшения вторичного тока можно добиться, усложняя структуру периода таким образом, чтобы вторичный ток был знакопеременным и на внутреннем, и на внешнем обходе тора. Ранее возможность существования таких конфигураций была показана для шестипериодной конфигурации с большим аспектным отношением $A \approx 30$. В настоящее время исследуются возможности выполнения условия квази-изодинамичности в двух типах конфигураций со сложной структурой периода для уменьшенного числа периодов, и, соответственно, меньшего аспектного отношения. Найдены конфигурации, которые оказываются устойчивыми относительно локальных мод. Данные приводятся для пятипериодной конфигурации с аспектным отношением $A \sim 20$ и средним отношением газокINETического давления к магнитному $\langle \beta \rangle \approx 0,2$.

По результатам работы секции, можно отметить ряд весьма значимых исследований, проведенных за последний год на российских установках. К ним относятся работы на тока-

маке Глобус-М2 и на открытых ловушках ИЯФ СО РАН. Важным событием стал энергетический пуск нового российского токамака 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.

По тематике секции "Инерциальный термоядерный синтез" (председатель секции Г. А. Вергунова) на конференции было представлено 26 докладов (13 устных и 13 стендовых). К основным направлениям исследований по инерциальному термоядерному синтезу относятся лазерный термоядерный синтез, 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.

В ФИАН завершено создание установки «лазерная ударная труба» (ЛУТ) для генерации мощных ударных волн и высокоскоростных гидродинамических течений. Принцип действия ЛУТ основан на ускорении тонкой плёнки при воздействии мощного импульса ультрафиолетового KrF лазера ГАРПУН с энергией около 100 Дж при длительности импульса около 100 нс.

На конференции были представлены расчетно-теоретические работы по исследованию взаимодействия лазерного излучения с веществом, лазерного термоядерного синтеза, физики высоких плотностей энергии. Были представлены результаты численного моделирования термоядерного выхода одно- и двухкаскадной оболочечных мишеней прямого облучения для мегаджоульных лазерных установок в условиях несимметрии сжатия мишеней (РФЯЦ-ВНИИТФ). Моделирование было выполнено с помощью двумерных программных комплексов ТИГР-3Т и ОМЕГА-3Т. Было показано, что развитие длинноволновых газодинамических возмущений при асимметрии облучения мишени $\approx 1\%$ и шерохова-

тости поверхностей оболочек ≈ 10 нм может привести к значительному снижению выхода термоядерной энергии из этих мишеней, в частности, за счет перемешивания вещества внешнего слоя оболочек (аблятора) с DT-топливом.

Коллективом авторов из ФИАН было предложено уравнение состояния плазмы пористого вещества в виде уравнения состояния сплошной среды, содержащего в качестве регулирующего параметра давления степень гомогенизации (выравнивания плотности) плазмы, которая является функцией параметров структуры пористого вещества, а также текущих значений плотности и температуры. Обсуждались возможности использования пористых сред в мишенях, предназначенных для исследований уравнения состояния вещества и инициирования термоядерной реакции в схемах прямого облучения в лазерном термоядерном синтезе.

В докладе коллектива авторов из ФИАН и ИПМ РАН сообщалось, что в ходе расчётно-теоретических исследований были обнаружены эффект каналирования распространения волны ионизации в центральной приосевой области плазмы и эффект рефракционной самофокусировки лазерного пучка за счёт направления градиента плотности, обусловленного гидродинамическим движением плазмы. Было показано, что продольная скорость волны ионизации в области каналирования превышает скорость волны в периферийной области плазмы, расположенной на расстояниях, сравнимых с радиусом лазерного пучка, за счёт нагрева плазмы в приосевой области рефрагирующим излучением пучка. Для исследования задач взаимодействия пучков лазерного излучения с веществом и лазерного термоядерного синтеза в ИПМ РАН развиты и совершенствуются новые численные методики с применением адаптивных разностных сеток в трехмерной геометрии.

В ФИАН было теоретически исследовано возбуждение терагерцовой поверхностной моды при воздействии двух волн p -поляризованного лазерного излучения с близкими частотами на слой плазмы в случае, когда вдоль его границы лазерные поля распространяются навстречу друг другу. Показано, что при совпадении разности частот лазерных волн с соб-

ственной частотой симметричной моды плазменного слоя происходит ее резонансное возбуждение и, как следствие, значительное увеличение электромагнитного поля терагерцовой моды.

Совершенствуются технологии изготовления, доставки и контроля качества мишеней для экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза (ФИАН). Разработан комплексный прецизионный мониторинг низкоплотных композитных материалов с включением наночастиц серебра Ag (8–20 % по массе). Калибровочные методы контроля плотности и толщины, а также флуктуаций плотности мишеней, развиты с применением методов электронной микроскопии, спектроскопии оптического и лазерного излучения, микрорадиографии в широком диапазоне рентгеновской области спектра. Создан прототип элементарного блока ускорения высокотемпературного сверхпроводникового носителя, доставляющего мишень в камеру для взаимодействия с лазерным излучением. Исследуются процессы управления его движением.

