

## Состояние исследований в области физики плазмы и плазменных технологий в России в 2016 году

*(обзор материалов XLIV Международной Звенигородской конференции  
по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу,  
13–17 февраля 2017 года)*

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

*Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на ежегодной XLIV Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся с 13 по 17 февраля 2017 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

XLIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде с 13 по 17 февраля 2017 года.

На конференции было представлено 274 научных доклада из 72 российских и 29 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 – 56
2. Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия – 35
3. Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Москва, Россия – 30

**Гришина Ирина Анатольевна**<sup>1</sup>, старший научный сотрудник.  
**Иванов Вячеслав Алексеевич**<sup>1,2</sup>, заведующий отделом, доцент.  
**Коврижных Лев Михайлович**<sup>1</sup>, главный научный сотрудник.

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ.

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31.  
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

*Статья поступила в редакцию 17 мая 2017 г.*

© Гришина И. А., Иванов В. А., Коврижных Л. М., 2017

4. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия – 29
5. Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия – 24
6. Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия – 24
7. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия – 20
8. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия – 17
9. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия – 16
10. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия – 16
11. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, С.-Петербург, Россия – 15
12. Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, административный округ Троицк, Москва, Россия – 15
13. Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия – 13
14. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия – 13
15. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия – 13
16. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия – 10
17. Российский университет дружбы народов, Москва, Россия – 10
18. Центр фундаментальных и прикладных исследований, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Россия – 9
19. Московский энергетический институт (технический университет), Москва, Россия – 8

20. Санкт-Петербургский государственный университет, С.-Петербург, Россия – 7
  21. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, Казань, Россия – 6
  22. Московский технологический университет (МГТУ МИРЭА), Москва, Россия – 6
  23. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия – 5
  24. Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, С.-Петербург, Россия – 5
  25. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия – 4
  26. Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н. А. Доллежала, Москва, Россия – 4
  27. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия – 4
  28. Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия – 3
  29. Дагестанский государственный университет, Махачкала, Россия – 3
  30. Институт космических исследований РАН, Москва, Россия – 3
  31. Институт электрофизики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия – 3
  32. Московский Радиотехнический институт РАН, Москва, Россия – 3
  33. Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина, РАН, Москва, Россия – 2
  34. ЗАО «Спектрал-Тех», Санкт-Петербург, Россия – 2
  35. Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия – 2
  36. Институт динамики геосфер РАН, Москва, Россия – 2
  37. Институт химии растворов РАН им. Г. А. Крестова, Иваново, Россия – 2
  38. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, С.-Петербург, Россия – 2
  39. Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н. П. Огарева, Саранск, Россия – 2
  40. Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н. И. Пирогова Минздрава России, Москва, Россия – 2
  41. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия – 1
  42. Всероссийский электротехнический институт им. В. И. Ленина, Москва, Россия – 1
  43. Научно-исследовательский институт биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича РАН, Москва, Россия – 1
  44. Институт биологии развития им. Н. К. Кольцова РАН, Москва, Россия – 1
  45. Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия – 1
  46. Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия – 1
  47. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия – 1
  48. Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Москва, Россия – 1
  49. Институт механики МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия – 1
  50. Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия – 1
  51. Институт органической химии им Н. Д. Зелинского РАН, Москва, Россия – 1
  52. Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия – 1
  53. Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия – 1
  54. Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия – 1
  55. Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва, Россия – 1
  56. Институт физиологии растений им. К. А. Тимирязева РАН, Москва, Россия – 1
  57. Институт химии высокочистых веществ им. Г. Г. Девярых РАН, Н. Новгород, Россия – 1
  58. АО «Красная Звезда», Москва, Россия – 1
  59. Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия – 1
  60. Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия – 1
  61. Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Россия – 1
  62. Нижегородская государственная медицинская академия, Н. Новгород, Россия – 1
  63. НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, МГУ, Москва Россия – 1
  64. Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия – 1
  65. АО «НЭВЗ-КЕРАМИКС», Новосибирск, Россия – 1
  66. Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., Россия – 1
  67. ООО «Плазма-СК», Саратов, Россия – 1
  68. Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск, Россия – 1
  69. Финансовый университет при правительстве Российской Федерации, Москва, Россия – 1
  70. Исследовательский центр имени М. В. Келдыша, Москва, Россия – 1
  71. ООО «Санкт-петербургское объединение «Энергопул», С.-Петербург, Россия – 1
  72. Московский государственный университет тонких химических технологий им. М. В. Ломоносова – 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 – 5
  2. НИИ экспериментальной и теоретической физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан – 3

