

**Исследование в области физики плазмы
и плазменных технологий в России в 2018 году**

(Обзор материалов «XLVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу», 18–22 марта 2019 г.)

И. А. Гришина, В. А. Иванов

Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на ежегодной «XLVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу», состоявшейся с 18 по 22 марта 2019 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, конференция, результаты.

Ссылка: Гришина И. А., Иванов В. А. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 3. С. 231.

Reference: I. A. Grishina and V. A. Ivanov, Usp. Prikl. Fiz. 7 (3), 231 (2019).

Введение

«XLVI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС)» состоялась в г. Звенигороде Московской области с 18 по 22 марта 2019 года [1, 2].

На конференции было представлено 266 научных докладов из 68 российских и 13 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее количество зарегистрированных авторов докладов составило более 800 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.

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 3 июня 2018 г.

© Гришина И. А., Иванов В. А., 2019

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

1. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия – 49

2. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, г. Новосибирск, Россия – 27

3. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия – 26

4. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия – 25

5. Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия – 24

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

7. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия – 17

8. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Административный округ Троицк, Москва, Россия – 16

9. Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Московская обл., Россия – 15

10. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия – 14
11. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия – 14
12. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, г. Новосибирск, Россия – 14
13. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия – 12
14. Российский университет дружбы народов, Москва, Россия – 11
15. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия – 11
16. Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия – 7
17. Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия – 7
18. Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия – 7
19. Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия – 7
20. Научно исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия – 5
21. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежала, Москва, Россия – 5
22. Центр фундаментальных и прикладных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия – 4
23. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия – 4
24. Казанский (Приволжский) Федеральный университет, г. Казань, Россия – 4
25. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия – 4
26. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, г. Казань, Россия – 3
27. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва, Россия – 3
28. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Россия – 3
29. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия – 2
30. Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Россия – 2
31. Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск, Россия – 2
32. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия – 2
33. Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез – Международные проекты», Москва, Россия – 2
34. Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир, Россия – 1
35. ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара», Москва, Россия – 1
36. Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Московская обл., г.п. Менделеево, Россия – 1
37. Всероссийский электротехнический институт – филиал ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабина», Москва, Россия – 1
38. ЗАО «Спектрал-Тех», Санкт-Петербург, Россия – 1
39. Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия – 1
40. Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия – 1
41. Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново, Россия – 1
42. Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия – 1
43. Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Троицк, Москва, Россия – 1
44. Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия – 1
45. Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия – 1

46. Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Россия – 1
47. Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Россия – 1
48. Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия – 1
49. Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Россия – 1
50. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, Москва, Россия – 1
51. Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина, РАН, Москва, Россия – 1
52. Институт химии растворов РАН им. Г. А. Крестова, г. Иваново, Россия – 2
53. Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва, Россия – 1
54. АО «Концерн «Вега», Москва, Россия – 1
55. АО «Красная Звезда», Москва, Россия – 1
56. ОАО «КОМПОЗИТ», г. Королев, Россия – 1
57. ООО «Лазер График», Москва, Россия – 1
58. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия – 1
59. Российский технологический университет МИРЭА, Москва, Россия – 1
60. Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Россия – 1
61. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, г. Саранск, Россия – 1
62. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е. И. Забабахина, г. Снежинск, Россия – 1
63. ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «Союз», г. Дзержинский, Московская обл., Россия – 1
64. Томский политехнический университет, г. Томск, Россия – 1
65. Федеральный научный центр гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана Роспотребнадзора, Москва, Россия – 1
66. Физико-технологический институт им. К. А. Валиева РАН, Москва, Россия – 1
67. Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия – 1
68. Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский, Московская обл., Россия – 1
- Участниками конференции, представившими доклады из стран дальнего и ближнего зарубежья, являются следующие научные организации.
1. Centre Lasers Intenses et Applications, Université de Bordeaux, Talence, France – 2
 2. ELI-Beamlines, Institute of Physics, Academy of Science, Prague, Czech Republic – 2
 3. Государственный университет имени Шакарима, г. Семей, Республика Казахстан – 2
 4. Филиал «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр республики Казахстан», г. Курчатова, Казахстан – 2
 5. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь – 2
 6. Таджикский национальный университет, г. Душанбе, Таджикистан – 2
 7. BELLA (Berkeley Lab Laser Accelerator) Center of Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, USA – 1
 8. Centre de Physique Theorique, CNRS, Ecole Polytechnique, Palaiseau Cedex, France – 1
 9. Cornell University, Ithaca, New York, USA – 1
 10. ITER Organization, Cadarache, Saint-Paul-Lez-Durance, France – 1
 11. LERMA, Observatoire de Paris, Paris, France – 1
 12. Laboratory for Plasma Physics – ERM/KMS, Association EURATOM – BELGIAN STATE, Brussels, Belgium – 1
 13. Plasma Physics Laboratory, Pierre and Marie Curie University, Paris, France – 1
- На конференции были заслушаны 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.

Обзорные доклады

На конференции состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 19 обзорных докладов о результатах отечественных и мировых исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям. Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 67 устных и 180 стендовых докладов.

В обзорных докладах, которые были представлены на пленарных заседаниях конференции, 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.

В связи со 100 годовщиной со дня рождения участники конференции почтили память М. С. Рабиновича. Как отмечалось в докладе **Иванова В. А.** (ИОФ РАН), работы М. С. Рабиновича в областях физики ускорителей, физики плазмы, управляемого термоядерного синтеза и сильноточной СВЧ-электроники значительно обогатили отечественную и мировую науку. Его работы, посвященные разработке основ теории ускорителей заряженных частиц, по праву позволяют считать М. С. Рабиновича одним из создателей теории современных ускорителей. Под его руководством был запущен ряд уникальных установок стеллараторного типа, что позволило получить новые фундаментальные результаты по нагреву и удержанию горячей плазмы. При поддержке Матвея Самсоновича в ФИАН были проведены первые в мире исследования по многофотонной ионизации атомов, переросшие в новую область физики взаимодействия лазерного излучения с веществом.

9 ноября 2018 года исполнилось 90 лет со дня рождения академика Б. Б. Кадомцева. О его неограниченном вкладе в науку, его идеях, которые во многом определили пути развития физики горячей плазмы и управляемого термоядерного синтеза, рассказывалось в докладе **Пастухова В. П.** (НИЦ Курчатовский институт). В докладе отмечалось, что, обладая исключительной широтой научных интересов, Борис Борисович также внёс большой вклад в фундаментальные вопросы нелинейной динамики распределённых сред и квантовой механики. Он является автором ряда ключевых работ по вопросам физической кинетики плазмы, теории устойчивости и турбулентности плазмы в магнитном поле. В его работах всегда сочетались глубина понимания существа проблемы, удивительная физическая интуиция, блестящее владение разнообразными математическими методами решения поставленных задач и способность предельно ясно объяснить суть самых сложных физических явлений.