Развиваются и совершенствуются диагностические методы для исследования параметров лазерной плазмы. В докладе авторов из НИЦ «Курчатовский институт» были представлены результаты исследования характеристик вогнутого монохроматора из слюды, применяемого для регистрации рентгеновского излучения высокотемпературной плазмы. Поскольку энергии диагностических рентгеновских линий близки друг другу, то обычно предполагается равенство их коэффициентов отражения. Экспериментальные исследования однородности отражения от двух образцов слюды размерами 25×70 мм² и толщиной 110 мкм, наклеенных на сферические поверхности радиусом 250 мм, показали, что расстояние между областями кристалла, отражающими соседние линии, может составлять 2–3 мм, а локальные коэффициенты отражения могут отличаться на 20 %, что сравнимо с точностью аналитических методов рентгеновской спектроскопии.

В ФИАН проводятся комплексные исследования мягкого рентгеновского и экстремального ультрафиолетового излучения лазерной плазмы сплошных мишеней из меди.

Разработана математическая процедура восстановления истинного изображения плазмы по излучению, прошедшему сквозь кодирующую аппаратуру, которая представляет собой структуру пересекающихся взаимно-перпендикулярных прозрачных и непрозрачных полос.

Из экспериментальных работ, проводимых в ФИАН, можно выделить следующие. Была предложена оригинальная схема Z-пинча, позволяющая эффективно передавать энергию электрического накопителя в плазму в заданной точке пространства и получать вещество с экстремальными параметрами в заданный момент времени. В частности, были проведены уникальные исследования наносекундного взрыва проволочек и проволочных сборок, которые позволили получить достоверную и недоступную ранее информацию о процессах во время и после взрыва. Кроме того, была представлена новая малогабаритная установка КИНГ для генерации X-пинчей, в которой сплошной токопровод был заменен отдельными стержневыми токопроводами, что позволило менять катод-анодный промежуток в широких пределах. Проведены эксперименты с алюминиевыми (Al), медными (Cu) и молибденовыми (Mo) проволочками, в которых было показано улучшение работы X-пинчей и проанализирована природа источников излучения.

В области физики электрического взрыва тонких проволочек в ФИАН продолжают исследования по усовершенствованию теоретических моделей с целью их согласования с экспериментальными данными. Эти работы касаются влияния особенностей фазовых преобразований ряда металлов в различных условиях экспериментов на процесс испарения тонких проволочек, распределение термодинамических величин в центральной области (керне) проволочек, стратификацию областей повышенной плотности и другие явления.

На заседаниях секции обсуждалось теоретическое описание свойств Z-пинчей. В докладе коллектива авторов из МГТУ им. Н. Э. Баумана и НИЦ «Курчатовский институт» был представлен теоретический анализ нагрева плазмы до киловольтных температур в Z-пинче за счет быстрого роста магнитного поля. В результате в плазме пинча происходит увеличение энергии ионов пропорционально уже имеющейся у

них энергии. Это приводит к генерации надтепловых ионов. Результаты исследования демонстрируют наличие в Z-пинчах двух взаимодополняющих механизмов, отвечающих за формирование надтеплого распределения ионов. Первый механизм – запаздывание релаксации плазмы относительно набора ионами энергии. Второй механизм связан с набором ионами энергии в изменяющемся магнитном поле. По-видимому, с наличием надтеплого распределения ионов связаны анизотропия нейтронного выхода, генерация джетов и другие особенности пинчевых разрядов.

В целом, работа секции «Инерциальный термоядерный синтез» была успешной и прошла на высоком научном уровне. Практически все представленные доклады относились к поисковым направлениям, связанным с исследованиями на мощных электроразрядных установках и лазерным термоядерным синтезом.

На конференции в рамках работы секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» (председатель секции Ю. А. Лебедев) было представлено 42 доклада, 23 из которых были устными. Заседания проводились в смешанном очно-заочном режиме. Число участников секции было примерно таким же, как и в 2023 году. При этом большинство участников секции 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 и др.), различные применения низкотемпературной плазмы, исследование плазмы, возникающей в импульсных процессах, физика атмосферных явлений. При этом можно отметить, что ряд докладов был посвящен прикладным аспектам низкотемпературной плазмы.

Все доклады можно разделить на две большие группы. Первая группа докладов связана с экспериментальными исследованиями разрядов, включая разработку новых и усо-

вершенствование старых методов диагностики плазмы. Вторая группа докладов связана с численными расчетами процессов в плазме и моделированием плазменных систем. Для примера рассмотрим некоторые из представленных направлений исследований. В ИОФ РАН проводятся лабораторные исследования, которые позволяют понять физику высокоскоростных потоков плазмы и явления в токовых слоях. Такие процессы 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. Важный эффект, связанный с генерацией обратных токов, состоит в появлении токов, направленных навстречу тем, которые создавали ускоренные потоки плазмы. В результате высокоскоростные потоки оказываются ограниченными, как во времени, так и в пространстве.

Ряд интересных результатов был представлен сотрудниками ИПФ РАН. В частности, рассказывалось о результатах исследования контракции СВЧ-разряда в плазмохимическом реакторе в водород-метановой смеси при давлениях 250–500 Торр. Такой разряд используется для осаждения алмазов из паровой фазы; этот диапазон давлений исследован слабо. Показано, что радиальный размер контрагированного разряда (филамента) соответствует толщине скин-слоя. В другом докладе из ИПФ РАН были рассмотрены распространение лазерного разряда в потоке тяжелого газа за счет экстремального УФ-излучения многозарядных ионов. Также исследована структура фронта разряда высокого давления, распространяющегося за счет фотоионизации собственным экстремальным УФ-излучением. Построена модель распространения разряда, найдены режимы, соответствующие наиболее эффективной генерации экстремального ультрафиолета.

