

**Статус исследований по физике плазмы
и управляемому термоядерному синтезу в России в 2019 году**

(Обзор материалов XLVII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу», 16–20 марта 2020 г.)

И. А. Гришина, В. А. Иванов

Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на ежегодной XLVII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся с 16 по 20 марта 2020 года в городе Звенигороде Московской области. Проведен анализ развития и достижений основных направлений исследований в области физики плазмы в России и их сравнение с работами за рубежом.

Ключевые слова: физика плазмы, термоядерный синтез, низкотемпературная плазма, высокотемпературная плазма, плазменные и микроволновые технологии, конференция, результаты.

Ссылка: Гришина И. А., Иванов В. А. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 2. С. 89.

Reference: I. A. Grishina and V. A. Ivanov, Usp. Prikl. Fiz. **8** (2), 89 (2020).

Введение

XLVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде со 16 по 20 марта 2020 года. На конференции было представлено 225 научных докладов из 65 российских и 16 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее количество авторов докладов составило более 700 человек.

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

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

¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (ИОФРАН).

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.

Статья поступила в редакцию 14 мая 2020 г.

© Гришина И. А., Иванов В. А., 2020

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

1. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия – 47;

2. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия – 30;

3. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия – 23;

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

5. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия – 19;

6. Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия – 16;

7. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия – 15;

8. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия – 15;

9. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Административный округ Троицк, Москва, Россия – 14;

10. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия – 12;
11. Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия – 12;
12. Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия – 12;
13. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, С.-Петербург, Россия – 12;
14. Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия – 10;
15. Российский университет дружбы народов, Москва, Россия – 10;
16. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия – 9;
17. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия – 7;
18. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия – 7;
19. Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия – 5;
20. НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва Россия – 4;
21. Институт радиотехники и электроники РАН им. В. А. Котельникова, Фрязинский филиал, г. Фрязино, Россия – 4;
22. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ технической физики им. академика Е. И. Забабахина, г. Снежинск, Россия – 3;
23. Исследовательский центр им. М. В. Келдыша, Москва, Россия – 3;
24. Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия – 2;
25. Институт механики МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия – 2;
26. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия – 2;
27. Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия – 2;
28. Институт химии растворов РАН им. Г. А. Крестова, г. Иваново, Россия – 2;
29. Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия – 2;
30. Казанский (Приволжский) Федеральный университет, г. Казань, Россия – 2;
31. Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, С.-Петербург, Россия – 2;
32. Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург, Россия – 2;
33. Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир, Россия – 1;
34. Центр фундаментальных и прикладных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия – 1;
35. АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара», Москва, Россия – 1;
36. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия – 1;
37. Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Россия – 1;
38. Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д. К. Беляева, г. Иваново, Россия – 1;
39. Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия – 1;
40. Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва, Россия – 1;
41. Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия – 1;
42. Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия – 1;
43. Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, г. Черноголовка, Россия – 1;
44. Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия – 1;
45. Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия – 1;
46. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, Москва, Россия – 1;
47. Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина, РАН, Москва, Россия – 1;
48. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, С.-Петербург, Россия – 1;

49. АО «Красная Звезда», Москва, Россия – 1;

50. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия – 1;

51. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия – 1;

52. Российский технологический университет МИРЭА, Москва, Россия – 1;

53. Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия – 1;

54. Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия – 1;

55. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия – 1;

56. Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия – 1;

57. Федеральный центр двойных технологий «Союз», г. Дзержинский, Московская область, Россия – 1;

58. АО Спектрал-Тех, С.-Петербург, Россия – 1;

59. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия – 1;

60. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия – 1;

61. Федеральный научный центр гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана Роспотребнадзора, Москва, Россия – 1;

62. Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия – 1;

63. Центральный научно-исследовательский институт машиностроения Роскосмоса, г. Королев, Россия – 1;

64. Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского, Москва, Россия – 1;

65. Южный Федеральный Университет, г. Ростов-на-Дону, Россия – 1.

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

1. ELI-Beamlines, Institute of Physics, Academy of Science, Prague, Czech Republic – 2;

2. Astro Fusion Spectre, LLC, San Diego, USA – 1;

3. Cornell University, Ithaca, New York, USA – 1;

4. Edinburgh Napier University, Edinburgh, United Kingdom – 1;

5. ESTLA Ltd., Tartu, Estonia – 1;

6. Institute of Interfacial Process Engineering and Plasma Technology IGVP, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany – 1;

7. ITER Organization, St Paul lez Durance, France – 1;

8. Plasma Physics Lab, Royal Military Academy, Brussels, Belgium – 1;

9. Rutherford Appleton Laboratory, Harwell, Oxfordshire, UK – 1;

10. Ghent University, Ghent, Belgium – 1;

11. University of Jyväskylä, Jyväskylä, Finland – 1;

12. Université de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy, France – 1;

13. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada – 1;

14. Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany – 1;

15. Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь – 1;

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

Основная часть

На конференции были заслушаны доклады по шести 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.

6. Компьютерное моделирование плазмофизических процессов

На конференции состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 15 обзорных докладов. В этих докладах

подводились итоги работ, выполненных за последний год в области физики высокотемпературной плазмы, управляемого термоядерного синтеза, низкотемпературной плазмы, и прикладных работ по плазменным и лучевым технологиям. Были также представлены доклады по смежным с физикой плазмы проблемам. Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 64 устных и 146 стендовых докладов.

В связи с 90 годовщиной со дня рождения академика В. Д. Шафранова участники конференции почтили его память. Как отмечалось в докладе **М. Ю. Исаева** (НИЦ «Курчатовский институт»), Виталий Дмитриевич Шафранов был выдающимся физиком-теоретиком, одним из основателей физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в России и в мире. Он также внес большой вклад в развитие физики ускорителей. В. Д. Шафранов является автором уравнения равновесия (уравнение Грэда-Шафранова), на основе которого рассчитаны и построены около 300 токамаков во всем мире, включая сооружаемый в настоящее время во Франции крупнейший экспериментальный токамак-реактор ИТЭР. Среди более 200 публикаций В. Д. Шафранова следует отметить ряд фундаментальных обзоров в замечательной серии книг «Вопросы теории плазмы», которые стали настольными учебниками для нескольких поколений советских и зарубежных физиков. Особый интерес В. Д. Шафранов проявлял к оптимизированным стеллараторным системам. Виталия Дмитриевича Шафранова знают, ценят и помнят во всем термоядерном мировом сообществе. Его уравнения, по словам академика Б. Б. Кадомцева, останутся в физике на века.

В июле 2020 года исполнится 90 лет со дня рождения выдающегося ученого в области физики плазмы Анри Амвросьевича Рухадзе. О его неограниченном вкладе в науку рассказывалось в докладе **В. А. Иванова** (ИОФ РАН). В докладе отмечалось, что имя А. А. Рухадзе неразрывно связано с электродинамикой материальных сред с пространственной и временной дисперсией, физикой плазмы и релятивистской СВЧ электроникой. Анри Амвросьевичем были заложены основы новой области физики плазмы – физики излучающего газового разряда. На основе развитой тео-

рии таких разрядов были созданы эффективные газоразрядные источники света для энергетической накачки мощных лазеров. А. А. Рухадзе по праву считается создателем релятивистской плазменной СВЧ электроники. Им совместно с его учениками – теоретиками и экспериментаторами – были не только развиты теоретические основы этой области науки, но и реализованы уникальные плазменные источники когерентного электромагнитного излучения. Многочисленные ученики, соратники и последователи Анри Амвросьевича Рухадзе продолжают научные исследования по заложенным и созданным им научным направлениям.

