

Основные итоги исследований в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в России в 2017 году

*(Обзор материалов XLV Международной Звенигородской конференции
по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу,
2–6 апреля 2018 г.)*

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

Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на ежегодной XLV Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся со 2 по 6 апреля 2018 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.

Введение

XLV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде Московской области со 2 по 6 апреля 2018 года [1, 2].

На конференции было представлено 299 научных докладов из 75 российских и 23 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее количество зарегистрированных авторов докладов составило более 800 человек.

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

1. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия – 60
2. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия – 37
3. Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия – 28

4. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия – 26
5. Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия – 25
6. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия – 23
7. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Административный округ Троицк, Москва, Россия – 23
8. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия – 21
9. Московский физико-технический институт (Государственный университет), г. Долгопрудный, Московская обл., Россия – 19
10. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия – 17
11. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия – 17
12. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия – 17
13. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия – 16
14. Российский университет дружбы народов, Москва, Россия – 14
15. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, С.-Петербург, Россия – 12
16. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия – 11
17. Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия – 7

Гришина Ирина Анатольевна¹, с.н.с., к.ф.-м.н.
Иванов Вячеслав Алексеевич^{1,2}, зав. отделом, доцент, к.ф.-м.н.
Коврижных Лев Михайлович¹, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор.
¹ Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, 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 6 июня 2018 г.

18. Национальный исследовательский университет МЭИ, Москва, Россия – 7
19. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия – 7
20. Центр фундаментальных и прикладных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия – 5
21. Московский технологический университет (МГТУ МИРЭА), Москва, Россия – 5
22. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия – 5
23. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия – 4
24. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия – 4
25. Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, С.-Петербург, Россия – 4
26. Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н. И. Пирогова Минздрава России, Москва, Россия – 4
27. Институт космических исследований РАН, Москва, Россия – 3
28. Институт химии растворов РАН им. Г. А. Крестова, Иваново, Россия – 3
29. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежалева, Москва, Россия – 3
30. Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург, Россия – 3
31. Исследовательский центр им. М. В. Келдыша, Москва, Россия – 3
32. Ecostandard group, Москва, Россия – 3
33. Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка, Россия – 2
34. Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия – 2
35. Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина, РАН, Москва, Россия – 2
36. АО «Красная Звезда», Москва, Россия – 2
37. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, Казань, Россия – 2
38. Национальный исследовательский университет МАИ, Москва, Россия – 2
39. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва, Россия – 2
40. ЗАО Спектрал-Тех, С.-Петербург, Россия – 2
41. Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез – Международные проекты», Москва, Россия – 2
42. Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Россия – 2
43. ЗАО Машиностроительный завод «Алмаз», Москва, Россия – 1
44. Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Россия – 1
45. ОАО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А. А. Бочвара», Москва, Россия – 1
46. Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Московская обл., г.п. Менделеево, Россия – 1
47. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия – 1
48. Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина, Москва, Россия – 1
49. Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия – 1
50. Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д. К. Беляева, Иваново, Россия – 1
51. Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия – 1
52. Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия – 1
53. Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия – 1
54. Институт астрономии РАН, Москва, Россия – 1
55. Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия – 1
56. Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия – 1
57. Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова, Москва, Россия – 1
58. Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва, Россия – 1
59. ООО Иоффе Фьюжн Текноложи, С.-Петербург, Россия – 1
60. Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва, Россия – 1
61. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, С.-Петербург, Россия – 1
62. Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия – 1
63. Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Казань, Россия – 1

64. Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Россия – 1
65. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, Саранск, Россия – 1
66. Международный лазерный центр Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия – 1
67. Нижегородская государственная медицинская академия, Нижний Новгород, Россия – 1
68. АО «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации», Москва, Россия – 1
69. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ технической физики им. академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Россия – 1
70. ООО «СВД.Спарк», Административный округ Троицк, Москва, Россия – 1
71. ПАО «Федеральная сетевая компания единой энергетической системы», Москва, Россия – 1
72. Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, г. Жуковский, Московская обл., Россия – 1
73. Центральный институт авиационного моторостроения, им. П. И. Баранова, Москва, Россия – 1
74. ООО «Санкт-петербургское Объединение «Энергопул», С.-Петербург, Россия – 1
75. Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского, Москва, Россия – 1

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

1. Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь – 6
2. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada – 4
3. Aalto University, EURATOM-TEKES, Espoo, Finland – 2
4. ITER Organization, Cadarache, Saint-Paul-Lez-Durance, France – 2
5. Princeton University, Princeton, USA – 2
6. Филиал «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр республики Казахстан», Курчатов, Казахстан – 2
7. Таджикский национальный университет, Душанбе, Таджикистан – 2
8. Centre de Physique Théorique, Marseille, France – 1
9. Ecole Polytechnique, Paris, France – 1
10. GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Darmstadt, Germany – 1

11. Helmholtz Institute Jena, Jena, Germany – 1
12. Institute of Interfacial Process Engineering and Plasma Technology IGVP, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany – 1
13. Institute Jean Lamour, Université de Lorraine, Nancy, France – 1
14. Max-Planck Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany – 1
15. Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency, Kizugawa, Kyoto, Japan – 1
16. Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati (Rome), Italy – 1
17. Laboratory for Plasma Physics – ERM/KMS, Association EURATOM – BELGIAN STATE, Brussels, Belgium – 1
18. Racah Institute of Physics, Hebrew University, Jerusalem, Israel – 1
19. Technischen Universität München, Zentrum Mathematik, Garching, Germany – 1
20. University of Ljubljana, Ljubljana, Slovenia – 1
21. University of Pisa, Pisa, Italy – 1
22. Научно-практический центр гигиены, Минск, Беларусь – 1
23. Сухумский физико-технический институт, Сухуми, Абхазия – 1

Основная часть

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.

На конференции состоялись четыре пленарных заседания, на которых было заслушано 16 обзорных докладов о результатах отечественных и мировых исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям. Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 72 устных и 211 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, а также прикладных работ по плазменным и лучевым технологиям. Были представлены доклады по смежным с физикой плазмы проблемам.

В связи со 110-й годовщиной со дня рождения участники конференции почтили память академика Е. К. Завойского. Как отмечалось в докладе **Калинина Ю. Г.** (НИЦ Курчатовский институт), работы Е. К. Завойского значительно обогатили отечественную и мировую науку. Его работы 1941–1944 гг., несмотря на тяжелейшие условия военного времени, привели к открытию нового физического явления – электронного парамагнитного резонанса, давшего начало важнейшему направлению физики – радиоспектроскопии. В 1947–1951 гг. он принимал участие в создании атомного оружия. В дальнейшем Евгений Константинович выдвинул ряд оригинальных идей, реализация которых принесла ряд выдающихся результатов, в частности:

1. Была предложена и реализована идея создания источников поляризованных протонов, основанная на использовании эффекта пространственного разделения пучка атомов водорода в слабом неоднородном магнитном поле.