3. Сухумский физико-технический институт, Сухуми, Абхазия – 3
4. Aalto University, EURATOM-TEKES, Espoo, Finland – 2
5. Cornell University, Ithaca, New York, USA – 2
6. Institute of Plasma Physics and Laser Microfusion, Warsaw, Poland – 2
7. ITER Organization, Cadarache, Saint-Paul-Lez-Durance, France – 2
8. Princeton University, Princeton, USA – 2
9. Таджикский национальный университет, Душанбе, Таджикистан – 2
10. ACS Ltd, Warsaw, Poland – 1
11. Anhui University of Science and Technology, Anhui, China – 1
12. Bhabha Atomic Research Center, Trombay, Mumbai, India – 1
13. Edinburgh Napier University, Edinburgh, United Kingdom – 1
14. Ecole Polytechnique, Palaiseau Cedex, France – 1
15. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands – 1
16. Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Republic of Korea – 1
17. Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Germany – 1
18. FOM Institute for Plasma Physics, Rijnhuizen, Association EURATOM-FOM, Nieuwegein, Netherlands – 1
19. Kansai Photon Science Institute, Japan Atomic Energy Agency, Kizugawa, Kyoto, Japan – 1
20. LERMA, Observatoire de Paris, Paris, France – 1
21. National Centre for Nuclear Research, Otwock-Swierk, Poland – 1
22. National Laboratory Astana, Назарбаев университет, Астана, Казахстан – 1
23. Pierre and Marie Curie University, Paris, France – 1
24. Plasma Physics Lab, Royal Military Academy, Brussels, Belgium – 1
25. Tri Alpha Energy, Inc., Foothill Ranch, Lake Forest, California, USA – 1
26. University of Alberta, Edmonton, Canada – 1
27. Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан – 1

28. Научно-практический центр гигиены, Минск, Беларусь – 1
29. Национальный ядерный центр республики Казахстан, Курчатов, Казахстан – 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 79 устных и 195 стендовых докладов.

### Обзорные доклады

Обзорные доклады, которые были представлены на пленарных заседаниях конференции, по существу подвели итоги работ, выполненных за последний 2016 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.



Рис. 1. Доклад на одном из секционных заседаний.



Рис. 2. Участники секционного заседания.

Участники конференции почтили память Бориса Андреевича Трубникова, ушедшего из жизни в минувшем году. Как отмечалось в докладе В. П. Пастухова (НИЦ Курчатовский институт), вклад Б. А. Трубникова в развитие физики плазмы трудно переоценить. Уже в 1952 г. им была выполнена пионерская работа по МГД устойчивости цилиндрического шнура плазмы с током, за которой последовала разработка ускорительного механизма генерации нейтронов в плазме Z-пинчей. Мировую известность Б. А. Трубникову принесли работы по циклотронному излучению горячей замагниченной плазмы. Они неизменно используются в расчетах энергобаланса в установках термоядерного синтеза, в диагностике плазмы и в исследованиях многих объектов астрофизики. В первом выпуске всемирно известного сборника «Вопросы теории плазмы» (1963 г.), Б. А. Трубников дал ясное, изящное и наглядное изложение теории кулоновских столкновений в плазме. В докторской диссертации им был предложен и исследован новый класс неустойчивых нелинейных «квазичаплыгинских» сред. Круг его научных интересов был исключительно широк. В частности, он включал распределение космической пыли по массам частиц и оригинальную систематизацию кварков, теорию развития вулканов и формирование спектров космических лучей, статистическую теорию конкуренции, охватывающую физические, биологические и социальные явления, а также многие другие нетривиальные научные проблемы.

Доклад **Л. Н. Химченко** (Проектный центр ИТЭР) был посвящен ходу сооружения крупнейшего токамака ИТЭР, создаваемого международным сообществом в составе шести государств и государственного союза стран Европы: Европейский союз, Китай, Индия, Япония, Корея, Россия и США. Основная цель проекта — подтвердить перспективность квазистационарного магнитного удержания высокотемпературной дейтерий-тритиевой (DT) плазмы для производства термоядерной энергии и продемонстрировать физику и технику, достаточную для создания термоядерной электрической станции. Отмечалось, что в последние два года были приложены значительные усилия по улучшению управления проектом ИТЭР, по ускоренному проектированию и строительству зданий, оптимизированию графика работ и проведению дополнительных НИОКР. Значительный прогресс был достигнут в создании компонента для основной установки токамака ИТЭР. В докладе были представлены достижения российской стороны в изготовлении и поставке систем и компонентов для ИТЭР.