Обзор новых результатов термоядерных исследований, проведенных в европейских научных центрах был дан в докладе **Дж. Онгена** (Королевская военная академия Бельгии, Брюссель). Доклад был представлен удаленно. На токамаке JET (Евросоюз, Великобритания) идет подготовка к будущим экспериментам с тритиевой и дейтерий-тритиевой плазмой (экспериментальная компания DTE2). Целью кампании DTE2 является получение стационарного режима работы при мощности термоядерных нейтронов $P_{\text{fus}} = 15$ МВт и длительности 5 секунд. Кампания DTE2 должна также продемонстрировать возможность электронного нагрева центральной области плазмы в токамаке JET альфа-частицами, возникающими в результате термоядерных реакций с суммарной мощностью до 3 МВт. Планируется два сценария получения такого стационарного режима удержания D-T плазмы в токамаке JET. В обоих сценариях используется режим улучшенного удержания плазмы (H-mode), для реализации которого требуется высокая мощность дополнительного нагрева плазмы. В докладе также был представлен обзор результатов, полученных на стеллараторе Wendelstein 7-X. Этот крупнейший в мире стелларатор был разработан с целью получения хорошего удержания энергии и быстрых ионов, в горячей плазме при следующих параметрах плазмы: температуры электронов и ионов близки и составляют $T_i = T_e \sim 6$ кэВ, плотность плазмы превышает значение $n_e > 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и средняя величина отношения давления плазмы к давлению удерживающего магнитного поля $\langle \beta \rangle \sim 5\%$. Отмечалось, что демонстрация режима работы стелларатора в

режиме «divertor plasma detachment» (режим с отрывом диверторной плазмы от диверторных пластины) при достаточно высокой плотности плазмы стала важным результатом последней кампании Wendelstein 7-X. Этот результат дает надежду на возможность реализации в будущем интегрированного сценария, позволяющего совместить высокий уровень мощности нагрева плазмы и приемлемые тепловые нагрузки на компоненты установки.

Доклад **Л. Н. Химченко и А.В. Красильникова** (Проектный центр ИТЭР) был посвящен ходу сооружения крупнейшего токамака ИТЭР, создаваемого международным сообществом в составе семи стран участниц (Китай, Европейский союз, Индия, Япония, Корея, Россия и США). В докладе было отмечено, что выполнено 66 % работ по сооружению инфраструктуры и изготовлению систем установки ИТЭР. Достигнут важный этап строительства – возведено перекрытие над шахтой сборки токамака. Следующая ближайшая задача – завершить сооружение трех центральных зданий – блок токамака, блок тритиевого комплекса и блок диагностик, составляющих единое целое, т. н. «Tokamak complex». Это позволит параллельно с созданием комплексов подвода электрической энергии, отвода тепла, создания защитных модулей, кабельных трасс и др. начать сборку самой установки. Из ста ключевых этапов работ, т. н. «IC milestones» к концу 2019 года выполнено сорок два. Завершаются работы по первым поставочным системам для сборки токамака – секторы № 6 и № 7 вакуумной камеры (поставщик Корея) с верхними патрубками (поставщик Россия), тороидальные катушки сектора № 12 (поставщик Япония). Нижняя полоидальная катушка сектора (ответственный поставщик Евросоюз, по его заказу изготавливается в Китае) и модуль № 1 центрального соленоида (поставщик США) проходят электрические испытания. Завершены работы по нижней половине криостата (поставщик Индия), внутри которого будет происходить сборка токамака. Завершаются работы по монтажу механизмов сборки частей вакуумной камеры, катушек тороидального поля и тепловой защиты в единый сектор.

О работах, проводимых коллективом Института ядерной физики СО РАН, по созданию высоковольтного нагревного инжектора

пучка нейтральных атомов большой энергии рассказывалось в докладе **О. З. Сотникова** (ИЯФ СО РАН). Работа инжектора основана на ускорении и перезарядке пучка отрицательных ионов водорода в плазменной мишени. Проектная мощность инжектора 0,5–1 МВт. В докладе было дано детальное описание компонент инжектора и подведены итоги первого этапа работ по сооружению испытательного стенда мощностью 1 МВ. Отмечалось, что в 2019 г. был осуществлен физический пуск инжектора с испытанием его основных компонент. Был получен и проведен через пучковый тракт на вход ускорительной трубки пучок отрицательных ионов водорода с полным током 1 А и энергией 80 кэВ. Планируется в начале 2020 г. провести эксперименты по дополнительному ускорению пучка и его транспортировке через поворотный магнит на вход рекуператора. Также был дан обзор результатов других работ, ведущихся в ИЯФ СО РАН в рамках программы высоковольтного инжектора. Это разработка и создание высокоэффективного плазменного нейтрализатора пучка, а также изучение возможности создания фотонного нейтрализатора пучка ускоренных отрицательных ионов.

В докладе **С. В. Мирнова** (ТРИНИТИ) было проанализировано на первый взгляд необъяснимое явление, наблюдаемое в лабораторных токамаках. Оказывается, что, по мере увеличения толщины бериллиевой (Be) фольги в системах регистрации мягкого рентгеновского излучения (МРИ) и уменьшения электронной плотности плазмы, наблюдается активное снижение интенсивности МРИ плазмы токамака, прошедшего через Be фольги. Было предложено объяснение этого явления путем привлечения предположения об «обеднении» максвелловского распределения в пространстве электронных скоростей, превышающих в 3–5 раз тепловую скорость электронов плазмы. Отмечалось, что в качестве вероятной причины такого «обеднения» наиболее убедителен постулируемый в токамаках аномальный перенос электронного тепла вдоль слабо возмущенного тороидального магнитного поля (модель «магнитного флаттера»). Тем самым, т. н. «рентгеновская яма» может превратиться в активный инструмент изучения физической природы аномального электронного переноса в токамаках. Обсужда-

лись и другие возможные проявления продольного электронного переноса в токамаках и стеллараторах, в частности, падение времени жизни плазмы и деградация электрического потенциала плазмы при электронном циклотронном резонансном нагреве (ЭЦР-нагреве).

В обзорном докладе **А. Ю. Попова и Е. З. Гусакова** (ФТИ РАН) рассматривались нелинейные явления, наблюдаемые на различных установках в экспериментах по ЭЦР-нагреву плазмы на второй гармонике гирочастоты электронов. Эти явления возникают вследствие развития низкопороговых параметрических распадных неустойчивостей. К таким явлениям относятся аномальное обратное рассеяние, аномальный нагрев ионов, аномальное поглощение СВЧ-волны нагрева, уширение профиля поглощенной мощности и другие процессы. Для объяснения этих явлений была разработана теоретическая модель, которая учитывает немонотонность радиального профиля плотности плазмы в тороидальных установках, которая может усиливаться из-за наличия магнитного острова, развития эффекта понижения плотности плазмы в центре плазменного шнура тороидальной установки, т. н. эффект «density-pump-out», или возникновения локализованных на границе плазмы колебательных мод (ELMs). В рамках этой модели генерация сигнала обратного рассеяния и аномальный нагрев ионов интерпретируются как результат вторичных нелинейных процессов, которые возникают в результате каскада последовательных распадов X-волны микроволнового излучения, используемого для ЭЦР-нагрева плазмы в магнитных ловушках. В докладе также были представлены результаты теоретического анализа аномального поглощения СВЧ-волны в стеллараторах L-2M и W-7X, где наблюдается уширение профиля поглощенной мощности и аномальное обратное рассеяние.

Удержание энергии в плазме сферических токамаков Глобус М и Глобус М2 рассматривалось в обзорном докладе коллектива авторов из ФТИ РАН, представленном **Г. С. Курскиевым**. В токамаке Глобус-М, имеющем диверторную магнитную конфигурацию, были проведены эксперименты по нагреву плазмы пучком атомов, при токе плазмы $I_p = 0,12-$

$0,25$ МА и тороидальном магнитном поле $B_T = 0,25-0,5$ Тл. Анализ полученных данных показывает, что зависимости времени удержания энергии от тороидального магнитного поля и тока разряда в сферическом токамаке Глобус-М значительно отличаются от зависимостей, предсказываемых скейлингом IPB98(y.2). Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что увеличение тороидального магнитного поля оказывает значительное влияние на термоизоляцию плазмы. Главным образом это происходит в результате уменьшения аномального переноса тепла в электронном канале, в то время как ионная теплопроводность находится на уровне, соответствующем предсказаниям неоклассической теории во всем диапазоне рабочих параметров установки Глобус-М. Первые эксперименты по исследованию дополнительного нагрева плазмы токамака Глобус-М2 пучком атомов проводились при более высоких значениях тока плазмы и тороидального магнитного поля по сравнению с токамаком Глобус-М: $I_p = 0,25-0,3$ МА и $B_T = 0,7-0,8$ Тл. При инжекции пучка дейтерия мощностью 0,8 МВт с энергией частиц 28 кэВ в плазму токамака Глобус-М2 наблюдалось более чем двукратное увеличение полной запасенной энергии плазмы по сравнению с результатами, полученными на Глобусе-М.