2. Была сформулирована и реализована новая методика электронно-оптической хронографии, позволяющая регистрировать световые импульсы со сверхвысоким (менее 10^{-12} с) временным разрешением.

3. Открыто и исследовано новое физическое явление – аномальное сопротивление и турбулентный нагрев плазмы электрическим током, обусловленные взаимодействием частиц с плазменными колебаниями, возбуждаемыми током.

4. Была предложена идея поджига термоядерной мишени при воздействии на неё мощных импульсных релятивистских электронных пучков и рассмотрено несколько схем её реализации.

1 мая 2018 года исполнилось 100 лет со дня рождения академика Г. И. Будкера. О его неоценимом вкладе в науку, его идеях, которые во многом определили пути развития многих областей физики, в частности физики горячей плазмы, рассказывалось в докладе **Иванова А. А. и Приходько В. В.** (Институт ядерной физики СО РАН). В докладе был представлен краткий обзор наиболее значительных работ Г. И. Будкера, связанных с физикой плазмы и управляемым термоядерным синтезом. Отмечалось, что результаты этих работ уже вошли в учебники и стали классическими. К основным достижениям Г. И. Будкера можно отнести ряд работ, посвящённых теории уранграфитовых реакторов и теории кинетики и регулирования атомных реакторов. Также им разрабо-

таны основы удержания плазмы в многопробочном магнитном поле. На основе его идей созданы импульсные безжелезные бетатроны и синхротроны, реализован метод встречных пучков для исследований по физике элементарных частиц, осуществлены перезарядная инжекция протонов в кольцевые ускорители и электронное охлаждение протон-антипротонных пучков.

Обзор новых результатов термоядерных исследований, проведенных в европейских научных центрах, был дан в докладе **Онгена Дж.** (Королевская военная академия Бельгии, Брюссель). Участники конференции познакомились с планом экспериментальных компаний на токамаке JET (Великобритания). На токамаке JET идет подготовка к будущим экспериментальным кампаниям с тритиевой и дейтериево-тритиевой плазмой, целью которых будет приобретение опыта работы на токамаке-реакторе и расширение научной базы данных в области управляемого термоядерного синтеза, что необходимо для подготовки работы строящегося международного токамака ITER. Запланировано проведение ряда компаний с дейтериевой (D), водородной (H), водородно-тритиевой (H-T) и водородно-дейтериевой (H-D) плазмой. Выход нейтронов с энергией 14 МэВ составит $1,7 \times 10^{21}$, что в семь раз превышает суммарный выход всех предыдущих D-T-компаний. Эксплуатационный запас трития будет увеличен до 60 г, что в три раза превышает количество трития, доступного во время D-T-экспериментов в 1997 г. В докладе говорилось, что новый метод высокочастотного нагрева плазмы, использующий ионы трех сортов, был успешно опробован на токамаках JET и Alcator C-Mod (MIT, Бостон, США). Метод основан на обеспечении условий, при которых область непрозрачности, в основном, определяемая двумя основными сортами ионов, находится вблизи циклотронного резонанса ионов третьего сорта. Проведенные эксперименты на токамаках JET и Alcator C-Mod показали эффективность этого метода нагрева плазмы. Участники конференции также познакомились с результатами первых двух экспериментальных компаний, успешно проведенных на стеллараторе Wendelstein 7-X (Германия).

Доклад **Химченко Л. Н. и Красильникова А. В.** (Проектный центр ИТЭР) был посвящен ходу сооружения крупнейшего токамака ИТЭР, создаваемого международным сообществом в составе семи стран участниц проекта: Китай, Европейский союз, Индия, Япония, Корея, Россия и США. Отмечалось, что цель этого международного проекта состоит не только в том, чтобы продемонстрировать физику термоядерного горения и

технику, способную это обеспечить, но и доказать, что можно успешно организовать создание прототипа термоядерной станции совместными усилиями стран с различными стандартами и культурой. В докладе были представлены ход создания основных систем ИТЭР участниками проекта и управленческие решения, направленные на оптимизацию сборки токамака и создание инфраструктуры. Также рассматривались определенные плазменно-физические явления, которые могут повлиять на дальнейшую программу исследований. В докладе были представлены достижения российской стороны в изготовлении и поставке ряда систем для ИТЭР.

В обзорном докладе **Смолякова А. И. с соавторами** из РУДН, НИЦ Курчатовский институт, Университет Саскачевана (Канада), МФТИ рассматривались вопросы, связанные с неустойчивостями и аномальным транспортом частиц, возникающими в частично замагниченной плазме во внешних скрещенных электрическом и магнитном полях. Эти вопросы чрезвычайно важны для плазменной обработки материалов и в плазменных системах электрической тяги (холловские двигатели, магнетронные конфигурации и др.). В представленном обзоре теоретических моделей и экспериментальных результатов по исследованию колебаний и неустойчивостей в частично замагниченной плазме в скрещенных полях обсуждались следующие фундаментальные колебания, присутствующие в частично замагниченной плазме: ионная звуковая мода, нижнегибридная мода и антидрейфовая мода, связанная с градиентом плотности плазмы.

Были представлены результаты численного моделирования нелинейной стадии развития неустойчивостей и возникающего переноса плазмы. Расчёты продемонстрировали, что в плазме происходит генерация переменного тока электронов, величина которого хорошо согласуется с типичными экспериментальными данными. Было показано, что, несмотря на то, что наиболее неустойчивыми являются коротковолновые моды, преобладающий вклад в аномальный перенос энергии в плазме обеспечивается крупномасштабными колебаниями. Продемонстрирован нелинейный переход энергии в крупномасштабные моды. Исследованы эффекты продольного движения электронов и граничные условия в пристеночном слое плазмы. Также обсуждалась роль электронной дрейфово-циклотронной неустойчивости плазмы, которая изучалась в PIC-моделировании.