В докладе из ИНХС РАН и НИЯУ МИФИ сообщалось о результатах экспериментов по получению водорода в СВЧ-разряде в жидких углеводородах при атмосферном давлении

при барботировании различных газов. Этот тип разряда наименее исследован, и в России такие работы ведутся только в ИНХС РАН. Исследовались как физические, так и химические характеристики такого СВЧ-разряда. Полученные результаты могут оказаться полезными при определении перспектив прикладного использования СВЧ-разряда в жидкостях. Были также приведены результаты исследования разложения метана в СВЧ-разряде в воде на основе модели, разработанной с учетом роста размеров плазменного пузыря. Также выполнено моделирование процесса получения водорода и ацетилена в плазмоструйном реакторе.

В докладе из ИСЭ СО РАН сообщалось о лабораторных экспериментах, направленных на изучение плазмы атмосферных разрядов на высотах 20–100 км от уровня моря. Эти разряды были названы транзиентными световыми явлениями, к которым были отнесены красные спрайты, голубые струи, эльфы, гало и другие. Были приведены результаты исследования столкновения плазменных диффузных струй с различной и одинаковой полярностью при импульсном разряде в воздухе и азоте.

В СПбГУ в течение многих лет проводится изучение явлений, наблюдающихся в пылевой плазме, в частности, изучается вращение плазменно-пылевых структур в магнитном поле в различных газах и, в частности, отбору полидисперсных пылевых частиц в ВЧИ-разряде.

Ряд докладов был представлен сотрудниками ОИВТ РАН. В одном из них был рассмотрен расчет теплофизических свойств плазмы индия, экспериментальные данные о которых практически отсутствуют. В работе использовалась модифицированная модель, которая ранее применялась для моделирования свойств других металлов и полупроводников и которая докладывалась на предыдущих конференциях по физике плазмы и УТС. В другом докладе было рассмотрено моделирование давления асимметричной комплексной плазмы в приближении средней ячейки Вигнера-Зейтца с учетом нелинейного экранирования. Также был представлен доклад, посвященный численному моделированию влияния искровых разрядов на процесс смешения потоков воздуха с дозвуковой и сверхзвуковой струями. Условия моделирования

были представлены на стенде ОИВТ РАН. Показано, что возможно создавать такие условия, при которых эффективность смещения увеличивается на 15 %.

В докладе из ИПМ им. М. В. Келдыша РАН был проведен квазиклассический анализ экспериментальных и расчетных данных о потенциалах ионизации из основного состояния многозарядных ионов средних, тяжелых и сверхтяжелых элементов. 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. Показано, что с ростом Z улучшаются условия применения квазиклассического приближения.

В ряде работ из ИФ НАН Беларуси и ИОФ РАН были представлены результаты исследования возможностей применения протяженных разрядов в качестве излучающего тела вибраторной антенны.

В докладе коллектива авторов из АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» были представлены результаты, которые открывают возможности оптимизации характеристик квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя, одним из перспективных направлений использования которого является разработка мощных электрореактивных плазменных ракетных двигателей.

Ряд докладов, посвященных плазменным ракетным двигателям, был представлен сотрудниками НИЦ «Курчатовский институт».

В докладе из КФУ сообщалось о разработке самосогласованной математической модели, позволяющей рассчитывать основные характеристики струйного ВЧ-разряда, а также определять параметры формирующегося слоя положительного заряда. Плазма такого разряда при давлениях $p = 13,3\text{--}133$ Па применяется для модификации поверхностей различных материалов, таких как сталь, титан, полиэтилен, кожа, мех и др.

В целом, работа секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» была успешной, вполне удобной оказалась и очно-заочная форма проведения заседаний секции. 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 21 устный и 18 стендовых докладов. Обсуждались результаты исследований, проводимых в институтах РАН, вузах СНГ и других ведущих научных центрах России. По тематике наибольшее количество докладов относилось к исследованиям газовых разрядов (18, в том числе к исследованию процессов в прототипах электроракетных двигателей – 4, к проблеме инициации горения топливной смеси в сверхзвуковом потоке – 2). Также были представлены тематики, охватывающие генерацию электромагнитного излучения (6, в том числе терагерцового – 4, сверхвысокочастотного – 2), различные разделы плазменной медицины – 8, плазменные технологии модификации твердых тел и их поверхности – 7, и диагностику плазмы – 5.

Наибольшее число докладов было посвящено экспериментальным исследованиям (22), численному моделированию (4) и теоретическим исследованиям (4), еще два доклада были посвящены изложению как теоретических, так и экспериментальных исследований; в ряде докладов обсуждались принципы построения новых установок.