Обзор новых результатов термоядерных исследований, проведенных в европейских научных центрах и рассчитанных на перспективу создания установок ITER и DEMO, был дан в докладе **Дж. Онгена** (Королевская военная академия Бельгии, Брюссель). Были проанализированы результаты экспериментов на европейском токамаке JET по моделированию сценариев будущей работы установки ИТЭР с вольфрам-бериллиевой первой стенкой камеры (ITER-like-wall). Результаты показали 10–30 % ухудшение удержания плазмы по сравнению с аналогичными разрядами с углеродной стенкой. Анализ результатов таких экспериментов показал, что снижение качества удержания плазмы в токамаке JET и, как ожидается, в токамаке ИТЭР, связано с ухудшением удержания плазмы в области формирования пьедестала на радиальных распределениях параметров плазмы. Ключевыми факторами, которые позволят улучшить удержание плазмы в экспериментах с ITER-like-wall, являются оптимизация магнитной конфигурации в области дивертора и использование плазмы с высокой треугольностью  $\delta_{av} = 0,39$ . Докладчик также остановился на результатах экспериментов на токамаках JET и Alcator C-Mod, где был успешно опробован новый метод высокочастотного нагрева плазмы в диапазоне ионных циклотронных частот. При данном методе нагрева необходимо наличие в плазме по крайней мере трех различных сортов ионов. При определенных условиях это позволяет добиться эффективного поглощения ВЧ волн при очень низкой концентрации резонансных ионов. Эксперименты на JET убедительно продемонстрировали эффективность нагрева водород — дейтериевой плазмы при использовании очень низкой концентрации ионов гелия  $^3\text{He}$  (~0,2 %).

В обзорном докладе **Д. В. Сарычева** (НИЦ Курчатовский институт) были представлены результаты недавних экспериментов, выполненных на токамаке T-10 с полностью металлической камерой. Два графитовых лимитера, использовавшихся ранее в T-10 и приводящих к высокому уровню легких примесей в плазме в экспериментах при мощности дополнительного ЭЦР нагрева, превышающей ~2 МВт, были заменены на вольфрамовые. Однако после перехода к полностью металлической камере уровень легких примесей остался высоким, что может объясняться неполной очисткой камеры, а также сорбцией примесей массивными холодными вольфрамовыми диафрагмами. Кроме того, наблюдались поступление вольфрама в плазму и его аккумуляция в центре сопровождающаяся сильным ростом радиационных потерь с излучением из центральной области плазмы. Для исследования возможностей приме-

нения лития для защиты обращенных к плазме поверхностей и снижения поступления вольфрама и легких примесей в плазму в Т-10 проведены эксперименты с дополнительным подвижным литиевым лимитером. Впервые в токамаке Т-10 были получены результаты по защите вольфрама с помощью лития в режиме омического нагрева (ОН) и режиме электронного циклотронного резонансного нагрева (ЭЦН) при вводимой СВЧ-мощности  $P_{ЭЦН} = 1-1,5$  МВт. Обнаружено, что при использовании литиевого лимитера содержание вольфрама в центре плазмы падает более чем на порядок.

Большой интерес вызвал доклад **С. В. Мирнова** «55 лет эволюции токамаков. Видимые пределы и перспективы» (ТРИНИТИ, НИЯУ МИФИ). В докладе отмечалось, что в конце прошлого века были созданы лабораторные устройства, способные вырабатывать в режиме DT-горения при секундной длительности до 10–20 МВт термоядерной мощности. Этот прогресс стал, в свою очередь, исходной точкой для создания токамака следующего поколения с термоядерной мощностью масштаба сотен мегаватт и длительностью импульса масштаба тысячи секунд – это проект ИТЭР. Между тем уже DT-устройства промежуточной мощности в виде источников быстрых термоядерных нейтронов могли бы найти промышленное применение для нужд существующей ядерной энергетики как в качестве трансмутаторов («сжигателей») ядерных отходов, так и для производства ядерного топлива (плутония  $Pu^{239}$  и легкого изотопа урана  $U^{233}$ ). Жестким технологическим ограничением использования таких устройств в промышленных целях представляется сегодня импульсный характер работы современных токамаков. В докладе анализируются препятствия, которые предстоит преодолеть для перевода токамаков в режим стационарного либо квазистационарного (не менее 80 % рабочего времени) термоядерного DT-горения. Было показано, что наиболее сложная проблема состоит в необходимости непрерывного (либо дискретного во времени) удаления из вакуумной камеры реактора продуктов эрозии ее стенок и захваченного ими DT-горючего. Обсуждалось использование для ее решения металлов в жидком состоянии (лития Li, галлия Ga, олова Sn). Предпочтение среди них отдается сегодня литию. В связи с этим обсуждались последние эксперименты с литием, выполненные как на отечественных, так и на зарубежных токамаках.