Большой интерес вызвал доклад **Фортова В. Е.** (ОИВТ РАН), посвященный исследованиям физических свойств плазмы при экстремально высоких давлениях и температурах. Отмечалось, что такие

исследования играют важную роль в понимании структуры и эволюции многих астрофизических объектов: нейтронных звезд, кварковых и «странных» звезд, черных дыр, пульсаров, сверхновых звезд, гигантских планет, экзопланет, а также для многих современных энергетических технологий. В докладе обсуждались импульсные методы генерации экстремально высоких давлений и температур в плотной неидеальной плазме, генерируемой сжатием и необратимым нагревом вещества в интенсивных ударных волнах и волнах адиабатического расширения. Для создания мощных ударных волн в плазме мегабарного диапазона давлений использовались цилиндрические и сферические взрывные устройства, интенсивные лазерные и корпускулярные пучки, высокоскоростной удар и «мягкое» рентгеновское излучение. Были проанализированы полученные экспериментальные данные и физические модели сильно неидеальной плазмы: плазменные фазовые переходы, деформация энергетического спектра сжатых ионов и атомов. На основе экспериментальных данных были представлены широкодиапазонные полуэмпирические уравнения состояния плазмы. Эти термодинамические модели применялись для многомерного компьютерного моделирования импульсных высокоэнергетических процессов в экстремальных условиях.

Доклад **Сона Э. Е.** (ОИВТ РАН) был посвящен проблеме турбулентности низкотемпературной плазмы (НТП). В докладе отмечалось, что возникновение турбулентности необходимо учитывать в таких важных приложениях низкотемпературной плазмы, как проточные реакторы с большими скоростями потоков НТП. К ним относятся плазменные реакторы, плазменные ускорители и ракетные двигатели. Одной из центральных проблем в этих системах является плазменная турбулентность, переаперирование как гидродинамическое, так и магнитное. НТП возникает в задачах входа в плотные слои атмосферы, используется в методах управления плазменными потоками электромагнитными полями. Существует несколько типов турбулентного движения в НТП. Во-первых, это гидродинамическая турбулентность в среде с энергвыделением и объемными силами, к которым относятся, помимо гравитационной, сила, действующая на объемные заряды. Во-вторых, сила Ампера со стороны магнитного поля. В-третьих, джоулево энергвыделение наряду с высокими температурами и развитием плазмохимических неустойчивостей и горением, переходящих в турбулентность, проявляется в различных наблюдаемых явлениях. В докладе рассматривались вопросы применения численных методов и теории к описанию неклассических направлений турбу-

лентных течений, таких как воздействие внешних объемных сил гравитационной и электромагнитной природы, многофазных сред, протекание химических реакций и горения, влияние излучения, сверхзвуковых и гиперзвуковых потоков на турбулентность и обратного влияния турбулентности на неклассические турбулентные течения.

Результаты работы мобильного автономного испытательного комплекса, позволяющего создавать имитацию разряда молнии в грунте в полевых условиях, были изложены в докладе **Грабовского Е. В.** (ТРИНИТИ). В докладе рассматривались вопросы, связанные с обеспечением надежной передачи энергии потребителю, что является важной задачей современной электроэнергетики. Комплекс предназначен для тестирования систем защитного заземления при воздействии молнии. Целью является сведение к минимуму негативного воздействия ударов молнии на объекты электроэнергетики. Комплекс создает импульс тока амплитудой до 100 кА в грунте при напряжении свыше 2 МВ, измеряет временной профиль тока и напряжения, шаговое напряжение, локальные величины напряженности магнитного поля, а также проводит скоростную видеосъемку испытательной площадки. Энергосодержание комплекса составляет 4 МДж, что позволяет моделировать разряд молнии по длительности фронта нарастания и спада тока. Для некоторых грунтов на территории Московской области были измерены импульсные значения сопротивления грунта между заземлителями, помещенными в почву на глубину порядка 1 м и разнесенными друг от друга на расстояние 50 м. Полученные данные свидетельствуют о том, что при протекании тока могут возникать искровые каналы внутри грунта. Установлено резкое снижение сопротивления заземления при удельном сопротивлении около 100 Ом·м и токе свыше 10 кА. Выявлен начальный временной участок, где сопротивление заземления определяется скин-эффектом в земле. Показано, что сопротивление заземления продолжает свое снижение за фронтом импульса тока вследствие роста искровых каналов в грунте. Динамика изменения сопротивления заземления во времени не связана с образованием сплошной зоны ионизации у поверхности заземляющих электродов и объясняется одновременным ростом нескольких протяженных искровых каналов от исследованного заземлителя.

Доклад **Воробьева В. С.** с соавторами (ОИВТ РАН) был посвящен свойствам ультрахолодной неидеальной плазмы, которая образуется при фотоионизации атомов, охлаждаемых лазером. При концентрации зарядов $\sim(10^8-10^{10})\text{ см}^{-3}$ и температуре $\sim 1\text{ К}$ и ниже ультрахолодная плазма

остаётся невырожденной, однако при этом параметр взаимодействия электронов с ионами может превышать единицу. В таких условиях появляется возможность изучать экспериментальными и теоретическими методами целый спектр интересных физических явлений, например, рекомбинацию заряженных частиц и электронный перенос. В условиях ультрахолодной плазмы температура не является мерой кинетической энергии частиц. Электрон набирает энергию движения, ускоряясь или замедляясь в полях своих ближайших соседей. Дебаевский радиус теряет смысл радиуса экранирования, который теперь определяется ближайшей частицей противоположного заряда. Эти представления позволили развить теорию рекомбинации и электронного переноса и получить аналитические выражения для коэффициентов тройной рекомбинации, электронной и ионной диффузии, электро- и теплопроводности, а также вязкости. Эти выражения при слабой неидеальности совпадают с известными формулами, полученными в газокинетическом приближении, а в условиях заметной неидеальности зависят от комбинации плазменной частоты и радиуса ячейки Вигнера-Зейтса.

Первые результаты, полученные на модернизированном сферическом токамаке Глобус-М2, обсуждались в докладе **Минаева В. Б.** (ФТИ РАН). Для достижения перспективной, с точки зрения физики, области параметров плазмы с субтермоядерными температурами и столкновительностью значительно ниже единицы были максимально увеличены инженерные характеристики токамака. Компактная магнитная конфигурация плазменного шнура аналогична конфигурации, существовавшей в Глобус-М. При этом ток по плазме увеличен до 0,5 МА, а тороидальное магнитное поле – до 1 Тл. При изготовлении электромагнитной системы были использованы новые высокопрочные материалы. Внутренние сегменты обмотки тороидального магнитного поля и центральный соленоид изготовлены из холоднокатанного серебросодержащего медного сплава с отверстием для канала охлаждения. Все обмотки полоидального магнитного поля также охлаждаются водой. Опорная структура электромагнитной системы усилена с помощью верхнего силового кольца, связанного с нижним посредством четырех крестовин, и ограничивает смещение обмотки тороидального поля на уровне 3 мм при максимальной нагрузке. Из-за измененной конструкции обмотки величина гофрировки тороидального магнитного поля снижена до 0,4 % на внешней границе плазменного шнура. Также была проведена модернизация источников питания для обеспечения предельно высоких токов в обмотке тороид-

дального поля и в центральном соленоиде. Физический пуск токамака Глобус-М2 осуществлен в конце 2017 года. В докладе обсуждались результаты первой экспериментальной кампании.