Планы развития исследований в области магнитных ловушек с линейной конфигурацией в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН были представлены в докладе **П. А. Багрянского** (ИЯФ СО РАН). Отмечалось, что в настоящее время в ИЯФ СО РАН развивается проект нового поколения магнитной ловушки открытого типа с линейной осесимметричной конфигурацией (Газодинамической Многопробочной Ловушки – ГДМЛ). Целью проекта является отработка технологий, необходимых для реализации ряда термоядерных приложений таких систем: от мощных нейтронных источников до энергетического реактора, способного работать с различными видами топлива, не содержащими радиоактивный тритий и обладающими неограниченным ресурсом добычи. Предполагается, что ГДМЛ будет иметь модульную структуру, позволяющую оперативно переконфигурировать магнитную систему для

отработки технологий удержания высокотемпературной плазмы как в нейтронных источниках различного назначения, так и в диамагнитной ловушке. Предполагается, что магнитная система установки будет сверхпроводящей с магнитной индукцией до 3 Тл в центральной плоскости ловушки и более 12 Тл в магнитных пробках, что вместе с инжекцией пучков нейтральных атомов мощностью 10 МВт с энергией частиц 30–40 кэВ при длительностью импульса секундного диапазона должно обеспечить полностью стационарные условия удержания термоядерной плазмы.

Особенностям развития положительной длинной искры в воздухе был посвящен доклад **Н. А. Попова** (Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ) и **Э. М. Базеляна** (АО «Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского»). Отмечалось, что ступенчатое развитие искрового разряда свойственно воздушным промежуткам с резко неоднородным распределением электрического поля. Механизм формирования ступеней положительного лидера до сих пор остается непонятным, хотя существование самих ступеней сомнений не вызывает. Они наблюдались в лабораторных промежутках длиной до 15 м при импульсах напряжения с длительностью фронта в сотни и тысячи микросекунд. В докладе были представлены результаты численного моделирования искрового разряда в длинном воздушном промежутке атмосферного давления при положительном напряжении с большой длительностью фронта, исключаящей квазинепрерывное развитие разрядного лидера. Было показано, что при крутизне фронта импульсного напряжения dU/dt менее 30 кВ/мкс по промежутку движется волна ионизации, скорость которой на 1–2 порядка меньше минимальной скорости стримеров в воздухе при нормальных условиях. Электрическое поле за фронтом такой волны по всей длине сформированного первичного канала удерживается в пределах 20–22 кВ/см, обеспечивая плотность электронов на уровне 10^{11} – 10^{12} см⁻³ в течение сотен микросекунд. Состояние газа в первичном канале резко меняется при распространении возмущающего полевого воздействия наносекундной длительности. Пробег возмущения до головной части первичного канала инициирует развитие от нее стримерной вспышки с началь-

ной скоростью $\sim 10^9$ см/с, что приводит к резкому усилению яркости излучения из канала. Причиной усиления излучения является активная наработка электронно-возбужденных частиц.

Большой интерес вызвал доклад **Б. Б. Зеленера** (ОИВТ РАН), посвященный свойствам ультрахолодной плазмы. Отмечалось, что с развитием методов лазерного охлаждения и пленения атомов в магнитооптической ловушке (МОЛ), а также в дипольной и магнитной ловушках, открылась возможность изучения взаимодействий в газе нейтральных и высоковозбужденных атомов различных элементов. При этом важно, что охлаждение частиц реализуется в плазме в условиях глубокого вакуума при температурах ниже 10 мК при наличии или отсутствии квантового вырождения. Появление специальных лабораторий в международной научном центре CERN позволило приступить к созданию и изучению атомов антиводорода при помощи торможения антипротонов в магнитном поле и столкновительного охлаждения с позитронным газом с последующим захватом атомов антиводорода в квадрупольную магнитную ловушку. В результате исследований впервые была получена и исследована стационарная ультрахолодная плазма, возбуждаемая в непрерывном режиме. Этот режим позволяет проводить такие исследования, которые недоступны для плазмы, создаваемой при помощи лазерных импульсов наносекундной длительности. По доплеровскому уширению спектра флюоресценции охлажденных ионов была измерена температура ионов в зависимости от начальной температуры электронов. Также было измерено время разлета облака ионов кальция (Ca^{40}), полученных в результате создания плазмы в МОЛ. По времени разлета была дана оценка коэффициента диффузии.

В численных расчетах, использующих метод молекулярной динамики, были получены коэффициенты диффузии, проводимости, теплопроводности и сдвиговой вязкости для неравновесной ультрахолодной плазмы с различной зарядностью ионов (от значения электрического заряда равного единицы до трех).

Доклад **В. Ф. Тарасенко с соавторами** (ИСЭ СО РАН) был посвящен диффузным

разрядам высокого давления, которые формируются в неоднородном электрическом поле за счет убегающих электронов. Были приведены результаты экспериментальных исследований пучков убегающих электронов, генерируемых в различных газах высокого давления, а также показана роль убегающих и быстрых электронов при формировании диффузных разрядов в неоднородном электрическом поле. Были представлены оптимальные условия для получения пучков убегающих электронов с максимальными амплитудами. Анализировалось влияние различных факторов на амплитуду, длительность тока пучка и энергию убегающих электронов. Было продемонстрировано, что генерация быстрых и убегающих электронов обеспечивает формирование диффузных разрядов при высоких давлениях в отсутствие дополнительного источника для предыонизации промежутка. Установлено, что диффузные разряды формируются за счёт широких стримеров при обоих полярностях импульса напряжения.

Обзорный доклад **Г. Гриттани** (ELI-Beamlines, Prague, Czech Republic) позволил участникам конференции получить представление о некоторых направлениях исследований, проводимых в новом крупнейшем в Европе центре лазерных исследований ELI-Beamlines в Праге. Доклад был сделан удаленно. Отмечалось, что Европейский проект Extreme Light Infrastructure (ELI) посвящен исследованию взаимодействия коротких лазерных импульсов релятивистской интенсивности с веществом. Г. Гриттани представил научную программу ELI-ELBA, посвященную экспериментальному исследованию различных фундаментальных научных проблем с использованием комбинации лазеров петаваттной и субпетаваттной мощности, которые имеются в распоряжении на исследовательской установке ELI-Beamlines. В основе получения ультра-релятивистских электронных пучков лежит ускорение электронов в плазме при генерации лазерной кильватерной волны, что позволяет достичь ультра-релятивистских энергий электронов на небольших расстояниях с использованием очень высоких ускоряющих градиентов (>100 МэВ/мм). В проекте ELI-ELBA проводятся эксперименты по изучению новых режимов взаимодействия элект-

ромагнитного поля с материей и квантовым физическим вакуумом. Эти режимы создаются при встречном взаимодействии электронного пучка с энергией несколько ГэВ и лазерных импульсов с высокой интенсивностью более 10^{20} Вт/см². Для получения стабильных воспроизводимых электронных пучков исследуются различные методы инжекции электронов в релятивистскую плазменную волну. Среди исследованных методов наилучшие результаты были получены при «ударной ионизационной инжекции» (shock assisted ionization injection). Эксперименты ELI-ELBA, проводимые с помощью лазерных систем тераваттной мощности, представляют интерес с точки зрения междисциплинарных приложений, например, для визуализации изображений в медицине и радиобиологии в интересах неинвазивного контроля.

Вопросам генерации, распространения и применения рентгеновского излучения плазмы твердотельной плотности, создаваемого при ее облучении ультракороткими импульсами лазеров большой интенсивности, был посвящен доклад **С. А. Пикуза** (ОИВТ РАН, НИЯУ МИФИ). Отмечалось, что в экспериментах по взаимодействию пико- и фемтосекундных лазерных импульсов релятивистской интенсивности, превышающей 10^{21} Вт/см², лазерная энергия эффективно конвертируется в рентгеновское излучение, возникающее при рассеянии горячих электронов в созданной плазме. В свою очередь, интенсивное рентгеновское излучение воздействует на окружающее вещество, приводя к ионизации внутренних оболочек атомов, и обеспечивая высокую концентрацию экзотических зарядовых состояний, т. н. состояний «полых ионов». В перспективе, использование рентгеновского излучения ультрарелятивистской лазерной плазмы открывает путь к исследованию состояний вещества с доминирующей ролью радиационных процессов. Кроме того, совместное воздействие рентгеновского излучения и потока быстрых электронов прогревает окрестности фокального лазерного пятна и внутренние слои мишени до состояния плотного нагретого вещества (Warm Dense Matter). В докладе был сделан обзор недавних экспериментальных работ и результатов по генерации интенсивного рентгеновского излучения и изучению порождаемых им явлений в лазер-

ной плазме твердотельных мишеней.