Среди устных докладов наибольший интерес вызвали две тематики, – исследование прототипов ЭРД и их свойств и генерация электромагнитного излучения. В работе из МГУ изучалась возможность оптимизации работы ВЧ-источников ионов на азоте, кислороде и их смеси, имитирующей газовую среду на орбите. В качестве модели высокочастотного источника ионов использовался индуктивный источник ионов диаметром 10 см. Для улучшения рабочих показателей двигателя на разряд накладывалось внешнее магнитное поле и варьировалась рабочая частота генератора. Результаты эксперимента сопоставлены с расчетами. Коллективом авторов из НИЦ «Курчатовский институт», ИОФ РАН и ИПФ РАН, был представлен доклад, в которой на основе полномасштабного моделирования

возбуждения в плазме волн ионно-циклотронного диапазона частот, учитывающего пространственную дисперсию диэлектрического отклика как электронов, так и ионов, было проведено сравнение нескольких основных типов антенн с точки зрения эффективности энергозклада в ионы плазмы. Найдены оптимальные размеры для каждого из рассматриваемых типов антенн, применительно к лабораторным макетам безэлектродного плазменного ракетного двигателя, установкам Е-1 и ПС-1. Коллективом авторов из НИУ МЭИ, НИЦ «Курчатовский институт» и ОИВТ РАН в ходе экспериментов с геликоновой антенной с помощью зондовой диагностики были определены основные параметры плазмы в установке ПЛМ-М: плотность плазмы составила $(1-10) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$; температура плазмы – более 10 эВ; диаметр плазменного шнура – 3,5 см. Также были определены статистические и спектральные характеристики плазмы по сечению плазменного разряда, проведено их сравнение с данными, полученными в отсутствие дополнительного нагрева плазмы. В ФТИ имени А. Ф. Иоффе проводятся работы по моделированию емкостного ВЧ-разряда низкого давления в сложных геометриях. На секции были представлены результаты моделирования разряда кодом KITE на модельных геометриях, таких как вложенные сферы, плоскопараллельные пластины, выполнен расчет изолированной системы заряженных частиц. Было проведено сравнение со стандартной моделью. Была исследована сходимость и устойчивость модели при вариации геометрий и расчетных сеток.

В работе из ОИВТ РАН была установлена зависимость между воспламенением активированной разрядом зоны и самовоспламенением газа перед фронтом волны горения. На её основе предложен новый способ управления горением обедненной топливно-воздушной смеси в камере сгорания компрессионного двигателя при помощи высокочастотного коронного разряда. За счет изменения параметров разряда в широком диапазоне можно обеспечить самовоспламенение в узком диапазоне углов поворота коленвала вблизи верхней мертвой точки. Влияние разряда снижается с увеличением степени обедненности смеси.

Члены коллектива из МГУ исследовали разряд в высокоскоростных газовых потоках, инициируемый полуволновой СВЧ-антенной. Экспериментально установлено, что структура (длина светящегося канала, его толщина, интенсивность свечения) СВЧ-разряда зависит от параметров потока: давления газа в потоке и его скорости. Была определена концентрация электронов n_e порядка 10^{15} см^{-3} , а также установлено, что плазма находится в состоянии, близком к равновесному со значениями электронной и газовой температур около 5500 К. В еще одной работе из МГУ были исследованы токовые и излучательные характеристики наносекундного поверхностного скользящего разряда в сверхзвуковых потоках воздуха в канале.

Выделим еще одну работу по газоразрядной тематике из НИИЯФ МГУ, посвященную контракции импульсных наносекундных разрядов в азоте и воздухе атмосферного давления. В ней была представлена 1D модель с заданной временной динамикой импульса тока разряда, описывающая механизм контракции наносекундных разрядов для условий экспериментов. Отличительной особенностью разработанной модели является учет реакций диссоциации возбужденных молекул азота $N_2(A, B, C)$ в результате электронного удара, а также включение ступенчатой ионизации образующихся возбужденных атомов азота $N(^2D), N(^2P)$.

Вызвала интерес работа из ФИАН, в которой были проведены измерения эмиссии мощного СВЧ-излучения на частотах 1–6 ГГц во время развития лабораторного высоковольтного разряда в воздушных промежутках шириной 50 см при напряжениях порядка 1 МВ (при отрицательной и положительной полярности). С высокой точностью локализованы области генерации данного излучения при помощи разработанной сверхширокополосной системы радиорегистрации. Установлены пространственные области генерации СВЧ-излучения и проведен их анализ на предмет корреляции с развитием в разряде плазменных структур. Изучена также корреляция СВЧ-эмиссии с генерацией в разряде жесткого рентгеновского излучения. Показано, что генерация СВЧ-излучения в разряде не может быть однозначно объяснена в терминах обще-

принятых концепций развивающихся или соударяющихся стримеров. Высказано предположение о том, что появление радиоизлучения на частотах выше 1 ГГц в разряде может быть связано с локальным развитием черенковских пучковых неустойчивостей в плазме.

Среди работ по тематике генерации электромагнитного излучения также можно выделить ряд интересных работ. Была представлена работа из МГУ, посвященная созданию компактного лазерно-плазменного ускорителя электронов и его применению для генерации терагерцового излучения и решению задач ядерной фотоники. Были представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований нескольких схем ускорения электронов фемтосекундным лазерным импульсом с пиковой мощностью 1–2 ТВт, рассмотрены возможности масштабирования развитых подходов на большие мощности (десятки ТВт и ПВт), а также применения таких лазерных пучков для генерации вторичного излучения в широком электромагнитном диапазоне – от терагерцового до гамма.

В двух докладах из ИЯФ СО РАН и РФЯЦ-ВНИИТФ были представлены результаты исследования динамики потока ТГц-излучения и его корреляции с эволюцией плотности плазмы в экспериментах по взаимодействию релятивистского электронного пучка с плазмой на установке ГОЛ-ПЭТ. С учетом результатов экспериментов был сформирован проект установки ЛИУ-ПЭТ, предназначенной для генерации направленного потока ТГц-излучения.