Доклад большого коллектива авторов, посвященный экспериментам с вольфрам-литиевыми диафрагмами на токамаке T-10, был представлен **Немцем А. Р.** (НИЦ Курчатовский институт). В экспериментах использовались вольфрамовые диафрагмы (W-диафрагмы) и подвижный литиевый лимитер, изготовленный на основе капиллярно-пористой структуры. Отмечалось, что в предшествующих экспериментах за счет литиизации камеры удалось значительно снизить поступление примесей в разряд при омическом нагреве плазмы, а также электронно-циклотронном резонансом (ЭЦР) нагреве с вводимой СВЧ-мощностью до 2,5 МВт, снизить напряжение на обходе плазменного шнура и улучшить воспроизводимость разряда в широком диапазоне параметров плазмы. В новых условиях по результатам экспериментов по исследованию транспорта собственных и инжектированных примесей было получено общее выражение для коэффициентов аномального переноса основных примесей плазмы: ядер гелия (He), ионов углерода (C), ионов кислорода (O) и ионов вольфрама (W) в омическом режиме нагрева плазмы. В результате исследований флуктуаций плотности плазмы методом корреляционной рефлектометрии подтверждена сильная полоидальная асимметрия турбулентности. Сравнение корреляционных характеристик квазикогерентных колебаний на частотах порядка 100 кГц вдоль силовых линий при изменении направления магнитного поля и тока плазмы позволило сделать вывод о том, что колебания имеют дрейфовую, а не магнитную природу и распространяются с наружной стороны тора на внутреннюю поверхность со скоростью порядка ионно-звуковой. Изучено влияние радиационного охлаждения периферии на режим удержания плазмы в условиях вольфрам-литиевых диафрагм. Показано, что при инъекции таких газов как неон (Ne) и гелий (He) с потоками до $1,5 \times 10^{21}$ частиц/с возрастает энергосодержание плазмы как в омическом режиме, так и при дополнительном ЭЦР-нагреве. В разрядах с инъекцией гелия обнаружено увеличение предельной плотности плазмы по сравнению с разрядами без напуска этой примеси. В диапазоне тепловых нагрузок 1–5 МВт м⁻² наблюдалось интенсивное растрескивание элементов лимитеров T-10, изготовленных из вольфрама (W) марки ВМП (материал пластин дивертора международного токамака ИТЭР). На внутренней стороне кольцевого лимитера в разрядах с мощным ЭЦР-нагревом в зоне интенсивного выхода энергии W-элементы подвергаются особенно

сильному растрескиванию и оплавлению. Предполагается, что значительную роль в их разрушении играют униполярные дуги, многочисленные следы которых наблюдаются на поверхности вольфрама.

В обзорном докладе **Подгорного И. М.** (ИНАСАН) и **Подгорного А. И.** (ФИАН) рассматривались физические аспекты возникновения солнечных вспышек. Отмечалось, что солнечная вспышка является одним из самых интересных явлений в космосе, которое создает плазменное облако с плотностью $\sim 10^{11}$ см⁻³ и температурой до 3×10^3 эВ. Такое плазменное облако с суммарной энергией $\sim 10^{32}$ эрг удерживается магнитным полем в солнечной короне. Вспышки сопровождаются выбросом сверхзвукового потока плазмы, который приводит к сильным возмущениям магнитного поля Земли (магнитные бури). Происходит генерация солнечных космических лучей. Вспышка появляется над активной областью (местом на фотосфере сильного магнитного поля) после того, как магнитный поток активной области становится больше 10^{22} Мкс. Показано, что распределение магнитного поля в активной области остается практически неизменным во время вспышки. Это означает, что диссипация магнитной энергии во время вспышки происходит в короне. Доказано, что протоны солнечных космических лучей ускоряются в электрическом поле Лоренца при быстром магнитном пересоединении во вспышечном токовом слое. Фотографии предвспышечного состояния указывают на накопление энергии для вспышки в короне в предвспышечных высокотемпературных структурах. Предвспышечные структуры наблюдаются в спектральных линиях высокоионизованных ионов железа FeXVIII, FeXXIII, FeXXIV за несколько часов до больших солнечных вспышек. Спектральные линии соответствуют температуре 6,3 МК, 16 МК и 20 МК. Эти явления могут быть использованы для прогнозирования образования солнечных космических лучей.

В обзорном докладе **Кандо М.** (Kansai Photon Science Institute, Japan) рассказывалось о создании компактных лазерных ускорителей заряженных частиц в Японии. Разрабатываются как электронные, так и ионные ускорители. Установки первого и второго поколения уже используются при терапии онкологических больных с помощью пучка ускоренных тяжелых ионов. Установки используют концепции как линейного ускорителя, так и синхротрона. В лазерных ускорителях используется схема ускорения оболочки мишени с помощью сверхсильного лазерного излучения при нормальном падении излучения на мишень. При этом на задней стороне тонкой фольги, облученной лазером, формируются сильные квазистатические

электрические поля. Для ускорения электронов используется схема ускорения лазерной кильватерной волной. При этом для ускорения электронов используются плазменные волны, возбуждаемые пондеромоторной силой короткого интенсивного лазерного импульса в тонком слое плазмы. Создание каскадов ступеней усиления позволяет получать воспроизводимые электронные пучки с заданными параметрами. Такие электронные пучки могут быть также использованы для создания компактного рентгеновского лазера на свободных электронах.

Вопросам создания мощных лазерных систем на неодимовом стекле для изучения экстремальных состояний вещества и исследований в области инерциального синтеза был посвящен доклад **Деркача В. Н.** (ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ). Отмечалось, что предельные энергетические характеристики существующих усилительных систем ограничены возможностями транспортировки интенсивного излучения оптическими элементами и ограничением величины энергии в реверсоре. Предложено организовать усиление лазерного излучения в режиме многократного насыщения. В предложенном проекте уменьшено количество деталей, участвующих в усилении и транспортировке излучения, снижена расходимость излучения; увеличено КПД извлечения запасенной энергии, повышены функциональные возможности установки, увеличена частота повторения, улучшена эргономика размещения, снижена цена канала и эксплуатационных расходов. По результатам расчетов показано, что в схеме из 14 активных элементов размером $495 \times 260 \times 40$ мм в пучке размером 220×220 мм при коэффициенте заполнения 0,85 без превышения интеграла $B = 1,8$ радиан может быть получена энергия импульса до 7,5 кДж для разных форм импульсного излучения. Расходимость уменьшена до 2×10^{-5} радиан, пиковые выбросы в наиболее нагруженных местах тракта составляют менее 25 % в единицах средней интенсивности и не превышают 15 Дж/см² для длительности импульса 3 нс.