Доклад **С. В. Лебедева** (ФТИ РАН) был посвящен проблеме потерь энергичных ионов, ухудшающих время жизни энергии в термоядерных установках. Одним из каналов потерь является возбуждение альфвеновских мод. Такие моды

обычно наблюдаются в экспериментах по электронному циклотронному и нижнегибридному нагреву плазмы. Возникновение альфвеновских мод в отсутствие дополнительного нагрева до недавнего времени представлялось невозможным. Однако в докладе были представлены результаты исследования альфвеновских мод, наблюдавшихся именно в режиме омического нагрева плазмы в токамаке ТУМАН-3М, в также анализ физики их возбуждения. Такие колебания в плазме, имеющие характерные частоты в диапазоне 0,8–1,8 МГц, были обнаружены с помощью магнитных зондов, размещенных внутри вакуумной камеры токамака. В разрядах с различными рабочими газами (водород H, дейтерий D, гелий He) установлено, что частота колебаний пропорциональна альфвеновской скорости. Это позволило идентифицировать колебания именно как альфвеновские моды. Во многих случаях вспышки альфвеновских мод совпадают с моментами срывов пилообразных колебаний в плазме токамака.

Эффект нелинейного тушения радиоактивности цезия  $^{137}Cs$  при лазерной абляции в жидкости обсуждался в докладе **С. Н. Андреева с соавторами** (ИОФ РАН, ОИЯИ). Излучение неодимового лазера фокусировалось на поверхности золотой мишени, помещенной в водный раствор соли хлорида цезия  $^{137}Cs$  с активностью 330 Бк. Осуществлялось сканирование лазерного луча по поверхности мишени, приводящее к образованию наночастиц золота, концентрация которых в растворе определялась временем лазерного облучения и расстоянием от перетяжки лазерного пучка до поверхности мишени. Проводились измерения активности пробы до, во время и после лазерного облучения. В процессе лазерной абляции золота в водном растворе солей  $^{137}Cs$  наблюдалась ускоренная деактивация радиоактивного цезия. Было установлено, что этот процесс не объясняется ускорением бета-распада, включая распад с переходом электрона в связанное состояние. Основным каналом распада никак не затрагивается, а стимулирование бета-распада осуществляется по новому механизму, который, по аналогии с тушением люминесценции, был назван нелинейным тушением радиоактивности. По-видимому, он связан с увеличением вероятности прямого перехода цезия  $^{137}Cs$  в основное состояние бария  $^{137}Ba$  без излучения гамма кванта с энергией 662 кэВ.

История возникновения и последние достижения плазменной релятивистской СВЧ электроники рассматривались в докладе **П. С. Стрелкова** (ИОФ РАН). Отмечалось, что одно из основных отличий плазменной СВЧ электроники от вакуумной состоит в возможности быстрого управления свойствами электродинамической системы СВЧ-

источника путем изменения плотности плазмы. Переход к сильноточным релятивистским электронным пучкам позволил резко повысить импульсную мощность СВЧ-излучения. Кроме того, фазовая скорость волны в плазме стала близкой к скорости света, что значительно упрощает ввод и вывод СВЧ-излучения из плазмы, а это, в свою очередь, позволяет делать широкополосные импульсные СВЧ-источники. К настоящему времени созданы плазменные СВЧ-генераторы, в которых частота СВЧ-излучения в пачке импульсов переключается от одного импульса к другому в несколько раз. При этом мощность излучения составляет 50–100 МВт, а длительность СВЧ-импульса – 20, 60, или даже 500 нс. Показано, что частотой излучения СВЧ-генератора можно управлять быстро: ее можно изменять в каждом из 20 СВЧ-импульсов, следующих с частотой 20 Гц. В ИОФ РАН создан СВЧ-усилитель с полосой усиления от 9 до 13 ГГц при выходной мощности излучения 40 МВт и длительности СВЧ-импульса 60 нс. Создан также СВЧ-усилитель в полосе частот 2,4–3,1 ГГц. Доказано постоянство структуры СВЧ-пучка на выходе из рупора на разных частотах, что даёт возможность создать эффективную антенну для управления выходящим СВЧ-лучом. Были получены импульсы излучения мощностью более 100 МВт и длительностью СВЧ-импульса 500 нс.

В обзорном докладе **И. Л. Иосилевского** (ОИВТ РАН) обсуждались особенности активно исследуемых в последнее время так называемых энтропийных фазовых переходов 1-го рода в сравнении с обычными энтальпийными (Ван дер Ваальсовыми) фазовыми переходами. Главным «движущим» физическим механизмом S-переходов 1-го рода является принудительный распад при сжатии каких-либо связанных комплексов системы атомов, молекул, кластеров и др. Сюда можно также отнести принудительный «деконфайнмент» адронов на составляющие их кварки в далекой и экзотической области экстремальных состояний ультра-плотного и ультра горячего вещества в недрах нейтронных звезд. Основным отличительным признаком энтропийных переходов является противоположный знак скрытой теплоты перехода и, соответственно, падающая зависимость давления от температуры  $P(T)$ -характеристика границы перехода. Следствием этого является появление зон аномальных термодинамических свойств вещества как в пределах двухфазной области перехода, так и в конечной области вне бинадали, примыкающей к высокотемпературной её части в зоне критической точки. Обсуждаемые аномалии фазовых переходов иллюстрируются на примере выявленных в последние годы в модель-

ных построениях и в прямом численном моделировании диссоциативных, плазменных и других «делокализационных» фазовых переходов в горячем и плотном водороде, азоте, гелии и других флюидах.