В двух докладах из АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» были представлены исследования работы плазменного лазера, в котором в качестве генераторной секции используется двойной коаксиальный волновод, внешний и внутренний электроды которого металлические, а роль среднего электрода играет трубчатая плазма. Во втором из докладов было показано, что ширина спектра излучения в значительной степени зависит от азимутальной однородности концентрации плазмы. При однородной по азимуту плазме изменение ее концентрации позволяло изменять центральную частоту излучения в диапазоне от 4 до 13 ГГц при сохранении ширины спектра 3–4 ГГц. Было продемонстрировано электронное управление

шириной спектра излучения, основанное на применении секционированного термокатода прямого накала. В зависимости от степени шунтирования накала одной из секций менялось азимутальное распределение концентрации плазмы и ширина спектра излучения лазера.

В работе коллектива авторов из НИУ «МЭИ» и НИЦ «Курчатовский институт» было представлено описание работы плазменной установки ПЛМ-М (плазменный линейный мультикасп модернизированный) для испытаний теплозащитной облицовки гибридного термоядерного реактора. Установка предназначена также для испытаний тугоплавких материалов при стационарных плазменных нагрузках с плотностью мощности 1–5 МВт/м². Такие плотности мощности позволяют моделировать тепловую нагрузку на пластины дивертора гибридного термоядерного реактора.

Среди докладов, посвященных плазменным технологиям, отметим работу из СПбПУ и ФТИ им. А. Ф. Иоффе, где авторы предложили использовать в качестве мишени эшелон пеллет из твердого ксенона Xe. Это устраняет проблему сопла, расположенного в нескольких миллиметрах от лазерной плазмы. Струя жидкого ксенона в генераторе пеллет-мишени распадается на капли в результате развития поверхностной неустойчивости Плато-Рэлея. Охлаждение образованных капель ксенона в результате испарения материала с их поверхности приводит к их переходу в твердое состояние. Таким образом, формируется поток твердых частиц, движущихся друг за другом.

В НИЦ «Курчатовский институт» на установке «Кремень-2» проводятся работы по осаждению покрытий на режущий инструмент и штамповую оснастку, которые используются при изготовлении деталей и узлов энергетических машин.

Было представлено несколько докладов по плазменной медицине. Сотрудники НИЦ «Курчатовский институт» представили технологическую установку «Микромед», предназначенную для обработки в вакууме групп деталей с целью нанесения на их рабочие поверхности биосовместимых покрытий, обладающих специальными функциональными свойствами, достаточными для надежной ра-

боты этих деталей в составе имплантируемых в сердце человека эндокардиальных электродов электрокардиостимуляторов. Работа выполнялась в рамках совместного проекта с НИИЦ сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева. Во втором докладе рассказывалось о получении и исследовании развитого рельефа поверхности плёнок, осаждаемых плазменными методами. Развитый рельеф осаждаемых плёнок в термоядерных установках является отрицательным фактором, в то же время для многих приложений развитый рельеф необходим для функциональных свойств таких устройств как суперконденсаторы, катализаторы, а также электроды кардиостимуляторов, для которых нужна большая удельная ёмкость их контакта с тканью миокарда. Участники конференции из КНИТУ рассказали о нанесении бактерицидных покрытий на медицинские инструменты с помощью низкотемпературной плазмы. Для снижения числа осложнений при установке имплантатов суставов рассмотрено применение титано-гафниевых нитридных покрытий металлических конструкций. Покрытие обладает бактерицидными свойствами и совместимо с тканями живого организма. В работе участников конференции из НИИЯФ МГУ, УрФУ, Нижнетагильского технологического института и ННГУ были исследованы УФ-спектры поглощения и спектры флуоресценции для альбумина, тирозина и триптофана после действия импульсного излучения горячей плазмы. Основными компонентами клеток являются белки, поэтому повреждение структуры белков может быть критичным фактором, ответственным за гибель микроорганизмов.

Несколько докладов были представлены совместно коллективами из ИОФ РАН и РУДН. В одном из докладов рассказывалось о получении наночастиц оксидов металлов в многоискровом разряде с инъекцией газа в межэлектродное пространство. В другом докладе исследовалась генерация активных соединений кислорода и азота в жидкости при воздействии микроволнового импульсного капиллярного разряда. В третьем докладе был представлен модульный масштабируемый плазменный источник для деконтаминации поверхностей различной природы. Была ис-

следована эффективность воздействия на бактерии *E. coli* BL21 (DE3) модуля с прямым пьезоразрядом в воздухе и модуля с плазменной струей в потоке аргона. Этот же коллектив авторов представил доклад о динамике образования активных форм кислорода и азота в жидкости при воздействии многоискрового разряда с инъекцией газа в зависимости от материала электродной системы. Кроме того, был представлен доклад о плазменной активации питательной среды при микрклональном размножении.

Работа секции в целом показала, что в области плазменных и пучковых технологий ведется активная исследовательская работа, причем число работ, имеющих явную 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. Заметна активность по модернизации больших экспериментальных установок и появлению новых диагностик. Анализ докладов показывает, что экспериментальные установки становятся сложнее, увеличивается их размер.

В секции «Проект ИТЭР. Шаг в энергетике будущего» (председатель секции А. В. Красильников) в этом году было представлено 45 докладов. Доклады были посвящены состоянию работ по созданию систем ИТЭР, разрабатываемых и изготавливаемых в России, и связанным с этим задачам. Ряд докладов были посвящены работам по проектированию токамака с реакторными технологиями TRT.