В обзорном докладе **Кучугова П. А. с соавторами** (ФИАН, ИПМ РАН) рассматривались вопросы, связанные с горением термоядерных мишеней прямого сжатия в условиях пространственно-временной неоднородности облучения лазерным импульсом. По мнению авторов, оптимальным подходом к реализации соответствующих процессов горения является сферически симметричное сжатие тонких оболочек инертного вещества (поглощающего поступающую энергию) и вещества, содержащего изотопы водорода, способные к реакции синтеза (термоядерное горючее). Поэтому задача макси-

мально симметричного освещения мишени и столь же симметричного поглощения энергии является принципиально важной. В случае прямого сжатия мишени необходимо добиться симметрии воздействия лазерного излучения на оболочку. В докладе были проанализированы проведенные за последние пять лет численно-теоретические исследования мишеней прямого сжатия с учётом всех возможных отклонений от симметрии: геометрия освещения конечным количеством лазерных пучков, нарушение симметричности воздействия из-за возможного дисбаланса энергии в пучках, промаха пучков, сдвига термоядерной капсулы из точки позиционирования пучков, нарушения синхронизации действия отдельных пучков. На основании большого цикла расчётно-теоретических работ для указанного диапазона энергий было показано, что зажигание и достижение коэффициента усиления термоядерной энергии около 10 вполне возможно для мишеней прямого облучения. Был сделан вывод о возможности получения значительного термоядерного энерговыделения и выхода нейтронов на уровне 10^{18} – 10^{19} нейтронов за импульс в мишенях прямого сжатия для импульсной энергии излучения 2–3 МДж на второй гармонике неодимового лазера.

О состоянии и перспективах исследований по искусственному интеллекту участникам конференции рассказал **Шумский С. А.** (ФИАН). Докладчик отметил, что в последние годы в исследованиях по Искусственному Интеллекту (ИИ) произошел настоящий прорыв. Успехи ИИ связаны с методиками машинного обучения «глубоких нейронных сетей» или сокращенно технологией «глубокого обучения». Возможность обучать такие глубокие нейронные сети с сотнями миллионов настроенных параметров и решать по-настоящему сложные практически важные задачи связана с появлением достаточно мощных высокопараллельных GPU-процессоров. Основное преимущество глубоких нейросетей – их способность порождать иерархии все более абстрактных представлений данных. Каждый следующий слой нейросети формирует все более и более абстрактные признаки входных данных, как наиболее значимые комбинации признаков предыдущего уровня. Соответственно, чем больше слоев у нейросети, тем более абстрактными понятиями она может оперировать, и тем более сложные задачи она может решать. Глубокое обучение представляет собой универсальную методику автоматического конструирования абстракций, продвинувшую Искусственный Интеллект сразу по многим направлениям. Сегодня и в машинном зрении, и в распознавании речи, и в машинной обработке текстов использу-

ются, по сути, одни и те же архитектуры глубоких нейросетей и алгоритмы их обучения. Долгое время считалось, что интеллект можно запрограммировать, закодировав законы мышления и экспертные знания на том или ином формальном языке. Теперь мы понимаем, насколько нереалистичной была эта установка – настолько сложными оказались алгоритмы сенсорного интеллекта, содержащие подчас миллиарды параметров. Сегодня ставка делается на возникновение интеллекта в процессе обучения на больших массивах данных. Запрограммировать требуется уже не сам интеллект, а лишь способность машин к обучению, что, возможно, гораздо проще. Машинное обучение становится синонимом машинного интеллекта.

Секционные доклады

Секция «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы»

На секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы» (председатель секции А. И. Мещеряков) было представлено 66 докладов (из них 17 на устных и 49 на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками более 20 российских научных центров и научных центров Канады, Германии, Финляндии, Беларуси и Казахстана. Тематика докладов связана с исследованиями, проводимыми на действующих установках с магнитным удержанием плазмы, таких как токамаки T-10, T-11M, стелларатор L-2M, открытые ловушки ГДЛ, ГОЛ-3, а также 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. Одна из проблем требующая решения в настоящее время – это переход от рабочих импульсов установок токамак секундной длительности к непрерывному горению в токамаке-реакторе.

Как отмечалось в докладе **Мирнова С. В.** (ТРИНИТИ), столь значительное увеличение длительности рабочих импульсов требует создания и использования новых материалов, контактирующих с плазмой, способных к самовосстановлению. В докладе были представлены последние результаты по применению лития в виде заполненных им капиллярно-пористых систем, полученные на отечественных токамаках: T-11M и T-10, на итальянском токамаке FTU, а также на стеллараторе TJ-II (Испания). Сенсационным результатом стало получение на токамаке EAST (КНР) 100-секундных разрядных импульсов в H-режиме с одновремен-

ным использованием вольфрамового дивертора и интенсивной литиевой инжекции.

В докладе **Вершкова В. А.** (НИЦ Курчатовский институт) были представлены результаты использования в камере токамака T-10 пористой литиевой диафрагмы при одновременной замене основных графитовых диафрагм на вольфрамовые. Эти эксперименты показали, что при этом уменьшаются потоки легких примесей, приходящие со стенок. Уменьшение легких примесей связано, в основном, с количеством напыленного лития (Li), но не с его потоками в ходе разряда. Присутствие пористой литиевой диафрагмы не влияет на распыление вольфрама (W), то есть литиевые потоки не формируют долгоживущую стационарную защитную пленку на W-диафрагме. Напыление Li перед разрядами образует защитную пленку и уменьшает приток атомов W. Однако это уменьшение исчезает за 3–5 разрядов.

В докладе **Щербак А. Н.** (ТРИНИТИ) были представлены результаты тестирования эмиттер-коллекторной модели с вертикальным литиевым лимитером в качестве литиевого эмиттера и двумя продольными литиевыми лимитерами в качестве его коллекторов, являющейся прототипом замкнутого контура циркуляции лития в будущих стационарных термоядерных источниках нейтронов (ТИН). Использование подобной конфигурации позволило снизить поток лития на стенку токамака T-11M в 3–5 раз. При этом характерная глубина проникновения ионов лития в слой плазмы, непосредственно контактирующий с лимитером токамака T-11M (scrape-off-layer – SOL), уменьшалась при вводе второго продольного лимитера с 5 см до 1,7 см.