Вопросам генерации сильных магнитных полей в лазерной плазме был посвящен доклад **Ф. А. Корнеева** (НИЯУ МИФИ, ФИАН). Автор подчеркнул, что масштаб величины квазистационарных магнитных полей доступных в условиях лаборатории при использовании импульсных генераторов тока в неразрушающем режиме, ограничен величиной магнитной индукции в десятки Тесла. Использование оптических схем генерации магнитного поля позволяет миниатюризировать активную часть генераторов и работать с ними в режиме однократного применения, соответствующего стандартному режиму работы мощных лазерных установок. При этом большая плотность энергии лазерного излучения позволяет достигать величин индукции магнитного поля в ограниченной пространственной области до тысячи Тесла и более. Ключевым параметром при использовании лазерных генераторов магнитного поля оказывается важным отношение длины разрядного импульса тока к длине разрядной катушки, определяющее степень стационарности процесса генерации поля. Длительность существования индуцированного магнитного поля важна и для возможных технологических приложений. При некоторых условиях время жизни лазерно (оптически) индуцированных магнитных полей может на порядки превышать длительность импульса лазерного излучения. В докладе рассматривались основные схемы лазерной генерации магнитных полей и соответствующие ключевые физические процессы, в частности, генерация импульса тока в мишенях разрядного типа и орбитальное ускорение электронов лазерным импульсом в разреженной плазме. Были представлены теоретические и экспериментальные результаты по оптической генерации сильных магнитных полей. В соответствии с параметрами индуцированных полей рассмотрена возможность их использования в приложениях и фундаментальных исследованиях.

Секционные доклады

Секция «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы»

На заседаниях секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы» (председатель секции – А. И. Мещеряков) было представлено 52 доклада (из них 11 на устных и 41 на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками 17 российских научных центров, 1 доклад выполнен в сотрудничестве с научным центром Беларуси.

В докладах были представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований, проводимых на действующих в России установках с магнитным удержанием плазмы, таких как токамаки Глобус-М2, Т-11М, ФТ-2, стелларатор Л-2М, открытые ловушки ГДЛ, ГОЛ-3 и СМОЛА. Так же были представлены доклады, посвященные обработке экспериментальных результатов, полученных ранее на токамаке Т-10, который был демонтирован в 2018 году.

Большой интерес вызвали доклады посвященные исследованиям на крупнейшем в России (по такому параметру как объем плазмы) сферическом токамаке Глобус-М2. Этот токамак вступил в строй в 2019 году после значительной модернизации магнитной системы установки, в результате которой удалось увеличить магнитное поле в 1,5 раза, с 0,5 до 0,75 Тл. Тем самым, эксперименты на токамаке Глобус-М2 вышли на уровень магнитных полей, не достигнутых пока на других сферических токамаках, действующих в настоящее время в мире: это токамаки MAST (Великобритания) и NSTX (США). Наиболее важным направлением данных исследований является исследование удержания накопленной энергии плазмы в сферическом токамаке. Скейлинг для сферических токамаков, то есть зависимость энергетического времени жизни от параметров плазмы в установке, существенно отличается от скейлингов для традиционных тороидальных токамаков с большим отношением большого радиуса к малому радиусу тора 3 и более. В скейлингах токамаков энергетическое время жизни плазмы пропорционально величине индукции удерживающего магнитного B в степени α (B^α). Для сферических токамаков $\alpha = 1,1-1,4$, в то время как для традиционных токамаков $\alpha = 0,15$. Кроме того, время жизни запасенной в плазме энергии пропорционально электрическому плазменному току, который линейно

зависит от величины магнитного поля. Таким образом, в сферическом токамаке увеличение магнитного поля и, соответствующий рост тока, протекающего по плазме, приведут к значительно большему увеличению энергетического времени жизни плазмы, чем аналогичное увеличение магнитного поля в обычном токамаке. Представленные на секции доклады демонстрируют значительный прогресс в экспериментальных работах на сферическом токамаке Глобус-М2.

Продолжается обработка и осмысление экспериментальных данных, ранее полученных на токамаке Т-10. Так в докладе **Ю. Н. Днестровского** «Сравнение ЭЦР-нагрева в токамаке Т-10 на первой и второй гармониках» представлен сравнительный анализ экспериментов по ЭЦР нагреву СВЧ-излучением с использованием обыкновенной моды на первой гармонике и необыкновенной моды на второй гармонике электронной циклотронной частоты. В экспериментах на Т-10 было обнаружено, что эффективность нагрева на второй гармонике существенно ниже, чем на первой. С использованием двух транспортных моделей анализировался нагрев плазмы СВЧ-излучением на обеих гармониках. Для анализа СВЧ-нагрева на второй гармонике решалась обратная задача определения профиля поглощенной мощности по профилю экспериментальной температуры электронов. Это позволило определить, как профиль поглощенной мощности, так и долю поглощенной мощности по отношению к вложенной в плазму СВЧ-мощности. Анализ показал, что при средних электронных плотностях $n < 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ СВЧ-нагрев на первой гармонике радикально отличается от нагрева на второй гармонике. При этом в последнем случае оказалось, что не вся вложенная СВЧ-мощность поглощается в плазме.

Продолжаются исследования, проводимые на открытых ловушках в ИЯФ СО РАН. Наиболее интересными из них представляется исследование винтового удержания плазмы в открытой ловушке, и теоретическое исследование режима динамического удержания в линейной осесимметричной ловушке. Теоретически предсказана экспоненциальная зависимость эффективности подавления потерь от длины участка с винтовым полем, приводящая к существенному повышению эффективного

пробочного отношения в открытой ловушке.

Проверка данной концепции проводится на установке СМОЛА в ИЯФ СО РАН. Ранее была показана принципиальная возможность подавления потока плазмы вдоль оси ловушки с помощью винтовой магнитной пробкой. В докладе **А. В. Судникова** «Основные эмпирические зависимости эффективности винтового удержания в винтовой магнитной ловушке» приведен анализ последних экспериментальных результатов, полученных на установке СМОЛА. Экспериментальные скейлинги показывают рост эффективности удержания при независимом повышении среднего пробочного отношения, увеличении скорости вращения и росте ведущего магнитного поля.

Режим динамического удержания в осесимметричной открытой ловушке возникает тогда, когда диамагнитные токи плазмы большого давления уменьшают внутреннее магнитное поле (в пределе до величин, близких к нулю). При ослаблении локального магнитного поля растёт эффективное пробочное отношение ловушки (в пределе – до очень больших значений), а значит, должно увеличиваться продольное время жизни. Магнито-гидродинамические модели предсказывают существенное увеличение времени удержания плазмы и накопленной в плазме энергии в осесимметричной открытой ловушке при переходе в режим диамагнитного удержания по сравнению с режимом газодинамической ловушки. В докладе **И. С. Черноштанова** рассматривались механизмы удержания и времени жизни частиц в осесимметричной открытой ловушке в режиме диамагнитного удержания. Найдена аналитическая оценка для времени жизни пролетных частиц. Показано, что время удержания плазмы в диамагнитной ловушке в режиме газодинамического вытекания плазмы (время жизни пролетной частицы превышает время кулоновского рассеяния) как минимум в a/ρ раз превышает время газодинамического вытекания из вакуумного магнитного поля, здесь a – радиус диамагнитного «пузыря» и ρ – ионный ларморовский радиус, рассчитанный по вакуумному магнитному полю.