В НИИЭФА им. Д. В. Ефремова проводились работы по первой стенке ИТЭР, по изготовлению катушки полоидального поля и верхних патрубков вакуумной камеры. Разработана и обоснована конструкция разборного соединения каналов охлаждения первой стенки и трубопроводов стенда вакуумных испытаний с системой уплотнительных колец. Проведены испытания разборного соединения с уплотнениями двух производителей, обоснована целесообразность и работоспособность данного метода. В НИИЭФА также ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, необходимые для поставки

верхних патрубков вакуумной камеры ITER. Верхние патрубки классифицируются как оборудование, важное для безопасности, и оборудование, работающее под давлением. Контроль соответствия требованиям безопасности осуществляется на всех этапах изготовления. К настоящему времени завершено изготовление всех патрубков, продолжают работу по изготовлению уплотнительных фланцев. Комплекс работ по изготовлению и испытаниям катушки полоидального поля в НИИЭФА был завершен в 2023 году поставкой катушки на площадку ITER.

В НИКИЭТ ведутся работы, связанные с созданием бланкета установки ITER. Специалисты НИКИЭТ успешно провели квалификационные испытания электрического соединителя модуля бланкета. В результате квалификации подтверждена как возможность изготовления электрического соединителя, так и его работоспособность при нагрузках, соответствующих режимам работы ITER. Также было проведено расчетное исследование работоспособности сборки гибкой опоры бланкета в различных режимах работы токамака ITER. Была проведена квалификация технологии нанесения двух видов покрытий на внутрикамерные компоненты бланкета ITER: электроизоляционного покрытия и антифрикционного покрытия. Представлены предложения по дальнейшей оптимизации технологии и адаптации ее для серийного производства.

ГНЦ РФ ТРИНИТИ представил на конференции систему измерения плотности на основе дифференциальных рефрактометров с зондированием на обыкновенной волне, реализованную на токамаке T-11M. Были рассчитаны калибровочные кривые рефрактометра (зависимость задержки фазового набега от среднечордовой плотности), приведены первые результаты измерений средней плотности на токамаке T-11M в литиевых экспериментах. Также ГНЦ РФ ТРИНИТИ представил результаты исследования влияния неоновой газовой завесы на экранировку вольфрамовой мишени при воздействии на нее мощного потока водородной плазмы, а также сравнение эффективности азотной и неоновой газовой защиты.

Проектный центр ИТЭР представил ряд работ по диагностическим системам токамака

ITER. Был представлен обзор текущего этапа проектирования и обоснования технических решений, принятых для диагностики «Диверторный монитор нейтронного потока». Проект диагностики приближается к стадии изготовления, в обзоре обобщаются основные вызовы и предложенные пути их преодоления для обеспечения устойчивой работы диагностики по определению термоядерной мощности токамака ITER. Был также представлен обзор диагностической системы «Вертикальная нейтронная камера», предназначенной для измерения пространственного распределения интенсивности нейтронного источника. Разработка находится на завершающей стадии, начало изготовления начнется уже в этом году. Изготовлены и испытаны макеты критических элементов диагностической системы, включая алмазные детекторы и ионизационные камеры деления.

Были представлены основные результаты работ по проектированию, изготовлению и испытаниям компонент диагностики «Спектроскопия водородных линий», входящей в группу базовых диагностик, требуемых для запуска установки на этапе первой плазмы. Определены дальнейшие планы по разработке этой диагностики. Обсуждалась методика абсолютной калибровки нейтронного спектрометра на основе кристалла треххлористого лантана LaCl_3 , используемого в качестве монитора нейтронного потока D-D генератора нейтронов для *in-situ* калибровки нейтронных диагностик ITER. Сообщалось о результатах детального моделирования функции отклика ионизационных камер деления, использующихся в диагностической системе ITER «Диверторный монитор нейтронного потока»: построена модель с учетом реалистичной геометрии электродов и плотности нанесения материала, оценка корректности разработанной численной модели на эксперименте, построение амплитудного спектра, определение порога дискриминации, анализ калибровочного коэффициента диагностики. Экспериментальная проверка модели проводилась по результатам облучения камер деления быстрыми нейтронами источника на основе Am-Be.

Было проведено моделирование отклика нейтронного спектрометра в составе диагностики «Анализаторы атомов перезарядки

ITER». Проверен алгоритм восстановления ионной температуры по данным спектрометра. Результаты показывают, что для D сценариев поток недостаточен для точной работы алмазного детектора, но достаточен для D-T сценариев. Стилбенный детектор может быть перегружен в D-T сценариях. Для диагностической системы «Активная спектроскопия» с помощью моделирования изучено влияние эффекта гало и зависимости скоростного коэффициента возбуждения перехода от энергии взаимодействия атома пучка и иона плазмы на профиль спектральной линии активной перезарядки. Показано, что эти явления в некоторых случаях могут заметно влиять на точность измерения скорости вращения плазмы и температуры ионов.

Был представлен обзор результатов работ по системам сбора и обработки данных диагностических систем ITER, разрабатываемых в России. В проектной документации ITER определены требования к коэффициентам готовности (вероятность того, что система может выполнять свои функции в данный момент времени) лишь для групп параметров, для которых требования к отдельным диагностическим системам не определены. Между тем параметр может измеряться несколькими системами. Была разработана математическая модель и вычислительный алгоритм на ее основе. В результате расчетов оказалось возможным определить требования к конкретной диагностической системе.