90-летию со дня рождения А. И. Морозова был посвящен доклад **Кукушкина А. Б.** (НИЦ Курчатовский институт). А. И. Морозов был выдающимся ученым в области физики плазмы электрореактивных двигателей и управляемого термоядерного синтеза. Мировую известность принесли А. И. Морозову его пионерские работы по созданию и внедрению в космическую технику стационарных плазменных двигателей. За всеми достижениями А. И. Морозова в решении практических задач стоит его выдающийся вклад в теорию плазмы: предсказания макроскопического электрического поля в плазме, даже при ее высокой электропроводности (идея стационарного плазменного двигателя), волокнистой структуры в замкнутых магнитных системах (известной ныне как магнитные острова), класса траекторий заряженных частиц в тороидальном магнитном поле (ныне известного как «бананы»), теория осесимметричных течений двухкомпонентной электронно-ионной плазмы и эффекта Холла в плазме, основы плазмооптики.

В связи со 85-летием со дня рождения участники конференции почтили память Ю. С. Сигова. В докладе **Левченко В. Д.** (ИПМ РАН) отмечалось, что Ю. С. Сигов был

одним из пионеров теории и практики вычислительного эксперимента в физике плазмы. Он внес определяющий вклад в создание первой в мире объектно-ориентированной модели плазмы, которая открыла перспективы для реализации вычислительных кодов большой сложности, что привело к разработке теории локально-рекурсивных нелокально-асинхронных (LRnLA) алгоритмов и созданию семейства LRnLA кодов, позволяющих моделировать сильно неравновесную плазму и плазмopodobные среды на больших временах и пространственных масштабах. Созданные коды позволяют моделировать волновые процессы в оптике и электродинамике, геофизике, акустике, гидро- и газодинамике, а также моделировать магнитные материалы.

Обзор новых результатов термоядерных исследований, проведенных в европейских научных центрах, был дан в докладе **Онгена Дж.** (Королевская военная академия Бельгии, Брюссель). На токамаке JET (Европейский союз, Великобритания) идет подготовка к будущим экспериментам с тритиевой и дейтерий-тритиевой (D-T) плазмой, в ходе которых планируется получить выделение 15 МВт термоядерной мощности в течение 5 секунд и продемонстрировать нагрев центральной области плазмы альфа-частицами при выделяемой мощности до 3 МВт. В экспериментах будет опробован новый метод ионного циклотронного нагрева (ИЦН) плазмы, основанный на наличии в плазме трех различных разновидностей ионов. Метод является перспективным для оптимизации экспериментов с D-T-плазмой, так как дает возможность ускорить ионы дейтерия и трития с помощью ИЦН до тех энергий, при которых сечение D-T-термоядерной реакции имеет максимум. В докладе отмечалось, что полным ходом идут эксперименты с плазмой на стеллараторе Wendelstein 7-X (Европейский союз, ФРГ). Рекордное значение тройного произведения температуры, плотности и времени удержания ($6,5 \times 10^{19}$ кэВ м⁻³ сек) для стеллараторов было получено на этой установке в нестационарных условиях во время фазы разряда по окончании инъекции пеллет.

В докладе **Брантова А. В.** (ФИАН) был дан обзор теории и численного моделирования лазеро-плазменного ускорения ионов из мишеней, облучаемых мощными фемтосе-

кундными лазерами. Представленные результаты включали в себя оптимизацию ускорения ионов по толщине и по плотности мишени; зависимость энергии ускоренных протонов от энергии падающего лазерного импульса. Было показано, что циркулярная поляризация лазерного излучения является более выгодной с точки зрения ускорения ионов из тонких фольг или малоплотных мишеней. Приведены результаты оптимизационных расчетов по наработке радиоактивных изотопов технеция и углерода. Показано, что лазерная установка, работающая с частотой посылок импульсов 10 кГц при энергии 10 Дж в каждом импульсе, может генерировать нейтронный пучок с числом частиц порядка 10^{13} с⁻¹, что значительно превышает поток нейтронов из нейтронных трубок. Такая установка даст около 2ТБк активности изотопа ¹¹C за 10 минут непрерывного облучения и около 300 ГБк активности изотопа ^{99m}Tc за шесть часов облучения, что достаточно для применения в ядерной медицине, а также для создания источника нейтронов.

Доклад **Химченко Л. Н. и Красильникова А. В.** (Проектный центр ИТЭР) был посвящен ходу сооружения крупнейшего международного токамака ИТЭР, создаваемого сообществом в составе Европейского союза и шести стран участниц (Китай, Индия, Япония, Корея, Россия и США). В докладе был представлен ход создания основных систем ИТЭР участниками проекта и управленческие решения, направленные на оптимизацию сборки токамака и создание инфраструктуры. Было отмечено, что проект «перевалил» 50%-уровень работ по сооружению инфраструктуры и установки ИТЭР. Важным этапом строительства является окончание бетонных работ в шахте «биозащиты», где должен стоять токамак. Начались отделочные работы на последнем уровне галерей L4 и первом этаже диагностического здания. В соответствии с графиком сборки ИТЭР на площадке сборки систем токамака свозятся конструкции, которые изготовлены в каждой стране-участнике проекта в «натуральном» виде. Отмечалось, что в 2018 году Россия полностью выполнила свои обязательства по созданию сверхпроводников для катушек тороидального и полоидального магнитного поля токамака.

В докладе **Красильникова А. В. и Коновалова С. В.** (Проектный центр ИТЭР) обсуждались термоядерные технологии, которые будут использованы при эксплуатации ИТЭР и последующих более крупных установок. Первая стенка и дивертор ИТЭР изготавливаются из бериллия (Be) и вольфрама (W) соответственно. Однако в проектах дивертора «следующего шага» активно рассматриваются продвинутое магнитные топологии, а также жидкий литий. В качестве систем дополнительного электронного циклотронного нагрева для ИТЭР создаются гиротроны, генерирующие СВЧ-излучение на частоте 170 ГГц с суммарной мощностью 20 МВт, антенны ионного циклотронного нагрева на частотах 40–55 МГц с мощностью до 20 МВт и несколько инжекторов пучков нейтральных атомов с газовой мишенью обдирки с энергией атомов в пучках до 1 МэВ с суммарной мощностью 33 МВт. Для экспериментов «следующего шага» начаты разработки перспективных технических решений: мощных гиротронов, генерирующих СВЧ-излучение на частоте ~ 230 МГц, антенн бегущей волны, обеспечивающих внеосевую генерацию тока с использованием волн в плазме типа геликонов на частотах ~ 600 МГц и инжекторов атомов с оптической и плазменной мишенью обдирки. Более 30 методов и комплексов аппаратуры диагностики плазмы создаются и будут применены и усовершенствованы в процессе исследований на ИТЭР. Многие из созданных методов, и особенно те, что продемонстрируют длительную работоспособность в сильных радиационных потоках, будут в дальнейшем использованы в термоядерном реакторе. Это же в полной мере относится к роботизированным системам, системам управления плазменным разрядом, комплексам управления радиальными профилями параметров плазмы, системами предотвращения срывов разрядов и дистанционного управления экспериментами.