В докладе **П. В. Сасорова** (ИПМ РАН) был представлен обзор физических процессов, определяющих основные свойства плазмы капиллярных разрядов, имеющих различное применение в физических исследованиях и в технике. Электрический ток, протекающий через капиллярный разряд, вызывает в основном два эффекта. Первый из них связан с тем, что этот ток создает азимутальное магнитное поле с индукцией  $\mathbf{B}$ . Это приводит к возникновению силы Ампера, пропорциональной векторному произведению векторов плотности тока  $\mathbf{j}$  и индукции ( $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ ), которая стремится сжать плазму разряда к его оси. Второй эффект состоит в том, что электрический ток вызывает омический нагрев. Темп этого нагрева пропорционален  $j^2/\sigma$ , где  $\sigma$  – электрическая проводимость плазмы. Наличие магнитного поля может приводить также к эффектам второго плана, таким, как подавление теплопроводности плазмы. Капиллярные разряды часто отягощены испарением стенки капиллярных разрядов из-за достаточно сильных потоков тепла на них. В докладе обсуждались физические процессы, определяющие температуру стенки, а также методы учета такого испарения в динамике капиллярной плазмы.

Генерация атмосферных вихрей (торнадо) обсуждалась в докладе **О. А. Синкевича** (НИУ МЭИ). Оценивались возможности влажной атмосферы Земли как тепловой машины, генерирующей вихревое движение воздуха. Обсуждалась роль электрических разрядов, в частности, разрядов молний, в генерации и поддержании вихрей, включая торнадо. Анализ базировался на известных фактах наличия самых разнообразных форм электрических разрядов в материнском облаке и самой воронке торнадо. Было показано, что даже при интенсивной грозе молниевые разряды обеспечивают торнадо энергией не более чем на 10 %. Однако разряд молнии может способствовать перераспределению концентрации свободных электрических зарядов в материнском облаке и приводить к образованию плазмы и нагреву воздуха в канале молнии. Это, в свою очередь, может приводить к ускорению воздушных потоков за счет мощного электрического поля под грозовым облаком. Кроме того, протекающий по каналу молнии ток может приводить к образованию винтовой неустойчивости и генерации первоначального слабого вихря, локализованного в атмосфере горячего воздуха. Этот вихрь может усиливаться уже после прекращения электрического тока молнии за счет



циклонического движения воздуха в материнском облаке. Более детально была проанализирована возможность развития винтовой неустойчивости в канале разряда молнии, с учетом собственного магнитного поля и магнитного поля Земли.

Свойства токовых слоев, формируемых в лабораторных экспериментах и в ходе целого ряда космических явлений вспышечного типа, обсуждались в обзорном докладе **А. Г. Франк** (ИОФ РАН). Было проведено сопоставление основных характеристик токовых слоев, формируемых в лабораторных экспериментах, с результатами непосредственных спутниковых наблюдений в хвостовой области магнитосферы Земли. Анализ структуры магнитных полей свидетельствует, что и в хвостовой области магнитосферы, и в лабораторных условиях формируются сравнительно тонкие токовые слои, обладающие качественным сходством, несмотря на колоссальные различия в пространственных масштабах, параметрах плазмы, магнитных полей и токов. Анализ ряда безразмерных параметров показал, что в обоих случаях они имеют достаточно близкие значения, что позволяет обосновать возможность количественного моделирования процессов, происходящих в магнитосфере, в лабораторных условиях. С другой стороны, многие явления, которые наблюдаются в хвостовой области магнитосферы Земли, могут иметь место в лабораторных токовых слоях и, по всей вероятности, могут быть обнаружены экспериментально.