НИЦ «Курчатовский институт» представил результаты верификации кода BTR, активно используемого для проектирования и инженерно-физического анализа систем нейтральной инжекции, в том числе для проекта ITER. Верификация потребовалась после ряда обновлений и расширений функциональности кода. Были проведены тесты двух видов: проверка корректности работы и исследование чувствительности моделей к входным данным. Также было проведено сравнение результатов работы кода с аналитическими решениями. Верификация показала, что при корректном использовании код BTR служит надежным инструментом детального анализа и оптимизации систем инжекции.

В НИЦ «Курчатовский институт» предложен алгоритм восстановления среднехордо-

вой электронной плотности для рефрактометрической диагностики ITER с использованием нейронных сетей. Для обучения нейронной сети использовались результаты расчетов измеряемых параметров с помощью синтетической диагностики в ожидаемых сценариях ITER. Показано, что для целевых разрядов максимальная среднеквадратичная ошибка не превышает 1 %, а время работы алгоритма составляет 150 нс, что меньше требуемого времени измерения 1 мс.

ИЯФ СО РАН ведет проектирование и интеграцию верхних диагностических портов № 02, № 08, № 07, экваториального диагностического порта № 11, а также проектные работы и изготовление части диагностик: «Вертикальная нейтронная камера», «Диверторный монитор нейтронного потока», «Анализатор атомов перезарядки». Большая часть работ к настоящему времени вышла на стадии подготовки к изготовлению и изготовления. Идет изготовление и сборка диагностических защитных модулей порта № 11, подготовка к изготовлению защитного модуля порта № 07. Начало изготовления элементов верхней «Вертикальной нейтронной камеры» запланировано в текущем году. Компоненты «Диверторного монитора нейтронного потока» также вышли на стадию изготовления.

Для обеспечения эффективной нейтронной защиты в портах ITER было предложено использовать керамику карбида бора B_4C . В ИЯФ СО РАН проведены тесты свойств серийно поставляемой для порта № 11 и порта № 07 спеченной керамики карбида бора. Результаты показали соответствие материала B_4C предъявляемым требованиям.

Разработана финальная конструкция опорных рам портов № 02 и № 08: доработаны трехмерные модели рам, проведены нейтронные расчеты для оценки остаточной дозы наведенной радиации, проведены расчеты напряжений в конструкции под действием механических и сейсмических нагрузок, подготовлен пакет документов для защиты финального проекта.

На установке БЭТА в ИЯФ СО РАН проведено исследование эрозии при импульсном нагреве керамик, считающихся перспективными для применения в качестве материала для изготовления защиты обращенных к

плазме компонентов термоядерных установок: W_4C в виде монолитного образца и покрытий, нанесенных на вольфрам, SiC , ZrB_2 , а также $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ в пропорциях 70:30 и 80:20.

В ИЯФ СО РАН продолжаются работы по инжекторам нейтральных атомов. Проведены работы по модернизации многоапертурного источника отрицательных ионов с генерацией плазмы с помощью ВЧ-разряда и поверхностно-плазменной генерацией отрицательных ионов водорода. Проведены испытания различных защитных экранов ВЧ-источника, исследованы тепловые режимы и условия стабильной работы ВЧ-разряда.

Был представлен доклад о статусе электронно-циклотронной системы ITER, в том числе гиротронов, разработанных и изготовленных в ИПФ РАН и НПП ГИКОМ.

В ФТИ РАН ведутся работы по диагностическим системам «Анализаторы атомов перезарядки» и «Томсоновское рассеяние в диверторе», а также по проектированию и интеграции нижнего порта № 08. По диагностике «Анализаторы атомов перезарядки» были представлены результаты, полученные в ходе разработки и испытаний системы визуального контроля качества обдирочных мишеней. Рассмотрена конструкция системы, продемонстрирована возможность визуального определения дефектов обдирочной мишени.

Несколько докладов были посвящены разным аспектам разработки диагностики Томсоновского рассеяния в диверторе. Был сделан общий обзор состояния работ по разработке диагностики, а также обзор состояния разработки крупногабаритных собирающих зеркал. Также было проведено моделирование транспорта примесных частей бериллия и бора в диагностическом канале для оценки степени загрязнения первого зеркала, исследована также скорость загрязнения первого зеркала. В еще одном докладе были представлены два типа актуаторов, разработанных для диагностики томсоновского рассеяния и предназначенных для функционирования внутри вакуумного объема: пьезодвигатель и биметаллический актуатор. Проведены расчеты устройства согласования мощности чистящего ВЧ-разряда, размещаемого в вакуумном объеме, оптимизирована трехмерная структура согласующего устройства.

Разработаны несущие конструкции для размещения оборудования диагностической системы «Томсоновского рассеяния» и «Монитора эрозии дивертора», их установки и фиксации в нижнем порту № 08. Разработаны макеты элементов фиксации передней рамы, испытан макет передней рамы для подтверждения технических решений по установке и фиксации ее на диверторных рельсах.