В обзорном докладе **Беклемишева А. Д. с соавторами** (ИЯФ СО РАН) рассматривались состояние и перспективы экспериментов на линейных ловушках для получения термоядерной плазмы. Отмечалось, что возрождение внимания и интереса в последнее время к экспериментам на линейных ловушках связано с двумя факторами: успешным созданием и

быстрым развитием экспериментальных установок серии С-2 (типа FRC) коммерческой компанией Три Альфа Энерджи в США, а также с достижением электронной температуры порядка одного килоэлектронвольта на газодинамической ловушке ГДЛ в Новосибирске. В настоящее время в Три Альфа Энерджи работает новая версия установки модификации С-2W, основными задачами которой являются повышение электронной температуры за счёт новой конструкции дивертора, повышение энергосодержания плазмы в течение разряда за счёт увеличения мощности нагрева и качества ввода энергии в плазму, а также увеличение длительности стационарного удержания за счёт модификации магнитной системы и проводящего кожуха. На установке ГДЛ рекордной электронной температуры удалось достичь с помощью небольшого приосевого дополнительного СВЧ-нагрева в условия электронного циклотронного резонанса. При этом область электронно-горячей плазмы составляла лишь около четверти сечения, и влияние этой зоны на быстрые ионы было невелико. Тем не менее, нагрев электронной компоненты имеет принципиальное значение для оценки перспектив ловушек типа ГДЛ.

В докладе **Кулыгина В. М. и Жильцова В. А.** (НИЦ Курчатовский институт) обсуждалось новое направление в разработке плазменных ракетных двигателей, основанное на результатах многолетних исследований по термоядерному синтезу и физике горячей плазмы и реализующее схему с магнитной изоляцией плазменного потока и безэлектродными высокочастотными методами введения энергии в плазму. Отмечалось, что новые научные и технические разработки, а также развитие обеспечивающих технологий, стимулированные исследованиями горячей плазмы, сделали возможным начать работы по созданию мощных плазменных ракетных двигателей нового поколения, способных резко расширить возможности по освоению ресурсов космоса. Обсуждались разрабатываемые схемы двигателей, использующих в качестве рабочего тела высокотемпературную плазму, анализировались их преимущества по сравнению с современными двигателями. Рассматривались открывающиеся возможности практического использования плазменных ракетных двигателей. Была представлена ин-

формация о первой наиболее продвинутой двигательной системе VASIMR.

Большой интерес вызвал доклад **Кутеева Б. В.** (НИЦ Курчатовский институт), посвященный гибридным системам синтеза-деление (ГССД). Отмечалось, что в настоящий момент часть гибридных систем, связанная с синтезом, приближается к параметрам термоядерных систем. В этот же период в Курчатовском институте был начат поиск новых приложений нейтронных источников для решения задач материаловедения и фундаментальной физики (нейтронного рассеяния). Деятельность в данном направлении получила поддержку МАГАТЭ в связи с тем, что источники нейтронов мегаваттного уровня соответствуют требованиям для энергетических систем, а созданные на их основе ГССД могут использовать материалы, предназначенные для реакторов на быстрых нейтронах. На сегодня разработка таких ГССД находится на уровне эскизного проектирования, которое позволяет определить общие параметры ГССД и наметить программу необходимых НИОКР уже для технического проектирования и сооружения установок. Будущее развитие ГССД связано с оптимизацией процессов для генерации нейтронов синтеза для их использования для преобразования ядерных нуклидов. Можно отметить, что повышается интерес к ГССД как к устройству для трансмутации минорных актинидов и производству синтетического ядерного топлива для традиционных ядерных реакторов и для реакторов на быстрых нейтронах. Современные прогнозы говорят о реализуемости промышленных ГССД к 2050 году.

Процессы ионизации, конденсации и излучения тропосферы были рассмотрены в обзорном докладе **Смирнова Б. М.** (ОИВТ РАН). В докладе была представлена единая физическая картина атмосферных явлений, где процессы ионизации, переноса, эволюции аэрозолей и парниковый эффект представлены как взаимно связанные. Ионизация в атмосфере создается космическими частицами, причем как солнечного, так и внегалактического происхождения. Она происходит под действием вторичных частиц, образующихся в результате ядерных реакций с участием космических частиц. Ионизация атмосферы создает цепь процессов, которые отражаются на ее свой-

ствах. Ионы являются центрами конденсации атмосферного водяного пара. При наличии таких центров конденсации устанавливается равновесие между локальным количеством атмосферной воды в конденсированном состоянии и в форме свободных молекул. С другой стороны, характер процессов конденсации воды в атмосфере, а также конвективный перенос атмосферных масс приводит к определенному распределению аэрозолей воды по размеру и по фазовому состоянию аэрозолей. Текущее распределение аэрозолей по размерам определяется указанными процессами, причем аэрозоли могут существовать в жидком, твердом (льдинки), твердом аморфном (снегообразном), а также в смешанном твердом состоянии. Столкновения аэрозолей в разных фазовых состояниях определяют последующую зарядку облаков, что создает электрический потенциал облаков, а также их разрядку посредством молний. Причем разрядка самой Земли происходит под действием молекулярных ионов, образуемых в результате ионизации атмосферы космическими лучами.