Одно из основных направлений исследований на стеллараторе Л-2М – это исследование удержания накопленной в плазме энергии в условиях рекордно высоких, для тороидаль-

ных ловушек, удельных мощностях СВЧ-нагрева плазмы в режиме электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). В докладе **А. И. Мещерякова** «Динамика удержания энергии и функции распределения электронов по энергии в области ЭЦР-нагрева при мощностях нагрева до 1 МВт на стеллараторе Л-2М» приведены результаты экспериментов с рекордно высокой удельной мощностью нагрева – до 4 МВт/м³. В этих экспериментах исследовалась функция распределения электронов по энергии в области ЭЦР-нагрева и динамика энергетического времени жизни плазмы при росте мощности ЭЦР-нагрева в диапазоне от 200 до 1000 кВт. Было показано, что в плазме стелларатора Л-2М при мощностях нагрева больше 700 кВт происходит постепенное ухудшение удержания энергии плазмы по сравнению с ранее установленным скейлингом стелларатора Л-2М. Анализ экспериментальных зависимостей времени удержания энергии плазмы от мощности нагрева и плотности плазмы показал, что ухудшение удержания плазмы при больших СВЧ-мощностях ЭЦР-нагрева связано с возрастанием мощности радиационных потерь плазмы, вызванных накоплением примесей в результате образования транспортного барьера при транспортных переходах. В докладе **А. И. Мещерякова** «Профили электронной температуры в условиях центрального ЭЦР-нагрева плазмы в стеллараторе Л-2М» выполнен анализ измеренных с помощью многохордовой диагностики мягкого рентгеновского излучения (SXR) профилей электронной температуры. В экспериментах наблюдаются плоские в центральной части плазменного шнура профили электронной температуры, что противоречит очень узким расчетным профилям плотности мощности при поглощении вводимого в плазму СВЧ-излучения. Это может быть связано с тем, что в условиях существования «провального» профиля плотности плазмы (в центре плазменного шнура плотность ниже, чем плотность на периферии), возможны распад-ные процессы, в результате которых необыкновенная волна превращается в электронную бернштейновскую, которая оказывается локализованной в области обратного градиента плотности плазмы и, по-видимому, здесь же поглощается.

По результатам работы секции, можно сделать вывод, что уровень экспериментальных работ, выполняемых на российских термоядерных установках, заметно отстает от уровня работ, выполняемых в таких странах, как США, Япония, Южная Корея, Китай и странах Евросоюза. Это связано с устаревшей технической базой: прежде всего отсутствием новых экспериментальных установок и низким уровнем текущего финансирования работ связанных с термоядерными исследованиями. В настоящее время ведутся работы по созданию нового токамака Т-15 МД, который должен вступить в строй в НИЦ Курчатовский институт в 2020 году.

Секция «Инерциальный термоядерный синтез»

На секции «Инерциальный термоядерный синтез» (председатель секции Г. А. Вергунова) было представлено 12 устных и 18 стендовых докладов. Тематика докладов секции связана с исследованиями в области взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом, лазерного термоядерного синтеза, явлений в электровзрывных импульсных системах, физики высоких плотностей энергии, а также в направлениях по развитию диагностик и численного моделирования процессов в лазерной и электровзрывной плазме.

Для экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза в России строится мегаджоульная лазерная установка, которая будет работать на второй гармонике излучения YAG-лазера, в отличие от действующей установки NIF (Ливерморская национальная лаборатория, США), работающей на третьей гармонике. При увеличении длины волны лазера усиливается роль нелинейных процессов, приводящих к рассеянию лазерного излучения и генерации быстрых электронов, которые, проникая во внутренние слои лазерной мишени, препятствуют достижению условий зажигания термоядерной реакции в дейтерий – тритиевой газовой смеси внутри мишени. В докладе коллектива из РФЯЦ-ВНИИТФ был представлен обзор расчетных и теоретических работ по моделированию сжатия мишеней прямого облучения с учетом таких нелинейных процессов как нелокальный теплоперенос, генерация

быстрых электронов, вынужденное рассеяние Мандельштам-Бриллюэна, передача энергии в пересекающихся лазерных пучках. Показано, что нелинейные процессы снижают запасы энергии в плазме, которая может расходоваться на зажигание мишеней прямого облучения для мегажоульных установок с длиной волны излучения $\lambda = 0,53$ мкм. Переход на третью гармонику увеличивает запас по зажиганию в 3 раза.

В ряде докладов были рассмотрены различные схемы зажигания термоядерного горючего в мишенях. Так, на основании цикла одномерных и двумерных численных расчётов был представлен сравнительный анализ сжатия и горения лазерных термоядерных мишеней при их зажигании сфокусированной ударной волной («shock ignition»), образующейся при воздействии профилированного по времени лазерного импульса на 2-ой и 3-ей гармониках излучения Nd-лазера. В результате исследований были определены параметры мишеней и лазерных импульсов на 2-ой и 3-ей гармониках Nd-лазера, при которых в схеме зажигания мишени ударной волной могут быть достигнуты коэффициенты усиления около 100, что в несколько раз больше, чем при традиционном искровом зажигании. Продолжаются работы по компьютерному моделированию сжатия мишеней непрямого облучения.

На пикосекундной лазерной установке «Неодим» проведены эксперименты по измерению углового распределения DD-нейтронов, рождающихся в ядерных реакциях при облучении мишени из углеродного полимера с дейтерием (CD₂)_n. В эксперименте кроме основного импульса имелись также предимпульсы. Измерения показали, что генерируемые термоядерные нейтроны имеют изотропное угловое распределение. Численные расчеты показали, что при определенных параметрах протонного пучка, характеризующих энергетический и угловой спектры протонов, удастся воспроизвести измеренное в эксперименте угловое распределение нейтронного потока. Отмечено, что существуют параметры протонного пучка, при которых степень анизотропии нейтронного потока может быть увеличена в несколько раз по сравнению с измеренной в эксперименте.

Одним из важных направлений исследований является физика и технология изготовления и транспортировки мишеней для лазерного термоядерного синтеза. Получены новые типы малоплотных сред для лазерных мишеней на основе синтезированных сверхсшитых органосилоксановых и винилареновых полимеров. Улучшается технология создания мишеней, содержащих слои из наночастиц металла и малоплотного пластика. Были представлены результаты нового цикла исследований в области построения частотного модуля формирования для производства криогенных топливных мишеней реакторного класса.

На установке Ангара-5-1 продолжается изучение сжатия дейтерированной мишени, помещенной внутри волоконного лайнера. Проводятся исследования, направленные на увеличение потока мощности на мишень от Z-пинчевого разряда. С этой целью были проведены эксперименты с квазисферическими проволочными сборками малого диаметра (до 13 мм) и вложенными квазисферическими сборками, где внешняя сборка была квазисферической, а внутренняя – цилиндрической. Такая конструкция сборки позволяет перейти от цилиндрической геометрии сжатия к сферической. В результате плотность энергии в пинче выросла в 4 раза. Исследуются также вложенные конусные сборки. Предложен новый метод по определению интенсивности плазмообразования цилиндрическихборок из проволок и волокон различных веществ.

На недавно построенной установке плазменного фокуса ПФ-МОЛ начались систематические исследования по достижению максимального выхода излучения. Профиль плотности начального газового распределения в камере варьировался за счет инъекции газа в камеру, что позволило увеличить нейтронный выход в 2–3 раза. Были отмечены и проанализированы случаи положительного влияния МГД-неустойчивости на величину нейтронного выхода в Z-пинчах. На установке Ангара-5-1 продолжают исследования непрозрачности плазмы золота, создаваемой и облучаемой мощным рентгеновским излучением Z-пинча. Эксперименты поддерживаются численными расчетами.

Продолжаются работы по генерации и исследованию терагерцового излучения из ла-

зерной плазмы, создаваемой при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на газовые среды. Эти работы важны с точки зрения возможности получения ультраширокого спектра излучения в диапазоне от 0,1 до 200 ТГц. Методом просвечивающей интерферометрии экспериментально исследован процесс формирования плазменного канала (филамента) в воздухе, азоте и аргоне в течение первых сотен пикосекунд разряда для различной длительности мощного фемтосекундного лазерного импульса. Предложена эффективная схема генерации терагерцовых волн, когда два лазерных импульса, распространяющихся навстречу друг другу, взаимодействуют в разреженной плазме с достаточно высоким коэффициентом преобразования в терагерцовое излучение.

Построена аналитическая теория генерации высших гармоник лазерного излучения нерелятивистской интенсивности в неоднородной плазме с учетом релятивистских эффектов в окрестности плазменного резонанса. С использованием метода ренормгрупповых симметрий найдена нелинейная структура резонансно усиленного электрического поля и скорости электронов в окрестности критической плотности плазмы и вычислен нелинейный ток, являющийся источником электромагнитного поля, излучаемого из плазмы в вакуум. Для этих случаев получены формулы, определяющие эффективность генерации гармоник.