Проблема взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения релятивистской интенсивности с плотной плазмой был посвящен доклад **А. Б. Савельева** (МГУ). В экспериментах использовался тераваттный фемтосекундный лазерный комплекс Международного лазерного центра МГУ. Основной упор в этих исследованиях делается на управление параметрами формирующейся плазмы (яркость свечения в рентгеновском и гамма-диапазонах, получение пучков релятивистских электронов и быстрых многозарядных ионов) и их оптимизацию подбором режима взаимодействия и параметров предплазмы. В докладе были рассмотрены четыре основные группы экспериментов:

- исследование влияния различных типов предимпульсов на параметры плазмы при взаимодействии с твердыми мишенями;
- исследование взаимодействия высококонтрастного фемтосекундного лазерного импульса с протяженной управляемой предплазмой, формируемой дополнительным лазерным импульсом наносекундной длительности;
- исследование влияния короткого предимпульса, опережающего основной на 5 – 15 нс, при взаимодействии с жидкометаллическими мишенями;

- исследование взаимодействия с мишенями с нано- и микроструктурированной поверхностью;
- некоторые применения созданных лазерно-плазменных источников.

Доклад большого международного коллектива авторов, представляющих ИПФ РАН, ОИВТ РАН, Ecole Polytechnique (Франция) и LERMA (Observatoire de Paris, France) был представлен **М. В. Стародубцевым**. В докладе был представлен обзор экспериментальных исследований процессов лазерно-плазменного взаимодействия, проведенных на субпетаваттном лазерно-плазменном комплексе PEARL (ИПФ РАН). Основные направления исследований, изложенных в докладе, связаны с задачами ускорения протонов и лабораторной астрофизикой. В ходе экспериментов по ускорению протонов при помощи лазерного импульса мощностью до 170 ТВт (энергия импульса около 8 Дж, длительность импульса около 60 фс), сфокусированного в пятно диаметром порядка 6 мкм на тонкую алюминиевую мишень (толщины 0,5–10 мкм) были достигнуты энергии протонов, превышающие 43 МэВ, что является рекордом для лазерных систем с выходной энергией до 20 Дж. В ходе экспериментов по лабораторному моделированию астрофизических задач были получены экспериментальные результаты, моделирующие аккрецию вещества на астрофизические объекты, обладающие собственным сильным магнитным полем. Показано, что на внутреннем крае аккреционного диска, где газодинамическое давление плазмы сравнивается с магнитным давлением, развивается неустойчивость, приводящая к эффективному проникновению плазмы поперек внешнего магнитного поля. Отмечалось, что этот результат может привести к пересмотру традиционных моделей аккреционных дисков.

## Секционные доклады

### *Секция «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы»*

На секции «Магнитное удержание высокотемпературной плазмы» (председатель секции – А. И. Мещеряков) было представлено 66 докладов (из них 18 на устных и 48 на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками более 20 российских научных центров и 6 докладов выполнены совместно с сотрудниками научных центров США, Финляндии, Беларуси, Нидерландов и Казахстана.

Среди докладов, рассматривавшихся на секции, преобладали две основные тематики. Первая тематика – это доклады, направленные, в конечном счете, на решение проблемы создания управ-

ляемого термоядерного реактора на основе таких установок как токамак, стелларатор и открытые магнитные ловушки. Основная часть докладов по этой тематике была посвящена изучению режимов работы действующих установок, таких как токамаки Т-10, Туман 3М, стелларатор Л-2М, открытые ловушки ГДЛ, ГОЛ-3, а так же совершенствованию диагностик и методов обработки экспериментальных данных. Это направление получило дополнительное развитие за счет осуществления международного проекта токамака–реактора ITER. Доклады, освещающие российский вклад в осуществление этого проекта, в основном обсуждались на секции «ИТЭР: шаг в энергетику будущего».

В рамках этой тематики особый интерес представляют исследования транспортных переходов в режим улучшенного удержания плазмы, а также процессы формирования внутреннего транспортного барьера в горячей плазме в различных магнитных системах. Так в докладе **Неудачина С. В. с соавторами** «*Особенности локальных и нелокальных процессов формирования внутренних транспортных барьеров около поверхности  $q = 1$  в токамаках*» (НИЦ Курчатовский институт) исследовалась роль низкорациональных поверхностей с  $q \approx 1$  в формировании внутреннего транспортного барьера (ВТБ). Формирование ВТБ в плазме токамака Т-10 наблюдалось на фронте тепловой волны в области  $q \approx 1$  при включении центрального электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева на фоне плазмы (с подавленными пилообразными колебаниями), сформированной при нецентральной ЭЦР нагреве как на 1-й, так и на 2-й гармониках ЭЦР излучения.