В докладе **Коссого И. А. с соавторами** (ИОФ РАН) рассматривалась нелинейная стадия ионизационно-перегревной неустойчивости с образованием нитей в фотоплазме самоподдерживающегося несамостоятельного СВЧ-разряда (СНС-разряда) в метане и в воздухе, завершающаяся взрывными процессами роста температуры электронов, температуры газа и плотности плазмы в плазменных нитях, в результате которых возникает полная диссоциация молекул в таких нитях и быстрый газодинамический разлет плазмы и горячего газа из плазменных нитей. Результатом этих процессов является быстрое охлаждение продуктов разлета за головной частью разряда, т. е. возникновение эффективного процесса образования и «заковки» новых соединений, полученных в результате их синтеза в плазменных нитях. Эксперименты были выполнены в воздухе в плазмохимическом реакторе в СВЧ-пучках импульсного излучения гиротрона на длине волны 4 мм при мощностях 120 и 240 кВт и длительности импульсов до 4 мс. Было установлено, что по мере роста удельного СВЧ-энерговклада средняя концентрация суммы всех окислов азота растет в объеме реактора. При этом на их образование расходуется до 50 % кислорода. Моделирование

процессов синтеза окислов азота по кинетической схеме продемонстрировало удовлетворительное согласие результатов моделирования с результатами измерений.

Промышленные и биомедицинские приложения взаимодействия плазмы атмосферного давления с поверхностями были рассмотрены в докладе **Бабаевой Н. Ю.** (ОИВТ РАН). Отмечалось, что использование плазмы атмосферного давления (диэлектрических барьерных разрядов или плазменных струй) в промышленных или биомедицинских приложениях связано с наработкой и диффузией активных частиц к обрабатываемым поверхностям. Эти поверхности редко бывают плоскими, они могут быть выпуклыми, вогнутыми или наклонными. Поверхности могут иметь множество глубоких каналов или трещин, которые затрудняют деактивацию бактерий или вирусов. Плазма обладает способностью конформно распространяться вдоль таких поверхностей. Распространение плазмы замедляется на поверхностях, обладающих высокой емкостью, и ускоряется в областях с низкой емкостью. Было показано, что плазменные стримеры в диэлектрическом барьерном разряде способны равномерно покрывать и обрабатывать поверхность, а также проникать в глубокие трещины и каналы.

Обзор последних достижений в области физики лазерной абляции был представлен **Иногамовым Н. А.** (ИТФ РАН). Были рассмотрены сложные способы доставки лазерной энергии на поверхность мишени, и проанализированы пространственные распределения интенсивности вдоль поверхности мишени и влияние этих распределений на динамику абляции. Были исследованы ситуации с плотно сфокусированными пучками, негауссовские распределения (например, пучки Бесселя) и распределения, создаваемые интерференцией лазерной электромагнитной волны и поверхностной плазмон-поляритонной волны. В докладе также рассматривалось воздействие лазерного импульса на металлическую мишень через прозрачную жидкость, поглощение импульса, распространения тепловых волн в мишени, в жидкости, а также исследовалась динамика, связанная с полями напряжений. Исследовалось расширение и охлаждение материала мишени до пересыщенного

пара, конденсации пара, а также диффузия жидкости и пара и развитие гидродинамической неустойчивости Рэлея-Тейлора. На последних стадиях процесса воздействия лазерного импульса показано, что давление в жидкости падает ниже критического давления для жидкости и начинается развитие пузырька, заполненного паром из жидкости.

В докладе **Маргароне Д.** (ELI-Beamlines, Institute of Physics Prague, Czech Republic) представлен обзор экспериментов по ускорению ионов на международной установке ELI в Чешской Республике, а также применению пучков ионов в научных и прикладных целях. Европейский проект Extreme Light Infrastructure (ELI) посвящен исследованию взаимодействия света с веществом коротких лазерных импульсов с релятивистской интенсивностью. Проект предусматривает строительство четырех установок, одна из которых (упомянутая выше) введена в строй в Праге в 2015 году (длительность лазерного импульса 10–15 фс, мощность 10 ПВт). Установка ELI-ALPS (Attosecond Light Pulse Source, 10 ПВт) строится в Венгрии. В Румынии строится третья установка, в которой планируется достижение импульсной интенсивности лазерного излучения в фокусе 10^{23} – 10^{24} Вт/см² при полной мощности пучка 10 ПВт, – ELI Nuclear Physics (ELI-NP). Решение по строительству и размещению 4-й установки с импульсной интенсивностью до 10^{25} Вт/см² и мощностью пучка лазерного излучения 10 ПВт будет принято на собрании всех участников консорциума. В Праге на установке ELI установлена пользовательская линия ионного ускорения ELIMAIA (ELI Multidisciplinary Applications of Laser-Ion Acceleration) вместе с секцией транспортировки и дозиметрии ионного пучка ELIMED, созданной в INFN, Катанья, Италия. Миссия ELIMAIA состоит в том, чтобы обеспечить стабильные, полностью характеризующиеся и перестраиваемые пучки ионов, ускоряемых лазером с длительностью импульса 10–15 фс и мощностью в пучке 10 ПВт. Планируется использовать эти пучки в медицинских, радиобиологических и научных исследованиях, проводить доклинические исследования, использовать в адронотерапии при лечении рака.

В докладе **Тихончука В.** (CELIA, Université de Bordeaux, Франция; ELI-Beamlines, Institute of Physics, Прага, Чехия) представлен обзор наиболее значимых результатов исследований в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). Исследования ведутся в двух направлениях, – прямого и непрямого лазерного сжатия термоядерной мишени. Эксперименты по непрямому сжатию направлены на зажигание термоядерной мишени. Эти исследования проводятся на крупнейшем в мире лазере NIF в Ливерморской лаборатории США (LLNL) с суммарной энергией 1,8 МДж в 192 лазерных пучках. Непрямое облучение термоядерных мишеней лазерно-индуцированным рентгеновским излучением является энергетически затратным по сравнению с прямым облучением лазерными пучками, поскольку конверсия лазерного излучения в рентгеновское излучение сопряжена с потерей значительной части лазерной энергии. Однако не прямое облучение мишеней рентгеновским излучением, заполняющим конвертор, позволяет обеспечить более однородный нагрев мишени и более устойчивое сжатие мишени, чем при прямом облучении конечным числом лазерных пучков. Установки такого же масштаба строятся во Франции, России, Китае. На этих установках предполагается сжимать термоядерные мишени как в режиме прямого, так и непрямого сжатия. Международная программа по прямому сжатию 2020 развивается на установке Омега в Рочестерском университете в США в сотрудничестве с европейскими учеными. В последних экспериментах на установке Омега с энергией лазера 30 кДж при сжатии сферической мишени в виде двухслойной оболочки удалось увеличить выход нейтронов в D-T реакции с 3×10^{13} до $1,6 \times 10^{14}$ нейтронов за импульс. Предполагается увеличить вклад лазерной энергии в мишень за счет более тщательной оптимизации и согласования параметров мишени и лазерного импульса. Активно развиваются исследования в направлении перспективных методов зажигания: быстрого зажигания (fast ignition) и зажигания сфокусированной ударной волной (shock ignition).