Работа секции «Инерциальный термоядерный синтез» была успешной и прошла на высоком научном уровне. Практически все представленные доклады относились к поисковым направлениям, нацеленным на решение актуальных проблем физики лазерно-плазменного взаимодействия, лазерной и электроразрядной плазмы. Налаженная кооперация и широкая экспериментально-диагностическая база способствуют стабильному развитию исследований, проводимых на электроразрядных установках в различном диапазоне мощности. Благодаря сохранению научных школ и традиций в области физики плазмы, теоретические исследования российских ученых высоко оцениваются в мире. Предложенные российскими учеными перспективные методы быстрого зажигания и зажигания сфокусированной

ударной волной лазерных термоядерных мишеней успешно исследуются в США, Японии, странах Евросоюза.

Секция «Физические процессы в низкотемпературной плазме»

На конференции в рамках работы секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» (председатель секции В. С. Воробьев) было заслушано 14 устных и 36 стендовых докладов. Традиционная тематика докладов включает в себя следующие основные направления исследований: элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы, термодинамические и транспортные свойства так называемой теплой плотной материи (warm dense matter), различные применения низкотемпературной плазмы, явления в плазме, возникающие в импульсных процессах.

На конференции в ряде устных докладов рассматривались также традиционные вопросы физики низкотемпературной плазмы, связанные с проявлением в том или ином виде эффектов неидеальности. При сжатии плазмы паров металлов при температурах выше критических плазма приобретает ряд свойств, присущих металлам. В первую очередь, речь идет о появлении электронного желе – зачатка зоны проводимости, а также о возникновении квантовой коллективной энергии связи атомов – когезии. Электронное желе возникает из-за перекрытия хвостов распределений электронной плотности связанных электронов, лежащих вне ячейки Вигнера-Зейтца. В настоящее время разработана модель газообразного металла, которая описывает эти «металлические» свойства плазмы, состоящей из ионов металлов. Модель позволяет рассчитать и указать на фазовой диаграмме «температура-плотность» область «газометаллического» существования плазмы, т. е. ту область, где электроны желе доминируют над электронами, возникающими при термической ионизации.

На заседаниях этой секции также рассматривались фундаментальные и прикладные задачи, связанные с исследованием различных теплофизических свойств плазмы, – уравнений состояния и электронных коэффициенты переноса. Изучение этих свойств для низкотемпературной плазмы металлов или полупроводников представляет собой особую

сложность, так как, в отличие от газов, эта плазма находится при сравнительно высоких температурах (выше 5 кК), где сложно провести эксперимент. При теоретическом исследовании такой плазмы также возникает ряд проблем, особенно при повышении плотности хотя бы до 0,1 от значения плотности при нормальных условиях, когда существенным становится взаимодействие между частицами. В последние годы для ряда металлов и полупроводников появились новые данные как экспериментальных измерений, так и расчётов. В частности, для плазмы свинца были рассчитаны ее термодинамические и кинетические свойства при плотностях менее 3 г/см^3 и температурах 10–100 кК.

Продолжаются исследования микроволновых разрядов в жидких углеводородах. Были представлены результаты исследования эмиссионных спектров и газофазных продуктов разряда в широком классе углеводородов: гексан, н-гептан, декан, пентадекан, циклогексан, толуол, орто-ксилол, нефтяной растворитель Nefras S2 80/120. Они показали, что с увеличением молекулярной массы алкана происходит увеличение выхода ацетилена и уменьшение выхода водорода; в разрядах в ароматических соединениях (толуол и орто-ксилол) преимущественно образуется водород и ацетилен, а в продуктах микроволнового разряда в циклоалканах и ароматических соединениях без радикальных групп практически не содержатся метан или этилен.

Традиционно, на секции были представлены работы по диагностике низкотемпературной плазмы, в частности, спектральные измерения температуры электронов и ионов в криптоновой плазме токовых слоев. Интерес к тепловым процессам в токовых слоях связан с тем, что в некоторых режимах сильный импульсный нагрев приводит к быстрому разрушению токового слоя, инициируя начало пересоединения магнитных силовых линий. Аналогичные явления могут происходить и на Солнце непосредственно перед началом вспышки. Лабораторные исследования токовых слоев позволяют проверить гипотезу о «тепловом триггере», запускающем такого рода процессы, приводящие к вспышкам на Солнце.

Значительная часть стендовых докладов была связана с технологическими примене-

ниями низкотемпературной плазмы. Другая группа докладов была связана с исследованием свойств и процессов в низкотемпературной плазме. Третья группа связана с исследованиями специфических форм разрядов в низкотемпературной плазме.

В частности, исследовался процесс распространения подпорогового микроволнового разряда в аргоне. Были зарегистрированы высокие скорости скачкообразного распространения разряда по сравнению с разрядом в воздухе. Зависимость скорости фронта разряда от мощности может быть описана степенной функцией с показателем степени от 1,5 до 2,0. Она оказывается в 20–30 раз больше, чем в воздухе. Измерения температуры газа на фронте разряда свидетельствует о существовании в разряде узких перегретых областей, объем которых не более 0,01 от объема пространства, занятого разрядом. Установление мелкочаистой структуры и высоких локальных значений температуры свидетельствует в пользу механизма распространения разряда, связанного с одновременным воздействием ионизационной и ионизационно-перегревной неустойчивости.

Интерес вызвала работа, посвященная биомедицинским приложениям: рассматривалось действие высокодисперсного аэрозоля на здоровье операторов при применении низкотемпературной плазмы. Плазменные технологии повсеместно используются при термической резке и обработке деталей в металлургической промышленности. При этом металлы испаряются и образуют мелкие аэрозоли, которые могут иметь неблагоприятные последствия для здоровья работников. Проведена оценка состояния здоровья для двух групп работников, занятых в процессах термической резке металлов и плазменной обработке деталей. Было установлено, что у операторов плазматронов и плазменных установок различного назначения уже при стаже до 5 лет диагностированы хронические воспалительно-дегенеративные заболевания верхних дыхательных путей, частота которых увеличивалась со стажем работы. Изменения со стороны бронхо-легочной системы носили обструктивно-рестриктивный характер. Дисперсионный анализ подтверждал высокую степень зависимости влияния уровней концентрации в комбинациях пылегазовых смесей на формирова-

ние патологических изменений слизистой оболочки верхнего отдела респираторного тракта.

В целом, работа секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» была успешной и прошла на высоком научном уровне. Она показала, что ряд новых направлений, таких как исследования в областях ультрахолодной плазмы, состояния вещества типа «warm dense matter» и изучение свойств низкотемпературной плазмы при пробое газов и конденсированных сред, успешно развиваются в России и не уступают мировому уровню.

Секция «Физические основы плазменных и лучевых технологий»

На заседаниях секции «Физические основы плазменных и лучевых технологий» (руководители секции С. А. Двинин и А. Ф. Александров) было заслушано 12 устных и 18 стендовых докладов. На стендовой секции были представлены доклады в соавторстве с иностранными участниками из Штутгартского университета (Германия), Эдинбургского университета (Великобритания) и Таджикского Национального университета (Душанбе).

На секции были представлены доклады по всем основным направлениям плазменных и лучевых технологий: генерация терагерцового и СВЧ-излучения, воздействие плазмы на твердые тела (диэлектрики, металлы и композиты со сложной структурой), воздействие мощных электронных пучков, методы создания ионных и электронных пучков и их диагностика. Также были доклады, посвященные плазменным методам нанесения покрытий и свойствам полученных пленок, вопросам распространения разряда в постоянном поле и в микроволновом пучке, а также созданию сильноточного разряда в атмосфере и исследованию разрядов в газовых смесях сложного химического состава (плазмохимия). В ряде работ рассматривалось влияние быстрого нагрева газа наносекундным разрядом на воспламенение горючих смесей, изучалось воздействие наносекундного импульсного разряда на гидродинамические течения и исследовалось распространение ударных волн в твердом теле под воздействием электронного пучка.

Традиционно были представлены работы, в которых изучались структура микроплазменного разряда на поверхности металлов и динамика разряда в порошке из смеси диэлектриков, иницируемого разрядом в азоте.

Большинство докладов было посвящено экспериментальным исследованиям, однако были и теоретические доклады, а также доклады, объединившие экспериментальные и теоретические результаты.