В рамках исследований, направленных на создание управляемого термоядерного реактора на основе таких установок, как токамак, стелларатор и открытые ловушки, особый интерес представляют исследования транспортных переходов в режим улучшенного удержания и формирования внутреннего транспортного барьера, а также исследование динамики нагрева плазмы. Так, в докладе **Неудачина С. В. с соавторами** (НИЦ Курчатовский институт) исследовалось спонтанное нелокальное понижение электронного потока тепла и частиц на квазистационарной стадии разрядов с одновременной CO+CONTRA генерацией тока электронными циклотронными волнами. Это явление трактуется авторами как глобальный L-H-переход, ранее не наблюдавшийся в экспериментах на токамаке T-10.

В докладе **Мещерякова А. И. с соавторами** (ИОФ РАН) исследованы не только возможности удержания плазмы на квазистационарной стадии разряда в стеллараторе L-2M, но и динамика

удержания плазмы на стадиях начального СВЧ-нагрева и остывания плазмы после выключения СВЧ-импульса. Для анализа динамики удержания плазмы использовалось понятие мгновенного энергетического времени жизни, которое определялось как отношение энергосодержания плазмы к полной мощности потерь в каждый момент времени. Временная эволюция мгновенного энергетического времени жизни показывает, что процесс нагрева и охлаждения плазмы состоит из четырех фаз, в каждой из которых удержание плазмы имеет свои особенности. В докладе приведены свойства этих фаз нагрева и возможные объяснения различия этих свойств.

Среди исследований, проводимых на открытых ловушках, можно выделить два новых направления. Это так называемый режим динамического удержания в линейной осесимметричной ловушке и концепция винтового удержания. В докладе **Беклемишева А. Д.** (ИЯФ СО РАН) рассмотрен предельный случай равновесия плазмы в осесимметричной ловушке, когда диамагнитные токи плазмы большого давления уменьшают внутреннее магнитное поле в некотором объеме. При ослаблении локального магнитного поля растёт эффективное пробочное отношение ловушки, в пределе – до бесконечности, а значит, должно увеличиваться продольное время жизни. Это и есть режим динамического удержания.

В докладе **Судникова А. В.** (ИЯФ СО РАН) приведены результаты первых экспериментов, проведенных на созданной недавно экспериментальной установке «СМОЛА». Основная задача, стоящая перед исследователями на этой установке – это непосредственная проверка концепции подавления продольных потерь из открытой ловушки газодинамического типа винтовыми пробками с управляемым вращением плазмы.

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 низким уровнем финансирования отечественных работ по термоядерным исследованиям.

Секция «Инерциальный термоядерный синтез»

По тематике секции «Инерциальный термоядерный синтез» (ИТС), председателем которой был Р. В. Степанов, представлялось 13 устных и 34 стендовых доклада. Можно перечислить несколько направлений исследований по ИТС и смежным проблемам, на которых сосредоточены

усилия российских научных коллективов, задействованных в данной сфере.

Среди работ, проводимых на мощных электроразрядных установках, прежде всего, следует отметить результаты, получаемые коллективом ТРИНИТИ на установке АНГАРА-5-1 при всесторонней расчетно-теоретической поддержке ИПМ РАН. Излучение многопроволочных Z-пинчей используется, в частности, для определения оптических свойств горячей плотной плазмы тяжелых элементов. Важность упомянутых выше исследований оптических свойств плазмы подчеркивают продолжающиеся в ТРИНИТИ (при поддержке ИПМ РАН и ФИАН) эксперименты по определению коэффициентов поглощения и пропускания излучения мишенями из различных материалов, результаты которых имеют большую практическую ценность.

В ФИАН в течение многих лет проводятся исследования физики X-пинчей, уже давшие важные результаты как фундаментального, так и прикладного характера. Одной из важных проблем остаётся выяснение механизма формирования и взрыва горячей точки X-пинча. Многолетний опыт расчётов динамики X-пинча показал принципиальную важность учёта квантовых эффектов частичного вырождения электронов на стадии рентгеновской вспышки и взрыва «горячей точки».

Важное место среди работ лазерно-плазменной тематики занимают исследования, направленные на создание источников пучков заряженных частиц и вторичного импульсного излучения различных диапазонов (ТГц, рентгеновского, гамма и нейтронного) при помощи высокоинтенсивных ультракоротких лазерных импульсов. Такие источники имеют очень широкий спектр возможных приложений: от физики инерциального термоядерного синтеза до биологических исследований и медицинских терапевтических методик. Этим обусловлена высокая актуальность таких работ.

Необходимо отметить результаты многоцелевых исследований в области технологии мишеней для лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), проводимых в ФИАН. Продолжаются работы по развитию технологии создания малоплотных пористых сред высокого качества, использование которых сегодня востребовано для различных задач взаимодействия лазерного излучения с веществом. Другой аспект деятельности связан с созданием и совершенствованием технологии массового производства бесподвесных криогенных термоядерных мишеней.

Работа секции «Инерциальный термоядерный синтез» была успешной и прошла на высоком научном уровне. Практически все представленные доклады относились к поисковым направлениям,

нацеленным на решение комплексных проблем. Налаженная кооперация научных организаций и имеющаяся экспериментально-диагностическая база способствуют стабильному развитию исследований, проводимых на высокоэнергетических электро-разрядных установках. Так, в РФЯЦ-ВНИИЭФ создается четырехмодульный электрофизический комплекс «Гамма-4». Эксперименты на установке АНГАРА-5-1 дают уникальные знания в области физики многопроволочных пинчей. Вместе с тем, уже давно назрела необходимость строительства новой установки с энергией нагрузки в несколько десятков МДж (проект «Байкал»), эксперименты на которой позволят выйти на передовой мировой уровень установки, сравнимый с уровнем работ лаборатории Сандия в США.

Остаётся весьма скудным набор лазерных систем, работающих в широком диапазоне параметров излучения, что сдерживает прогресс российских научных групп в области ЛТС и физики взаимодействия излучения с веществом. Важнейшей задачей является создание в России нескольких лазеров тераваттного диапазона мощности с энергией в импульсе на уровне 10 кДж, на которых можно было бы проводить исследования прямого облучения мишеней, аналогичные работам ведущих лабораторий США, Франции и Японии. Основой решения этой задачи является совместный проект МИФИ-РФЯЦ-ВНИИЭФ, опирающийся на новую уникальную компоновку лазерной системы. Исследования воздействия петаваттного лазерного излучения на вещество проводятся на небольшом количестве установок с весьма малой (по сравнению с мировым уровнем) энергией, не превышающей нескольких десятков Дж. По-прежнему пока не ясен статус проекта 180 ПВт системы XCELS, предложенной ИПФ РАН. Реализация указанных выше проектов, прошедших апробацию в процессе широкого обсуждения в научной литературе и на многих конференциях, позволят выйти на новый уровень исследований в области ЛТС.