В докладе **Стародубцева М. В.** (ИПФ РАН) был представлен обзор экспериментальных исследований в области лабораторной

астрофизики с использованием мощных лазеров при сотрудничестве ИПФ РАН, LULI Ecole Polytechnique (Франция), ОИВТ РАН, Парижской обсерватории и Института астрономии РАН. В настоящее время лазер PEARL (ИПФ РАН) является самым мощным из работающих в России лазеров. Он может работать как в импульсном режиме (длительность импульса 1 нс, энергия в импульсе 300 Дж), так и в импульсном режиме с петаваттной мощностью (длительность импульса 50 фс, энергия импульса 30 Дж). Достоинством этой системы является возможность располагать мишень под различными углами и использовать оптические диагностики. В серии экспериментов по лабораторному моделированию процессов взаимодействия высокоскоростных потоков горячей плотной лазерной плазмы с внешними магнитными полями изучались физические процессы в пограничном слое между движущейся плазмой и магнитным полем, что является ключевым фактором для создания физических моделей внутреннего края аккреционных дисков, аккреционных колонок, астрофизических джетов и других явлений, наблюдаемых в космосе. Удалось добиться соответствия результатов численного моделирования с экспериментальными данными при учете аномального сопротивления плазмы, возникающего из-за дрейфовой неустойчивости на границе между движущейся плазмой и магнитным полем. Этот численный результат был подтвержден в экспериментах на плазменном стенде «КРОТ» (ИПФ РАН).

Основным достижением в области плазменных нанотехнологий с атомными масштабами точности был посвящен доклад **Руденко К. В. и Лукичева В. Ф.** (ФТИАН). В докладе отмечалось, что низкотемпературная химически активная плазма уже около 50 лет является одним из основных инструментов создания приборных структур интегральных схем. Однако в современной микроэлектронике минимальные топологические размеры достигли величины 7–10 нм, а толщина ряда функциональных слоев, составляющих прибор, еще меньше – до 2–3 нм. Поэтому технологии, обеспечивающие как осаждение, так и структурирование слоев с точностью в один атомный монослой весьма востребованы. Такая точность возможна при условии ис-

пользования насыщающихся (самоограничивающихся) гетерогенных реакций на поверхности формируемых наноструктур. Моно-слоиное разрешение подразумевает проведение процессов осаждения либо селективного анизотропного травления (структурирования) тонких пленок в циклическом режиме. В докладе обсуждались прецизионные процессы атомно-слоевого осаждения и атомно-слоевого травления функциональных пленок нанoeлектронных приборов, и были продемонстрированы возможные применения этих процессов, способные значительно улучшить характеристики приборов нанoeлектроники, а также создать перспективные приборы на 2D-материалах.

Секционные доклады

Секция «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы»

На секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы» (председатель секции – А. И. Мещеряков) было представлено 62 доклада (из них 15 на устных и 47 на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками 20 российских научных центров, 3 доклада выполнены сотрудниками научных центров Белоруссии и Казахстана.

Тематика докладов была связана, прежде всего, с исследованиями, проводимыми на действующих установках с магнитным удержанием плазмы, таких как токамаки Глобус-М2, ТУМАН-3М, Т-11М, стелларатор Л-2М, открытые ловушки ГДЛ, ГОЛ-3, с совершенствованием применяемых на этих установках диагностик и методов обработки экспериментальных данных. Актуальность этих докладов связана с тем, что решаемые в них задачи направлены, в конечном счете, на решение проблемы создания управляемого термоядерного реактора на основе таких установок как токамак, стелларатор и открытые ловушки.

В большинстве современных токамаков и в строящемся экспериментальном реакторе ITER осуществляется переход в Н-режим, то есть в режим улучшенного удержания горячей плазмы. Поэтому исследования транспортных переходов в современных установках по-прежнему актуальны. В док-

ладе **Неудачина С. В.** «Триггеры нелокальных процессов формирования транспортных барьеров в разных режимах генерации тока ЭЦ-волнами в токамаке Т-10» представлен анализ L-H-переходов, наблюдавшихся на токамаке Т-10, которые можно назвать полуглобальными. В экспериментальных условиях с внутренним транспортным барьером (ВТБ-событиях) в плазме токамака Т-10 спад потоков тепла и частиц происходит в зоне шириной 30–50 % от радиуса. В экспериментах было обнаружено, что переходы происходят через 5 и 15 мс после начала напуска неона.

В рамках исследований, проводимых на открытых ловушках, продолжают развиваться два направления: поиск режимов удержания плазмы с высоким давлением в линейной осесимметричной ловушке и исследование винтового удержания плазмы в открытой ловушке. В докладе **Константинова С. Е.** «Вихревое удержание плазмы с высоким давлением в открытой ловушке» был представлен анализ вихревого удержания плазмы в открытой ловушке при отношении давления плазмы к давлению удерживающего магнитного поля $\beta \sim 1$. Ранее моделирование вихревого удержания проводилось с плоским профилем плотности и неоднородной температурой. В данной работе модель расширена на случай неоднородной плотности и большого давления, причем появляется возможность описания не только желобковой неустойчивости, но также и центробежной неустойчивости плазмы. В докладе **Судникова А. В.** «Эксперименты по удержанию плазмы винтовой пробкой в линейной магнитной ловушке» приведены результаты экспериментов на вновь созданной открытой ловушке – установке СМОЛА. Основной частью установки является уединённая винтовая пробка длиной 216 см, содержащая 12 периодов винтового поля. Соотношение винтовой и продольной компонент магнитного поля в винтовой секции может быть произвольно изменено. Вращение плазмы задаётся за счёт создания контролируемого профиля радиального электрического поля. Эксперименты показали, что эффект винтового удержания плазмы существует, то есть наблюдается существенное и воспроизводимое подавление потока плазмы в режиме удержания, при этом

эффективность подавления растёт с повышением среднего пробочного отношения магнитных полей при росте эффекта подавления от линейной до квадратичной.

Дальнейшее развитие получила транспортная модель канонических профилей, разрабатываемая группой на установке токамак Т-10 (доклад **Днестровского Ю. Н.** «Транспортная модель с разными каноническими профилями для ионов и электронов»). В последние годы на Т-10 удалось наладить систематическое измерение профилей температуры ионов T_i , и появилась возможность сравнения профилей температур в разных режимах. Анализ экспериментальных данных показал, что нормированные профили ионной температуры в разрядах с омическим и СВЧ-нагревом более плоские, чем нормированные профили электронной температуры T_e . То есть становится ясным, что для транспортной модели канонические профили для T_i должны быть более плоскими, чем для T_e .