Остановимся подробнее на тех направлениях, в которых было представлено наибольшее количество докладов. Большой интерес вызвали доклады из Новосибирска (ИЯФ СО РАН, НГУ), в которых были исследованы способы создания плазменного столба с различными градиентами плотности электронов для эффективной трансформации энергии верхнегибридных волн, возбуждаемых электронным пучком, в электромагнитную волну. Также была экспериментально исследована генерация субмиллиметровых волн (0,1–0,8 ТГц) за счет коллективной релаксации пучка релятивистских электронов в замагниченной плазме: энергия электронов 0,8 МэВ, ток электронного пучка 20 кА, длительность импульса пучка 6 нс. Эти эксперименты проводились на установках ГОЛ-3 и ГОЛ-3Т и на специализированной установке GOL-PET. Эксперименты показали, что в случае сильного радиального градиента плотности плазмы основная доля мощности потока субмиллиметрового излучения, выходящего вдоль оси плазменного столба, сосредоточена в частотном интервале 0,15–0,3 ТГц.

В докладе коллектива авторов из АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», РУДН и ИОФ РАН исследовано усиление широкополосного шума в плазменном лазере. В докладах коллектива из ИОФ РАН экспериментально изучен эффект подавления шумов в плазменном СВЧ-усилителе на основе релятивистского электронного пучка (РЭП) и обнаружены режимы излучателя на основе РЭП, в которых в процессе импульса излучения происходит быстрое изменение частоты излучаемой электромагнитной волны.

В работах по изучению взаимодействия плазмы с поверхностью (НИЦ «Курчатовский институт») исследовано проникновение изотопов водорода через перспективные материалы

ядерной энергетики. Был также представлен проект использования геликонного разряда для воздействия на материалы термоядерных реакторов. Доклад коллектива авторов из ФИАН и Института металловедения РАН был посвящен воздействию плазмы системы «плазменного фокуса» на металлические фольги, а в докладе авторов из НИЦ «Курчатовский Институт» и Штутгартского университета исследовано воздействие струи плазменного двигателя на мишень из вольфрама.

Работа секции в целом показала, что в области плазменных и пучковых технологий ведется активная исследовательская работа, причем растет число работ, имеющих явную технологическую направленность. На секции были представлены доклады по большинству направлений развития современных технологий. Общее число представленных докладов уменьшилось в связи с отсутствием финансирования конференции со стороны РФФИ и соответствующим увеличением стоимости участия в конференции. Очень заметно уменьшилось также число докладов, представленных небольшими коллективами авторов. Правила предоставления гранта РФФИ на организацию конференции изменились таким образом, что для такого масштабного научного мероприятия, как 47 Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, имеющего почти полувековую историю, оказалось невозможным претендовать на получение поддержки РФФИ.

Для больших экспериментальных установок можно отметить тенденцию к их модернизации и созданию новых диагностик. Исследователи стремятся к увеличению эффективности исследований, но эти процессы сдерживаются ухудшением госбюджетного финансирования исследований.

Секция «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего»

На секцию «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего» (руководитель секции А. В. Красильников) в этом году было представлено 38 докладов; из них 5 были доложены на устном заседании, 33 – на стендовом.

На строительной площадке международного проекта ИТЭР (Кадараш, Франция) пол-

ным ходом идут строительные работы. Из 100 ключевых этапов работ, т. н. «IC milestones» к концу 2019 года было выполнено 42. Возведено перекрытие над шахтой сборки установки токамака. Это событие является знаковым – начато сооружение помещений, где будет собираться сам токамак – реактор. Этап сборки токамака качественно отличается от предыдущих этапов. Здесь должно стыковаться оборудование и части единых систем, выполненных в странах – участницах проекта с различной культурой производства и национальными стандартами. На этапе сборки должна быть усилена централизация управления для быстрого принятия решений.

Доклады устного заседания были посвящены состоянию работ по созданию всех систем проекта ИТЭР. В 2019 году Россия полностью выполнила свои международные обязательства по проекту ИТЭР.

В настоящий момент в рамках обязательств перед международной организацией ИТЭР в российском агентстве ЧУ «Проектный центр ИТЭР» продолжается разработка диагностической системы Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК). Данная система построена на основе многоканальных нейтронных коллиматоров и предназначена для измерения профиля нейтронного источника и профиля термоядерной мощности в реальном времени. В ходе разработки диагностики приходилось решать проблему значительного фона рассеянных нейтронов в каналах коллиматоров и как следствие низкого отношения сигнал – фон. Для этого была переработана конструкция блока быстрых нейтронов и оптимизирована форма каналов коллиматоров. В прошедшем году конструкция детекторных модулей нижней и верхней ВНК была переработана, чтобы обеспечить интеграцию диагностической системы в обновленный модульный дизайн портов токамака.

В рамках российского вклада в проект ИТЭР Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР» разрабатывает диагностическую систему Диверторный Монитор Нейтронного потока (ДМНП). Данная система предназначена для измерения динамики полного нейтронного выхода и термоядерной мощности. Диагностика состоит из трёх идентичных модулей, в которых размещены ионизационные камеры деления с различным изотопным составом де-

лящегося вещества (^{235}U и ^{238}U). Диапазон измерения полного нейтронного выхода диагностикой ДМНП составляет от 10^{14} до 10^{20} н/с. В ходе разработки конструкции диагностики пришлось изменить первоначально выбранное положение диагностики ДМНП, поскольку выявились противоречивые требования от различных подсистем ИТЭР. В новом положении тепловые и нейтронные нагрузки на детекторы на порядок ниже, что дало возможность отказаться от активного водяного охлаждения. Расчет нейтронного транспорта также показал, что потоки в области малых энергий уменьшаются еще больше – почти на два порядка.

Управление работой реактора ИТЭР требует разработки и создания необходимых средств диагностики термоядерной плазмы. Одним из них является так называемый метод активной спектроскопии (английская аббревиатура CXRS – Charge Exchange Recombination Spectroscopy) с использованием диагностического или нагревного пучка атомов. Эта диагностическая система для ITER также разрабатывается в России. Активная спектроскопия позволяет измерять такие параметры, как ионная температура, скорость тороидального и полоидального вращения плазмы, концентрация легких примесей (в том числе гелиевой золы) по всему сечению плазменного шнура с высоким пространственным разрешением.

Важной частью экспериментальной программы ИТЭР станет мониторинг электронных параметров в диверторе. Знание электронной температуры и плотности необходимо как для изучения плазмы в диверторном объеме, так и для контроля нагрузки на диверторные пластины и контроля положения выхода магнитной сепаратриссы на диверторные пластины. Разработка диагностического комплекса томсоновского рассеяния дивертора токамака ИТЭР также находится в рамках ответственности России. Работа диверторной диагностики томсоновского рассеяния ИТЭР будет проходить в крайне неблагоприятных условиях высокой радиационной нагрузки на оптические элементы, загрязнения оптических элементов продуктами эрозии первой стенки в виде пылевых и плёночных осадений. Дополнительные трудности в ре-

ализации диагностики связаны с ограниченным доступом к плазме и низкой интенсивностью сигнала томсоновского рассеяния, зачастую более слабого, чем интенсивность фонового излучения плазмы, включающего линейчатый и непрерывный спектры излучения, а также излучение нагретых элементов первой стенки.

Одной из нерешенных задач проекта ИТЭР является проблема эрозии первой стенки и дивертора при взаимодействии с горячей плазмой. По сравнению с существующими установками для магнитного удержания плазмы, токамак ИТЭР будет иметь большую длительность разряда и большой поток тепла на компоненты вакуумной камеры, обращенные к плазме. Более того, во время экспериментальной кампании ИТЭР не могут быть исключены мощные импульсные воздействия на поверхность дивертора. В этих случаях эрозия материала значительно увеличится, на поверхности будет появляться расплавленный слой, из которого возможен выброс микрочастиц. Микрочастицы могут проникнуть в центр плазмы и вызвать значительный рост радиационных потерь, что, в свою очередь, может привести к проблемам с удержанием высокотемпературной плазмы. Кроме этого, накопление большого количества микрочастиц в вакуумной камере приведёт к накоплению радиоактивного трития, количество которого ограничено требованиями радиационной безопасности.

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

На секции «Компьютерное моделирование плазмофизических процессов» (председатель секции – В. А. Скворцов) было представлено 8 устных докладов. В рамках конференции работа этой секции была организована впервые. Несмотря на то, что секция имела характер «математический», в докладах обсуждалась также и физика рассматриваемых плазменных процессов, необходимость учета или пренебрежения некоторыми физическими эффектами при компьютерном моделировании. Также проводились сравнения результатов моделирования с имеющимися экспериментальными результатами, рассчитывались

явления и прогнозировались новые будущие экспериментальные результаты.