НИУ МЭИ представил несколько докладов, посвященных взаимодействию плазма-стенка. На созданной в НИУ МЭИ установке ПЛМ проводятся испытания материалов, перспективных для использования в качестве первой стенки. Установка оснащена оптической и зондовой системами диагностики плазмы. Были приведены результаты оптических и зондовых измерений. Был представлен метод исследования структуры покрытий, содержащих бор и другие легкие включения, на микронных глубинах с помощью спектроскопии отраженных электронов. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии было исследовано изменение плазмонных возбуждений в углероде и вольфраме в результате воздействия плазмы на поверхность. Была построена аналитическая модель процесса взаимодействия легких ионов со слоисто-неоднородными поверхностями. Теория используется для интерпретации экспериментов по отражению ионов от слоисто-неоднородных мишеней, выполненных на большом масс-монокроматоре МИФИ.

Участниками конференции из НИИЭФА было предложено использовать опыт разработки и изготовления сильноточной коммутирующей аппаратуры для ITER при проектировании токамака с реакторными технологиями (ТРТ): аппаратов оперативной коммутации тока и быстрого вывода энергии, систем контроля и измерения токов и напряжений, шинопроводов, заземления, системы управления. В частности, было предложено разработать универсальный коммутационный комплекс системы питания электромагнитной системы ТРТ.

В докладе из ИПМ РАН был рассмотрен процесс потери сверхпроводимости и перехода в нормальную фазу на участке высокотемпературного сверхпроводящего кабеля. Предложена численная модель процесса, проведено численное моделирование.

В Проектном центре ИТЭР были выполнены работы для проекта ТРТ. Проведены расчеты ядерно-радиационных нагрузок на конструктивные элементы ТРТ, а также нейтронных полей в местах расположения диагностик для модели токамака ТРТ. Расчеты проведены с использованием кода OpenMC. Там же проведена разработка системы диагностики высокоэнергичных атомов перезарядки на основе алмазных спектрометрических детекторов. Определено размещение этой системы в камере ТРТ, проведены оценки ожидаемых спектров.

Рассмотрены подходы к проектированию автоматизированных информационно-управляющих систем ТРТ на основе опыта разработки и внедрения на передовых установках типа токамак.

Рассмотрены требования к управлению документацией при проектировании и строительстве больших термоядерных установок. Высказано мнение, что для обеспечения управления проектом в полном объеме нужно уже на начальной стадии проекта внедрить систему управления жизненным циклом продукта и всей документацией (PLM). Определены требования к единой системе PLM, проанализированы доступные отечественные PLM-решения.

Работа сессии была успешной. Она показала существенный прогресс в научно-исследовательских и конструкторских работах в поддержку проектов ИТЕР и ТРТ.

Заключение

1. LI 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 51-й раз и собрала на свои заседания 1245 участников из научных центров России и других стран. Среди участников были представители 58 российских организаций и 6 иностранных научных центров.

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 ИТЕР.

3. Ежегодно происходящий обмен информацией и опытом между учеными России, стран дальнего и ближнего зарубежья способствует установлению и поддержанию научных контактов между научными центрами, занимающимися близкими проблемами. Это подтверждается работами, совместно выполненными сотрудниками российских и некоторых зарубежных научных центров.

4. Уровень экспериментальных исследований, выполненных российскими учеными на крупных российских установках в области магнитного удержания горячей плазмы, заметно повысился в результате ввода новых и модернизированных установок.

5. Важную роль в развитии исследований по физике плазмы в России играет комплексная программа 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 и физике плазмы подпрограмма «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий». Эта программа разработана в ГК РОСАТОМ при участии ведущих российских научных центров, финансируется как государственной корпорацией, так и государственным бюджетом РФ. Программа в значительной части стимулирует развитие ядерной энергетики и ядерных технологий и их применение в экономике России.

6. В результате реализации программы международного проекта ИТЕР, 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, включающую программу подготовки научных и инженерных кадров.

7. Современный мировой уровень лазерно-плазменных исследований требует создания нескольких крупных лазерных центров России с мультитераваттными лазерными системами

для решения проблемы ЛТС и смежных задач. Также целесообразно создать в крупных университетах России сеть лазерных установок с субпетаваттной мощностью, на которых было бы возможно проверять новые идеи и экспериментальные схемы, проводить отработку новых диагностик, вести эффективную подготовку научных кадров. Так эффективно работают научные программы технологически развитых стран Европы, Японии, Китая и США.

Оргкомитетом конференции издана книга «LI Международная Звенигородская конфе-

ренция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» Сборник тезисов докладов. – М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. 316 с. ISBN 978-5-6042115-1-9. Материалы конференции также размещены на сайте конференции http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/LI/Zven_LI.html.

ЛИТЕРАТУРА

1. «LI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» 18–22 марта 2024 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. – М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. – 316 с. ISBN 978-5-6042115-1-9.
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/LI/Zven_LI.html

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

Status and prospects for development of research in the field of plasma physics and controlled fusion in Russia (review of results of the LI International (Zvenigorod) Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, March 2024)

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

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

² National Research Nuclear University “MEPHI”
37 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

The review is given of the most interesting new results presented at the LI International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, which was held in Zvenigorod, Moscow region, on March 18–22, 2024. The basic achievements in the field of plasma physics in Russia are analyzed and compared with the results of foreign scientific research.

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

REFERENCES

1. Proceedings of the LI International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Zvenigorod, Russia, March 18–22, 2024. ISBN 978-5-6042115-1-9 (Published by PLAZMAIOFAN Co Ltd., 2024) [in Russian].
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/LI/Zven_LI.html