Продолжает развиваться тематика моделирования работы термоядерного источника нейтронов и его применения в гибридных реакторах. В работе **Мирнова С. В.** был дан анализ концепции гибридного энергетического реактора на основе термоядерного источника нейтронов (ТИН) с blanketом на «отвальном уране» ^{238}U . Поскольку в настоящее время на действующих АЭС используется уран, обогащенный изотопом урана ^{235}U до 4,5 %, то более 90 % добываемого природного урана идет в отвал. В мире накопилось более 1500 000 тонн отвального ^{238}U (с обогащением изотопом ^{235}U 0,2–0,3 %), и он будет накапливаться далее по мере развития атомной энергетики, работающей на медленных нейтронах. В качестве базового ТИН, способного создавать мощные потоки термоядерных нейтронов, докладчик выбрал токамак-реактор, представляющей собой физический аналог токамака ИТЭР, снабженный blanketом с отвальным ураном.

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 с отсутствием новых экспериментальных установок и низким уровнем текущего финансирования работ, связанных с термоядерными исследованиями. В 2018 году были остановлены экспериментальные работы на токамаке Т-10, проводившиеся с 1975 года. В настоящее время ведутся работы по созданию нового токамака Т-15 МД, который вступит в строй в 2020 году.

Секция «Инерциальный термоядерный синтез – ИТС»

По тематике секции "Инерциальный термоядерный синтез – ИТС" (председатель секции Г. А. Вергунова) на конференции было представлено 4 пленарных, 12 устных и 23 стендовых докладов. Можно перечислить несколько направлений исследований по ИТС и смежным проблемам, на которых сосредоточены усилия российских научных коллективов, задействованных в данной сфере.

В устных и стендовых докладах обсуждались результаты экспериментальных и теоретических исследований, проводимых российскими учеными в области взаимодействия лазерного излучения с веществом, лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), а также данные, полученные при изучении плазменных явлений в электровзрывных импульсных системах, физики высоких плотностей энергии и численного моделирования в указанных областях.

В области ЛТС продолжаются эксперименты по зажиганию D-T реакции в мишени на установке NIF (Ливерморская лаборатория США) с энергией 1,8 МДж в 192 пучках. Получен выход термоядерной энергии, превышающий энергию, вложенную в D-T горючее мишени. В настоящее время исследования направлены на повышение эффективности вклада лазерной энергии в мишень с целью примерно 15-кратного увеличения выделяющейся в результате зажигания термоядерного горения мишени энергии по отношению к энергии лазера. Активно развиваются исследования в направлении перспективных методов зажигания – быстрого зажигания (fast ignition) и зажигания сфокусированной ударной волной (shock ignition).

В расчётно-теоретических работах учёных ФИАН и ИПМ исследованы важные аспекты сжатия и горения мишеней ЛТС при различных схемах зажигания. Исследовано влияние генерации быстрых электронов в режиме ЛТС на сжатие мишени и зажигание D-T термоядерной реакции. Обоснована возможность обеспечить зажигание несимметрично сжатых мишеней при дополнительном быстром нагреве пучком лазерно-ускоренных быстрых электронов.

Продолжают совершенствоваться технологии создания мишеней для ЛТС (ФИАН). Определены условия получения смесей для создания твердого изотропного криогенного слоя мишеней для ЛТС. Проводятся исследования, направленные на получение новых типов малоплотных (а именно, низкоплотных мишеней плотностью 0,9–0,2 от плотности сплошных веществ, таких как пластик и металл) полимерных сред и изучение их пористой структуры.

Продолжаются исследования, направленные на создание источников пучков заряженных частиц и вторичного импульсного рентгеновского и нейтронного излучения при помощи интенсивных ультракоротких лазерных импульсов. Такие источники имеют очень широкий спектр применения.

В ИПФ РАН прорабатывается проект использования петаваттного импульса лазерного излучения для создания сверхярких лазерных источников нейтронов для изучения взаимодействия нейтронов с плотной горячей плазмой. Такая постановка экспериментов тесно связана с задачами нуклеосинтеза тяжелых элементов в плотной горячей плазме, а также с лабораторной астрофизикой.

Экспериментальные и расчетные работы по Z-пинчам направлены на увеличение выхода термоядерных нейтронов и мягкого рентгеновского излучения из плазмы. В этих исследованиях также происходит расширение возможностей для диагностики плазмы, развиваются физические и вычислительные модели процессов в горячей плазме Z-пинчей.

Проведены эксперименты по определению пропускания плазмы, полученной при облучении тонкой пленки индия (In) мощным потоком рентгеновской эмиссии, генерируемой вольфрамовым Z-пинчем на установке

Ангара-5-1. На основе сопоставления полученных в экспериментах данных (значения мгновенных коэффициентов пропускания, их изменение во времени, увеличение коэффициента пропускания рентгеновского излучения плазмой вследствие индуцированного облучения) с результатами численного моделирования, выполненного сотрудниками ИПМ РАН, верифицированы численные коды переноса энергии в нагретом веществе.

Рассматриваются различные схемы создания импульсных источников нейтронов, пути увеличения нейтронного выхода в разработанных системах. Во ВНИИЭФ на основе сферической газоразрядной камеры с плазменным фокусом создан источник нейтронного излучения с длительностью импульса на полувывоте 75–80 нс и интегральным выходом 10^{13} D-T нейтронов за импульс.

Представлены первые экспериментальные результаты по безнейтронному инициированию ядерной реакции протон-бор в поле виртуального катода в наносекундном вакуумном разряде (100 кВ, 1 кА, 50 нс) и моделирование всех сопутствующих процессов в рамках полного электродинамического кода КАРАТ.

Работа секции «Инерциальный термоядерный синтез» была успешной и прошла на высоком научном уровне. Следует отметить как позитивную тенденцию увеличение числа исследований, выполненных в сотрудничестве с зарубежными коллективами. Практически все представленные доклады относились к поисковым направлениям, нацеленным на решение актуальных проблем физики лазер-плазменного взаимодействия, лазерной и электроразрядной плазмы. Налаженная кооперация и широкая экспериментально-диагностическая база способствуют стабильному развитию исследований, проводимых на электроразрядных установках в различных диапазонах мощности. Вместе с тем следует отметить, что наиболее крупная установка для исследований в области инерциального термоядерного синтеза с использованием излучения мощных Z-пинчей – установка лаборатории Сандия (США) – значительно превосходит по энергетике самую крупную отечественную установку «Ангара-5». Для того чтобы успешно продолжать исследования в этой области, в России должна быть создана

установка с энергией, по крайней мере, в 5–10 раз превосходящей энергию действующей установки «Ангара-5».