В работе **Белокурова А. А. с соавторами** «*Динамика ЛН-перехода в токамаке при наличии ГАМ и инжекции замороженных макрочастиц*» (ФТИ РАН) с помощью моделирования турбулентного переноса исследовались особенности ЛН-переходов (переходов из состояния L с худшим удержанием энергии плазмы в состояние H с улучшенным удержанием энергии) в различных токамаках. В экспериментах на токамаке ТУМАН-3М было обнаружено, что ЛН-переходу в режиме с низкой плотностью всегда предшествует вспышка колебаний геодезической акустической моды (ГАМ), в то время как в плазме токамака ФТ-2 ЛН-переход не происходит, несмотря на наличие колебаний ГАМ значительной амплитуды. При помощи гирокинетического моделирования были установлены качественные и количественные характеристики турбулентного переноса в плазме обоих токамаков, в частности была обнаружена быстрая реакция коэффициента аномальной диффузии и потоков частиц и энергии на колебания электрического поля, сопровождающие ГАМ.

В плазме токамака ТУМАН-3М происходит инициирование перехода при превышении порогового значения для длительности или амплитуды ГАМ; на фоне колебаний градиента плотности и радиального электрического поля было обнаружено постепенное увеличение средних значений этих величин, приводящее к достижению порога для ЛН-перехода. Для плазмы токамака ФТ-2 не удалось при моделировании получить инициирование ЛН-перехода ни при экспериментальных параметрах ГАМ, ни при искусственно увеличенной длительности и амплитуде вспышки ГАМ.

Для создания стационарных термоядерных реактора и источника нейтронов на основе токамака требуется решить две основные задачи: поддержание в токамаке стационарного тока на уровне нескольких мегаампер и поддержание внутри и вне границы плазменного шнура токамака стационарных условий. На решение второй задачи нацелены работы по применению жидкого лития, позволяющего обеспечить осуществление замкнутой циркуляции дейтерий-тритиевого горючего в процессе рабочего цикла, а также существенно снизить тепловые нагрузки на диверторные пластины. На токамаке Т-11М исследовалась эффективность гладкого металлического покрытия в качестве коллектора попадающих на него ионов лития, а именно, определение допустимого температурного диапазона сбора лития гладкой мишенью. Этой проблеме был посвящен доклад **А. Н. Щербак** «*Исследование зависимости сбора лития коллекторной мишенью от температуры поверхности мишени в системе эмиттер-коллектор на токамаке Т-11М*» (ТРИНИТИ). Эксперименты показали, что по мере нагрева мишени в диапазоне температур от  $-196$  °С до  $+80$  °С эффективность сбора лития уменьшилась незначительно, не более чем на 20 %, что делает необязательным охлаждение литиевых коллекторов жидким азотом, и можно ограничиться, например, охлаждением водой. По мере нагрева мишени в диапазоне температур от  $+20$  °С до  $+230$  °С эффективность литиевого сбора оставалась практически постоянной и только при нагреве до  $+400$  °С падала примерно втрое. Для полной рекуперации водорода, захваченного твердым литием в температурном диапазоне  $-196$  до  $180$  °С, необходим нагрев мишени до температуры  $+400 \pm 50$  °С. Таким образом, захваченные водородные изотопы могут транспортироваться вместе с жидким литием с целью их вывода за пределы разрядной камеры для последующей 90 % рекуперации в температурном диапазоне  $+300 \pm 50$  °С. Относительное содержание водорода, захваченного литием на коллекторной мишени во время экспериментов составило не более 4 %.



Исследования на установке газодинамическая ловушка (ГДЛ) в ИЯФ СО РАН показали возможность преодоления недостатков ловушек открытого типа, таких как сложность магнитной системы, подверженность плазмы микронеустойчивостям и достижение «килоэлектронвольтового» диапазона электронной температуры (доклад **Багрянского П. А. с соавторами** «Исследование удержания плазмы в газодинамической ловушке: новые результаты и ближайшие планы»). Стабильное удержание плазмы с высокой плотностью и энергией может быть реализовано при помощи простой осесимметричной магнитной системы. Продемонстрированы режимы удержания, когда микронеустойчивости не вызывают существенных потерь, а электронная температура достигает значения 1 кэВ. Эти три достижения могут быть основой для пересмотра концепции ловушки открытого типа в качестве источника нейтронов для материаловедческих исследований, «дожигания» радиоактивных отходов, производства ядерного топлива, а также в качестве реактора термоядерного синтеза для производства энергии. На установке ГДЛ приступили к решению наиболее важных проблем следующего уровня, таких как оптимизация режимов нагрева плазмы при помощи атомарной инжекции и дополнительного ЭЦР нагрева, а также детальное исследование физических процессов в расширителях/диверторах, которые ответственны за ограничение продольных потерь энергии.

Газодинамическая многопробочная ловушка (ГДМЛ) — проект открытой ловушки нового поколения, разрабатываемый в ИЯФ СО РАН с 2011 года (доклад **Беклемишева А. Д.** «Перспективные элементы концепции ГДМЛ»). Исходная концепция была основана на комбинировании многопробочного улучшения продольного удержания, обоснованного экспериментами на ловушке ГОЛ-3, и центральной ячейки с «плещущимися» ионами, для воспроизведения режимов удержания на ловушке ГДЛ. Проект ГДМЛ возвращён на стадию концептуального проектирования, появившиеся новые предложения проходят стадии теоретической и экспериментальной апробации.