Обсуждался проект высокотемпературного ториевого реактора с газовым охлаждением, разрабатываемый на протяжении последних нескольких лет в Томском политехническом университете. В развитие этого проекта предложен гибридный реактор с подкритической топливной сборкой и аксиально-симметричной ловушкой в качестве источника нейтронов (ИН). Были представлены результаты по исследованию трехмерных полей нейтронного поля и тепловыделения в реакторной системе, работающей в подкритическом режиме с источником DD- и DT-нейтронов. К сожалению, к.п.д. систем, использующих только дейтерий, невысок по сравнению с системами, использующими дейтерий и тритий. Рабочая область вакуумной камеры ИН имеет длину 15 м и ограничена магнитными пробками с полем 15–20 Т.

В Институте ядерной физики СО РАН многие годы проводятся исследования по удержанию горячей плазмы в линейных газодинамических ловушках. На секции был представлен доклад, посвященный влиянию нейтрального газа, образующегося в расширителе ловушки, на удержание плазмы в газодинамической ловушке. Нейтральный газ перераспределяется по всему объему плазменного столба, приводя к снижению эффективности работы расширителя. Влияние концентрации нейтрального газа было исследовано с помощью вычислительного эксперимента в рамках упрощенной кинетической модели, не претендующей на высокую точность, но правильно предсказывающей особенности заполнения плазмой вакуумных камер с остаточным газом.

Была представлена работа по численному исследованию механизма взаимодействия слабоинтенсивного потока низкоэнергетичных ионов с поверхностью полимерных материалов с помощью молекулярно-динамической модели. Было показано, что при энергии бомбардирующих атомов $W = 10$ эВ существенных изменений структуры не происходит, а при энергиях $W = 50$ эВ и 100 эВ в центре мишени образуется разрежение, молекулы полиэтилена в окрестности трека разрываются, образуются короткие алкеновые радикалы. Температура атомов в этой области существ-

венно повышается, что качественно совпадает с моделью термоупругого пика.

В современных термоядерных установках в качестве конструкционных материалов используется вольфрам, который неизбежно попадет в разрядную высокотемпературную плазму. Из-за большого зарядового числа радиационные потери плазмы на примеси вольфрама достаточно велики, что может привести к коллапсу и срыву разряда. Поэтому проблема мониторинга плотности вольфрама является важным пунктом в диагностике плазмы современных токамаков и стеллараторов. Разработке соответствующей модели и проведению с ее помощью численного исследования и была посвящена работа авторов из НИЦ Курчатовский институт. Было получено распределение вероятности переходов в ионах вольфрама в шкале длин волн, которое хорошо согласуется с результатами других работ.

Также были представлены результаты тематического моделирования сложных взаимосвязанных радиационно-магнитогидродинамических процессов взаимодействия интенсивного пикосекундного лазерного излучения с металлическими мишенями в атмосфере различных газов применительно к конкретной экспериментальной лазерной установке: неодимовый лазер на стекле Nd YAG, длина волны 1,06 мкм, максимальная интенсивность в области фокусировки $I_0 = 7,2 \times 10^{13}$ Вт/см² для главного лазерного импульса длительностью 100 пс по полувисоте. Результаты получены с использованием суперкомпьютеров ИПМ РАН. Показано, что даже при рассматриваемых сравнительно умеренных интенсивностях пикосекундных лазерных импульсов в плазме возможна генерация рекордно высоких по величине магнитных полей (с индукцией не только в сотни МГс, но вплоть до 1–2 ГГс). Однако генерацию таких полей трудно диагностировать, т. к. она происходит в сравнительно малых объемах в течение сравнительно коротких интервалов времени (менее 10 пс).

Таким образом, все доклады, представленные на секции, были посвящены актуальным вопросам современной плазменной энергетики и физики. Они содержали новые результаты, вызвавшие большой интерес и отклики у собравшихся участников конференции. Первая попытка проведения данной секции

конференции показала и одно неоспоримое преимущество вычислительных экспериментов (по сравнению с натурными) – это возможность «включать» и «выключать» в ходе экспериментов (в том числе и с применением суперкомпьютеров) те или иные физические эффекты, выявляя их роль и значимость в работе моделируемых реальных физических систем и процессов.

Таким образом, по результатам конференции можно сделать следующие выводы:

1. XLVII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых и инженеров, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в России и странах СНГ. Она проходила уже в 47-й раз и собрала на свои заседания более 800 участников из научных центров России и других стран. Число российских (65) и иностранных организаций (16), представивших доклады на конференцию, стабильно остается на высоком уровне.

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 и проблемы, связанные с реализацией международного проекта ITER. 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 зарубежных научных центров.

3. Уровень экспериментальных исследований, выполненных российскими учеными на крупных российских установках в области магнитного удержания горячей плазмы, пока еще достаточно высок, несмотря на физическое и концептуальное старение экспериментального и диагностического оборудования. Фактически в России отсутствует стратегическая национальная программа по управляемому термоядерному синтезу, в рамках которой

развивались бы фундаментальные и прикладные исследования как на 2–3 крупных установках УТС (сверхпроводящий токамак, стелларатор, осесимметричная ловушка), а также ряд средних установок в университетах. Отсутствие такой программы ведет к отставанию на десятилетия от исследований по УТС, ведущихся в технологически лидирующих странах.

4. Современный мировой уровень лазерно-плазменных исследований требует создания в разных научных центрах России, по крайней мере, двух или трех конкурирующих мультитераваттных лазерных систем, направленных на решение проблемы лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) и смежных задач. Также целесообразно создать сеть из нескольких лазерных установок с меньшей мощностью, на которых было бы возможно проверять новые идеи и экспериментальные схемы, а также проводить отработку новых диагностик. Так эффективно работают научные программы технологически развитых стран Европы, Японии и США. В России стратегических долгосрочных планов строительства таких лазерных установок нет, и это обрекает наши научные исследования по ЛТС на дальнейшее отставание от мирового уровня.

5. Растет число работ, посвященных прикладным исследованиям в области физики плазмы, увеличивается интерес к этим научным исследованиям среди молодежи, принявшей участие в работе конференции. В настоящее время в государственной корпорации РОСАТОМ разработана программа освоения плазменных и термоядерных технологий на 5 лет 2020–2024 гг. Эта программа в случае ее реализации может создать мощный импульс в России для интенсивного развития физики плазмы и плазменных технологий. Реализация этой программы создаст условия для применения результатов исследований в работах по разработке источника термоядерных нейтронов, применению плазменных технологий в различных отраслях промышленности, и поможет сделать следующий важный шаг по освоению термоядерной энергии.

6. Остается заметным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными совместно с учеными ведущих научных центров Европы, Канады и США. Это указывает на то, что авторитет и

научная квалификация российских ученых в области физики плазмы пока остаются достаточно высокими, чтобы быть востребованными мировым научным сообществом.

7. Оргкомитетом конференции издана книга «XLVII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» Сборник тезисов докладов. – М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМА-ИОФАН. – 280 с. ISBN 978-5-6042115-2-6. Материалы конференции также размещены на сайте конференции http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVII/Zven_XLVII.html.

Работа выполнена в соответствии с государственными заданиями №№ АААА-А18-118122500105-4 (Физика высокотемпературной плазмы.

Фундаментальные проблемы динамики, удержания и нагрева плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях), А18-118013000293-4 (Фундаментальные основы плазменных и микроволновых технологий), и Программой РАН № 6 «Новые подходы к созданию и изучению экстремальных состояний вещества».

ЛИТЕРАТУРА

1. «XLVII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» 16–20 марта 2020 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. — М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. — 280 с. ISBN 978-5-6042115-2-6.
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVII/Zven_XLVII.html

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

Status of Scientific Research on Plasma Physics and Controlled Fusion in Russia in 2019

(Review of reports of the XLVII International Zvenigorod Conference, 2020)

I. A. Grishina and V. A. Ivanov

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilova st., Moscow, 199911, Russia

The review is given on the most interesting new results presented at the XLVII International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion which took place in Zvenigorod city of Moscow region on March 16–20, 2020. The analysis is carried out of the basic achievements in the field of plasma physics in Russia and these achievements are compared with the foreign scientific achievements.

Keywords: plasma physics, nuclear fusion, low temperature plasma, high temperature plasma, plasma and microwave technologies, conference, results.

REFERENCES

1. Proceedings of the XLVII International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Zvenigorod, Moscow Region, Russia. March 16–20, 2020. ISBN 978-5-6042115-2-6 (Published by PLAZMAIOFAN Co Ltd. 2019) [in Russian].
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVII/Zven_XLVII.html