Благодаря сохранению научных школ и традиций в области физики плазмы, теоретические исследования российских ученых высоко оцениваются в мире. Предложенные российскими учеными перспективные методы быстрого лазерного зажигания термоядерных мишеней и зажигания мишеней сфокусированной ударной волной в режиме ЛТС успешно исследуются в США, Японии, странах Евросоюза. В России же до сих пор нет лазерных установок, на которых можно было бы проводить эксперименты по ЛТС, реализовывать новые идеи и экспериментальные схемы, а также проводить отработку новых диагностик. Как результат, на секции было очень мало докладов, связанных непосредственно с российскими экспериментами по ЛТС, в основном это были расчетно-теоретические работы. В связи с этим важнейшим направлением работ было и остаётся реализация российского проекта строительства мегаджоульного лазера для исследований по ЛТС, направленных на зажигание термоядерных мишеней.

Секция «Физические процессы в низкотемпературной плазме»

На конференции в рамках работы секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» (председатель секции В. С. Воробьев) было заслушано 4 пленарных доклада, 23 устных доклада и 54 стендовых сообщений. Две работы выполнены в сотрудничестве с научными центрами Канады и Франции.

Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям: термодинамические и транспортные свойства так называемой теплой плотной материи (*warm dense matter*), элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы, различные применения низкотемпературной плазмы, плазма, возникающая в импульсных процессах, физика атмосферных процессов, промышленные и биомедицинские приложения низкотемпературной плазмы. По всем направлениям секции можно отметить значительный прогресс в исследованиях, результаты которых обсужда-

лись на устных и стендовых докладах, при этом следует отметить, что большое количество докладов связано с технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Ряд работ был посвящен лабораторному моделированию плазменных и газоразрядных процессов, происходящих в атмосфере. Продолжились исследования процессов, происходящие в лабораторных токовых слоях. Было показано, что существует фундаментальное сходство между токовыми слоями в хвостовой области земной магнитосферы и в лабораторных условиях. Результаты этих исследований позволяют интерпретировать целый ряд спутниковых наблюдений в хвостовой части магнитосферы Земли.

Была представлена работа по определению факторов риска здоровью при технологическом применении низкотемпературной плазмы. Было установлено, что неблагоприятными факторами при использовании технологий с применением низкотемпературной плазмы являются интенсивный шум и токсичные пылегазовые смеси, включающие озон (от 0,8 до 7 ПДК), окислы азота (от 0,3 до 2 ПДК), и высокодисперсные аэрозоли (размер частиц до 1 мкм), состоящие из оплавленных частиц исходных порошков и конденсата паров металлов и их соединений.

Продолжается поиск новых способов синтеза наночастиц, что является актуальной задачей для современной науки. Ряд работ был посвящен исследованию процессов, приводящих к образованию наночастиц в различных видах газового разряда. В частности, была представлена работа, посвященная моделированию процессов, приводящих к появлению наночастиц меди в электрическом микроразряде постоянного тока. Применение наночастиц меди занимает особое место в биомедицине. Была получена информация об условиях образования нанокластеров меди, времени их жизни, скорости роста, температуре, фазовых состояниях и структурных особенностях.

Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России. Особенно необходимо отметить новое направление, связанное с исследованиями своеобразного плазменного объекта, т. н. ультрахолодной плазмы, которая возникает

при фотоионизации атомов, охлаждаемых лазером. Это направление интенсивно развивается в ведущих мировых исследовательских центрах. Исследования российских ученых играют заметную роль в развитии этого направления.

Еще одно перспективное направление связано с применением спектральных методов диагностики разрядов.

На двух заседаниях стендовой секции было представлено 54 доклада. Значительная часть из них была связана с технологическими применениями 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 целом, работа секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» была успешной и прошла на высоком научном уровне и показала, что ряд новых направлений, таких как исследования 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 секции «Физические основы плазменных и лучевых технологий» (председатели секции А. Ф. Александров и С. А. Двинин) были заслушаны 12 устных и 34 стендовых доклада. Обсуждались результаты исследований, проводимых в институтах РАН, в других ведущих научных центрах России, а также в научных организациях ряда стран СНГ. Часть докладов была представлена международными авторскими коллективами, в состав которых входили ученые из Франции (CNRS, Ecole Polytechnique, Sorbonne university, University of Pierre and Mary Curie), США (Princeton university), Таджикистана и Беларуси.

Среди широкого спектра тематик представленных докладов следует выделить несколько наиболее важных направлений: создание технологий для новых материалов электроники (в том числе пленок), исследова-

ние физических процессов в разрядах для технологии обработки поверхности материалов (включая микроэлектронику), взаимодействие плазмы и ускоренных пучков частиц с поверхностью, изучение процессов в ускорителях электронов и ионов, исследование плазмохимических процессов (включая горение и очистку воды), и экспериментальное исследование явлений в атмосферных разрядах. Были представлены также доклады, посвященные проблеме воздействия плазмы на газовые потоки (в плазменной аэродинамике). Один из докладов был посвящен магнитоимпульсной герметизации тонкостенных плазменных контейнеров. Можно отметить серию докладов, посвященных технологиям генерации СВЧ-излучения с помощью электронных пучков в плазменных волноводах и теоретическому исследованию поведения электромагнитных полей в системах с плазмой. Следует отметить, что, по сравнению с 2017 годом, увеличилась доля докладов, посвященных экспериментальным исследованиям.

Большой интерес вызвал доклад, посвященный возможности получения горячей плазмы при пробое газов высокого давления в сильных магнитных полях. Было показано, что сильное продольное магнитное поле ($H \sim 3,2 \times 10^7$ А/м) при пробое газов высокого давления в коротких временных промежутках существенно увеличивает удельную мощность, проводимость и температуру плазмы на стадии канала-дугового разряда. Полученные результаты дают надежду на возможность получения в такой плазме высоких температур.

В одном из докладов исследовалось применение плазменных электрических реактивных двигателей для обеспечения компенсации аэродинамического сопротивления при движении миниспутников в ионосфере. Изучалась возможность замены части привозимого на борт космического аппарата рабочего тела, на которых работают двигатели, на газы верхней атмосферы.