Секция «Физические процессы в низкотемпературной плазме»

На конференции в рамках работы секции «Физические процессы в низкотемпературной плазме» (председатель секции В. С. Воробьев) было заслушано 22 устных доклада и 50 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 mat-

ter), элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы, различные применения низкотемпературной плазмы, а также исследования плазмы, возникающей в импульсных процессах. Термин «warm dense matter» стал использоваться сравнительно недавно применительно к плотному нагретому веществу, в котором процессы ионизации играют заметную роль. По всем направлениям секции можно отметить значительный прогресс в исследованиях, результаты которых обсуждались на устных и стендовых докладах. При этом следует отметить, что большое количество докладов было связано с технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Результаты работы секции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований в области низкотемпературной плазмы, проводимых в России. Особенно необходимо отметить новое направление, связанное с исследованиями своеобразного плазменного объекта, так называемой ультрахолодной плазмы, которая возникает при фотоионизации атомов, охлаждаемых лазером. Это направление интенсивно развивается в ведущих мировых исследовательских центрах. Исследования российские ученых играют существенную роль в развитии этого направления.

Интерес вызвал доклад **Хомкина А. Л.** и **Шумихина А. С.** (ОИВТ РАН) «Проводимость и коэффициент отражения плотной плазмы инертных газов». В работе предлагается обобщение предложенной ранее модели для учета процессов термической ионизации. Свободная энергия Гельмгольца для плотной атомарной плазмы паров металлов описывает смесь атомов, связанных силами когезионного сцепления (сцепление атомов), и электроны «желе», а также неидеальных свободных ионов и электронов. Электроны желе возникают на хвостах волновых функций валентных электронов и существуют при отрицательных энергиях, а свободные, термические электроны – при положительных, и они сосуществуют независимо.

В докладе **Апфельбаума Е. М.** «Расчёт теплофизических свойств низкотемпературной плазмы тантала» (ОИВТ РАН) отмечалось, что плазма тантала остаётся менее изученной, по сравнению с другими элементами. Для неё есть данные измерений на ударных адиабатах и изоэнтропах разгрузки при сравнительно высоких плотностях, больше половины от нормальной плотности ($\rho_0 = 16,69 \text{ г/см}^3$, температура плавления тантала $T_m = 3290 \text{ К}$). Для анализа этих измерений было разработано полуэмпирическое уравнение состояния. Состав и термодинамические свойства

такой смеси могут быть получены на основе закона действующих масс, а электронные транспортные коэффициенты рассчитываются в приближении времени релаксации. Была установлена и область применимости рассматриваемого подхода.

В докладе **Бабаевой Н. Ю., Найдиса Г. В. и Панова В. А.** «*Взаимодействие гелиевых и аргонных комбинированных плазменных струй с учетом гравитационных эффектов*» (ОИВТ РАН) было отмечено, что комбинированные плазменные струи, создающие неравновесную плазму при атмосферном давлении, являются одним из основных источников плазмы, используемых в плазменной медицине. Одиночная струя может обработать небольшой участок поверхности, поэтому для увеличения обрабатываемой области используются комбинированные струи. Методом численного моделирования рассматриваются свойства одиночной струи и двух комбинированных струй, использующих гелий и аргон в качестве плазмообразующего газа. Плазмообразующий газ с небольшой примесью кислорода протекает через диэлектрические трубки в окружающий влажный воздух.

Другое перспективное направление связано с применением спектральных методов диагностики разрядов. Этим вопросам был посвящен доклад **Шахатова В. А. и Лебедева Ю. А.** (ИНХС РАН) «*Диссоциация молекулярного водорода в СВЧ-разряде: кинетика заселения электронно-возбужденных состояний атомов водорода*».

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. Она показала, что ряд новых направлений, таких как исследование 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» (председатель секции А. Ф. Александров) были заслушаны 13 устных и 44 стендовых докладов. Обсуждались результаты

исследований, проводимых в институтах РАН, в ведущих научных центрах России, в научных учреждениях, в ВУЗах стран СНГ. Часть докладов была представлена международными авторскими коллективами, в состав которых входили ученые из Германии (Helmholtz Institute, Jena; Universität Stuttgart, Stuttgart), США (Princeton university), Словении (Люблянский университет), Таджикистана и Беларуси.

Тематика докладов, представленных на секции, была широкая. Создание технологий для новых материалов и пленок для электроники, воздействие плазмы и пучков заряженных частиц на вещество и разработка основ технологии получения износостойких покрытий, плазмохимия, включая стимулированное плазмой горение, быстрый нагрев плазмы в наносекундных разрядах, свойства разрядов на поверхности раздела газа и жидкости, плазменная медицина и атмосферная плазма – вот далеко не полный перечень задач, затронутых в докладах. Ряд докладов был посвящен новым аспектам традиционной тематики: генерации низкотемпературной плазмы, в том числе с помощью ВЧ- и СВЧ-полей, диагностике плазмы, различным аспектам взаимодействия СВЧ-излучения с плазмой, его генерации и управления. Рассматривались проблемы, лежащие на стыке технических и классических задач, такие как возникновение и взаимодействие катодных и анодных пятен на электродах в электрических разрядах. Были также представлены доклады, посвященные воздействию плазмы и ее излучения на биологические объекты.

Большой интерес вызвал доклад **Будаева В. П.** (НИЦ «Курчатовский институт», НИУ МЭИ), в котором были обобщены экспериментальные данные наблюдения материалов, подвергнутых экстремальным плазменным нагрузкам в установках термоядерного синтеза и плазменных установках с высокотемпературной плазмой. Мощная плазменная нагрузка на материал и коллективные эффекты при взаимодействии турбулентной пристеночной плазмы с поверхностью в таких установках приводят к стохастической кластеризации и фрактальному росту поверхности на масштабах от десятков нанометров до сотен микрометров.

В докладе авторского коллектива из **Института физики НАН Беларуси и Научно-практического центра гигиены министерства здравоохранения Беларуси** были представлены экспериментальные результаты для инактивации клинически значимых штаммов микроорганизмов и их консорциумов воздушной плазменной струей атмосферного давления на постоянном электрическом токе. Основным механизмом воздействия на биологические объекты предполагалось влияние

активных форм оксидов азота. Исследовалось также воздействие плазменной струи на ДНК и показано, что длительное (до 20 минут) воздействие не приводит к ее разрушению.