Среди экспериментальных исследований, посвященных созданию новых материалов, наибольший интерес вызвал доклад, в котором плазменная струя мощного плазмотрона применена для синтеза углеродных наноматериалов, что позволяет управлять производительностью синтеза и получать порошки с за-

данными составом, формой и размером наночастиц. Так, добавление смеси газов пропан-бутана в плазменные струи гелия, аргона и азота позволяет в зависимости от давления в реакторе (350–710 Торр) и его расхода (0,1–0,3 г/с) синтезировать углеродные волокна, графен, гидрированный графен и N-графен с массовым содержанием до 90 %, а также квантовые точки размером до 5 нм.

Работа секции в целом показала, что в области плазменных и пучковых технологий ведется активная исследовательская работа, причем число работ, которые можно характеризовать, как НИОКР растет.

Несмотря на то, что на секции были представлены доклады по большинству направлений развития современных технологий, произошло увеличение доли экспериментальных исследований, и заметно стремление авторов к улучшению эффективности установок. Состав и тематика исследований показывают, что модернизация установок и развитие новых диагностических методов сдерживаются ухудшением государственного финансирования исследований. С другой стороны, следует отметить сокращение количества докладов из крупных периферийных городов России, что указывает на то, что вследствие экономической стагнации в стране, местная промышленность сокращает финансирование прикладных научных исследований и поддержку местных научных кадров.

Секция «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего»

На секцию «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего» в этом году было представлено 51 доклад; из них 8 были доложены на устном заседании, 43 – на стендовом.

Доклады устного заседания были посвящены состоянию работ по созданию систем международного проекта ИТЭР (ITER). В соответствии с графиком монтажа токамака ИТЭР, на площадке сборки свозятся конструкции, которые изготовлены в странах-участницах проекта. В 2018 году Россия полностью выполнила свои обязательства по созданию сверхпроводников для катушек тороидального и полоидального поля. Начались испытания катушек тороидального поля при

захолаживании их жидкими азотом и гелием, т. н. режим «Cold test». В самом объемном здании ИТЭР собираются катушки полоидального поля, которые также должны пройти испытания в режиме захолаживания. В Европе и частично в Южной Корее изготавливаются части вакуумной камеры токамака. В США завершается намотка центрального соленоида. Китай начал испытания созданных криофидеров, подводящих электроэнергию непосредственно к токамаку. Проводится сборка основного криостата.

В настоящий момент в рамках обязательств перед международной организацией ИТЭР в российском домашнем агентстве разрабатывается диагностическая система «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 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 в токамаке-реакторе ИТЭР.

Управление работой реактора ИТЭР требует разработки и создания необходимых средств диагностики термоядерной плазмы. Одним из них является так называемый метод активной спектроскопии. Активная спектроскопия (английская аббревиатура CXRS – Charge Exchange Recombination Spectroscopy) основана на использовании диагностического или нагревного пучка атомов, вводимого в токамак. Эта диагностическая система для ИТЭР также разрабатывается и 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 токамака с высоким пространственным разрешением.

Важной частью экспериментальной программы ИТЭР станет мониторинг электронных параметров в диверторе. Знание элект-

тронной температуры и плотности плазмы в диверторном объеме важно для контроля тепловой нагрузки на диверторные пластины и контроля положения выхода сепаратриссы магнитной конфигурации токамака на диверторные пластины. Разработка диагностического комплекса томсоновского рассеяния в плазме 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 реализации этой 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 теплового излучение нагретых элементов первой стенки.

Одной из нерешенных задач проекта ИТЭР является проблема эрозии первой стенки и конструкций дивертора при их взаимодействии с плазмой. По сравнению с существующими установками для магнитного удержания плазмы, токамак ИТЭР будет иметь большую длительность разряда (до 400 секунд) 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 плазмы на поверхность дивертора. В этих случаях эрозия материала значительно увеличится, на поверхностях 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 плазмы. Кроме этого, накопление большого количества микрочастиц в вакуумной камере может привести к накоплению радиоактивного трития, количество которого ограничено требованиями радиационной безопасности.

Работа секции была успешной. Она показала существенный прогресс в научно-исследовательских и конструкторских рабо-

тах в поддержку проекта ИТЭР в рамках ответственности по поставкам Российской Федерации.

Заключение

Таким образом, по результатам работы конференции можно сделать следующие выводы.

1. XLVI 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 46-й раз и собрала на свои заседания более 800 участников из научных центров России и других стран. Число российских (68) и иностранных организаций (13), представивших доклады на конференцию, стабильно остается на достаточно 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 исследования как на 2–3 крупных установках УТС (сверхпроводящие

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 мультиметаваттных лазерных систем, направленных на решение проблемы ЛТС и смежных задач. Также целесообразно создать сеть из нескольких лазерных установок с меньшей мощностью, на которых было бы возможно проверять новые идеи и экспериментальные схемы, а также проводить отработку новых диагностик. Именно так эффективно работают научные программы технологически развитых стран Европы, Японии и США. В России стратегических долгосрочных планов строительства подобных 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.

6. Остается заметным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными совместно с учеными ведущих научных центров Европы 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.

Оргкомитетом конференции издана книга «XLVI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» Сборник тезисов докладов. – М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. – 320 с. ISBN 978-5-6042115-0-2.

Материалы конференции также размещены на сайте конференции http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVI/Zven_XLVI.html

Работа выполнена в соответствии с государственными заданиями №№ АААА-А18-118013000279-8 (Фундаментальные проблемы динамики, удержания и нагрева плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях), АААА-А18-118013000262-0 (Физика релятивистских широкополосных источников СВЧ-излучения с быстрой перестройкой частот), АААА-А18-118013000293-4 (Фундаментальные основы плазменных, микроволновых и лучевых технологий), по программе РАН I.13П «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии» и в рамках реализации проекта РФФИ 19-02-20001 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. «XLVI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» 18–22 марта 2019 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. – М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. – 320 с. ISBN 978-5-6042115-0-2.
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVI/Zven_XLVI.html

Scientific researches on plasma physics and plasma technologies in Russia in 2018

(Review of reports of the XLVI International Zvenigorod Conference, 2019)

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

¹ Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
38 Vavilov st., Moscow, 199991, Russia
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

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

Received June 3, 2019

The review is given on the most interesting new results presented at the XLVI International Zvenigorod conference on plasma physics and controlled fusion which took place in Zvenigorod city of Moscow region on March 18–22, 2019. The analysis of basic achievements in the field of plasma physics in Russia and their comparison with scientific researches abroad is carried out.

Keywords: plasma physics, nuclear fusion, conference, results.

REFERENCES

1. Proceedings of the XLVI International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Zvenigorod, Moscow Region, Russia. March 18–22, 2019. ISBN 978-5-6042115-0-2 (Published by PLAZMAIOFAN Co Ltd. 2019) [in Russian].
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVI/Zven_XLVI.html