В докладе **Филимоновой Е. А. с соавторами** (ОИВТ РАН) исследовано воспламенение и формирование волны горения с возможным последующим переходом в авто-воспламенение всего объема в пропано-воздушной смеси. Инициатором волны горения является неравновесный разряд, часть энергии которого идет на разогрев смеси газов, а часть – на создание химически активных частиц в этих газах. В работе показан механизм инициации волны горения и последующего авто-воспламенения в условиях активации разрядом.

Доклад **Рыкованова С. Г.** (Институт Гельмгольца, Йена, Германия) был посвящен проблемам создания источников гамма-излучения на основе нелинейного комптоновского рассеяния и их оптимизации. Приведены аналитические и численные результаты углового энергетического спектра фотонов. Основной упор делается на анализ различных методов значительного увеличения выхода фотонов за счет изменения частоты лазерного излучения.

В докладе **Бардакова В. М. с соавторами** (ИрГУПС, ИрНИТУ, Иркутск) рассмотрена идея панорамного плазмооптического масс-сепаратора (ПОМС) и попытка практической реализации этой идеи в виде макета. Показано, что производительность плазмооптического сепаратора определяется не плотностью ионного тока на выходе плазменного ускорителя, а плотностью ионного тока на выходе азимутатора.

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

Секция «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего»

На сессию «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего» в этом году было представлено 40 докладов, из них 8 были доложены на устном заседании, 32 – на стендовом.

Доклады устного заседания были посвящены состоянию работ по созданию систем для международного проекта ИТЭР (ИТЭР). В ИЯФ СО РАН ведутся работы по разработке, макетированию и интеграции элементов будущей установки ИТЭР. Институт ведет интеграцию четырех диагностических портов: экваториального порта № 11 (поставляемого к первой плазме) и верхних портов № 02,

№ 07 и № 08, а также является ответственным за испытания и производство вертикальной нейтронной камеры и диверторного монитора нейтронного потока. Кроме того, ведутся работы по исследованию свойств керамики карбида бора, изготовленной различными методами и предназначенной для использования в ИТЭР в качестве элементов нейтронной защиты. Свойства керамики на основе карбида бора существенно зависят от технологии ее изготовления. Были исследованы горячепрессованный, реакционноспеченный и спеченный карбид бора, а также исходный порошок с различным размером зерна. Обнаружено, что в горячепрессованном и спеченном карбиде бора примеси составляют не более 1 %, в реакционноспеченном карбиде бора содержание примесей может достигать 10–15 % (в основном кремния либо кислорода в разных типах керамики).

Во ФТИ РАН разрабатывается диагностика томсоновского рассеяния в диверторе ИТЭР. Работа диверторной диагностики томсоновского рассеяния ИТЭР будет проходить в крайне неблагоприятных условиях: высокой радиационной нагрузке на оптические элементы, загрязнении оптических элементов продуктами эрозии первой стенки в виде пылевых и плёночных осадений. Также разрабатывается система очистки оптических элементов диверторной диагностики томсоновского рассеяния ИТЭР от загрязнений, сочетающая в себе подавление потоков примеси и очистку поверхности на основе плазменной очистки и лазерной абляции. Прозрачная оптика считается наиболее уязвимым элементом в диагностических схемах ИТЭР, поскольку даже тонкие осадения металлов приводят к значительному снижению оптического пропускания.

В НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается диагностика рефлектометрии со стороны сильного магнитного поля для ИТЭР. Ее планируется использовать для измерения профиля электронной плотности, а также для исследования флуктуаций плотности плазмы. Проводятся также работы по расширению возможностей диагностики за счет интеграции в нее дополнительного канала рефрактометрии для измерения «на просвет».

В Проектном центре ИТЭР ведутся работы по разработке диагностики «нейтронный спектрометр» токамака-реактора ИТЭР. Нейтронный спектрометр в составе системы «Анализатора нейтральных частиц» предназначен для измерений нейтронов плазмы ИТЭР, проинтегрированных вдоль линии в экваториальной плоскости. Спектрометрия нейтронов может предоставить информацию о топливном составе и ионной температуре плазменного ядра. В качестве дополнительной задачи, нейтронный спектрометр способен обеспе-

чить оценку полного выхода нейтронов и термоядерной мощности установки.

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

Заключение

В целом следует отметить, что XLV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2018 года стала важным событием, оказавшим заметное влияние на развитие научных исследований и их координацию в ведущих научных центрах России и за рубежом. Финансовую поддержку конференции оказали Российский фонд фундаментальных исследований, Федеральное агентство научных организаций России, ЗАО Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН и Проектный центр ИТЭР ГК РОСАТОМ. Организаторами прошедшей XLV конференции являлись Научный совет по физике плазмы Российской академии наук, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Научный совет РАН по комплексной проблеме «Физика низкотемпературной плазмы», Объединенный институт высоких температур РАН, Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Таким образом, по результатам конференции можно сделать следующие выводы.

1. XLV 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 45-й раз и собрала на свои заседания более 800 участников из научных центров России и других стран. Число российских (75) и иностранных организаций (23), 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 ИТЕР. 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 конкурирующих мультипетаваттных лазерных систем, направленных на решение проблемы ЛТС и смежных задач. Также целесообразно создать сеть из нескольких лазерных установок с меньшей мощностью, на которых было бы возможно проверять новые идеи и экспериментальные схемы, а также проводить отработку новых диагностик. Так эффективно работают научные программы технологически развитых стран 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.

6. Остается заметным число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными совместно с учеными ведущих научных центров Европы, Японии 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 «XLV Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термо-

ядерному синтезу» Сборник тезисов докладов. – М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. – 365 с. ISBN 978-5-9903264-8-4. Материалы конференции также размещены на сайте конференции http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLV/Zven_XLV.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 18-02-20018 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. «XLV Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» 2–6 апреля 2018 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. – М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. – 365 с. ISBN 978-5-9903264-8-4.
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLV/Zven_XLV.html

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

Main research results in the field of plasma physics and controlled fusion in Russia in 2017

(Review of the reports of the XLV International Zvenigorod Conference, 2018)

I. A. Grishina¹, V. A. Ivanov^{1,2}, and L. M. Kovrizhnych¹

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

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

Received June 6, 2018

The review is given on the most interesting new results presented at the XLV International Zvenigorod conference on plasma physics and controlled fusion which took place in Zvenigorod city of Moscow region on April 2–6, 2018. 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 XLV International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Zvenigorod, Moscow Region, Russia. April 2–6, 2018. ISBN 978-5-9903264-7-7 (Published by PLAZMAIOFAN Co Ltd. 2017) [in Russian].*
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLV/Zven_XLV.html