В качестве нового направления развития концепции многопробочной ловушки предложена идея винтового удержания, заключающаяся в активном подавлении истекающего потока плазмы магнитным полем, бегущим в системе отсчёта плазмы против градиента плотности. Ожидается экспоненциальная зависимость эффективности удержания плазмы от длины ловушки. Для проверки идеи в ИЯФ СО РАН создаётся установка СМОЛА. В экспериментах будет исследоваться торможение вращающейся плазменной струи при помощи соленоида с геликоидальным полем. Под-

робно эта идея излагается в докладе **Бурдакова А. В.** «Развитие экспериментов на многопробочных плазменных ловушках для целей УТС».

Доклады по второй части тематики, связанной с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы были направлены на решение проблемы создания термоядерного источника нейтронов (ТИН), интерес к которой значительно возрос в последние годы. В ТИН предполагается использовать термоядерную плазму в качестве источника нейтронов для стимулирования реакций деления в ядерном материале бланкета (ядерные материалы это радиоактивное отработанное топливо ядерных реакторов атомных электрических станций или материалы из необогащенного урана; бланкет это устройство, расположенное сразу за первой стенкой ТИН, в который загружаются твердые или протекают жидкие материалы, предназначенные для облучения нейтронами). Такой реактор должен работать в подкритическом режиме, что существенно повышает безопасность его эксплуатации. В то же время высокая энергия термоядерных нейтронов 14 МэВ обеспечивает эффективность реакций деления в бланкете и позволяет вести наработку делящихся материалов или дожигание продуктов реакции в отработанном топливе. В отличие от чистого термоядерного реактора без делящихся материалов, экономически выгодная эксплуатация которого определяет минимальную мощность около 10 ГВт, мощность термоядерной реакции в ТИН может быть в 100 раз меньше в связи с тем, что основное энерговыделение происходит в подкритическом бланкете, за счет реакций деления, что существенно снижает требования к параметрам плазмы и материалам токамака.

В Национальном исследовательском центре «Курчатовский Институт» на протяжении ряда лет ведется численное моделирование гибридного термоядерного реактора ДЕМО-ТИН с предполагаемой термоядерной мощностью 3–50 МВт. В докладе **Ананьева С. С. с соавторами** «Моделирование поведения изотопов водорода в элементах топливной системы термоядерного реактора ДЕМО-ТИН» были приведены результаты расчетов, выполненных для проекта ДЕМО-ТИН, на основании которых можно рассчитать потоки и запасы всех изотопов водорода в каждой из систем реактора. Для уменьшения газовой смеси, накапливаемой в элементах систем, была проведена оптимизация схемы топливного цикла в соответствии с параметрами ДЕМО-ТИН. В докладе **Кукушкина А. С. с соавторами** «Предварительные результаты моделирования дивертора для реактора ДЕМО-ТИН» обсуждались результаты численного моделирования первого варианта дивертора ДЕМО-ТИН с помощью пакета программ

SOLPS 4.3. В модели термоядерная часть ДЕМО-ТИН представляет собой токамак с большим радиусом 3,2 м и термоядерной мощностью около 40 МВт. Принципиальным вопросом обеспечения квазистационарной работы ДЕМО-ТИН является создание необходимых параметров пристеночной плазмы, через которую отводится выделяемая в плазме мощность, откачиваются продукты реакции, и происходит управление плотностью плазмы в разряде. Для этого в ДЕМО-ТИН предусмотрен двухнулевой полоидальный дивертор, работающий в режиме отрыва плазмы от приёмных пластин. В докладе **Кукушкина А. С.** было показано, что для поддержания плотности плазмы на краю шнура в пределах  $(4\div 5)\times 10^{19} \text{ м}^{-3}$  около 70 % мощности, выходящей с плазмой через сепаратрису, должно излучаться на примесях в пристеночной плазме.

В докладе **Стрелкова В.С. и Днестровского Ю.Н.** «Токамак — наработчик ядерного топлива» прозвучало еще одно возможное направление использования токамака. В связи с ограниченными природными запасами делящихся изотопов в урановых и ториевых рудах (содержание  $^{235}\text{U}$  в урановой руде всего 0,7 %) и ростом энергопотребления в мире, в конце XXI века, по-видимому, возникнет потребность в «искусственном» производстве ядерного горючего для традиционных атомных станций путем облучения урановой руды потоком нейтронов с энергией 14 МэВ. Сегодня токамак больших размеров (большой радиус тора  $R = 10$  м, малый радиус тора  $r = 2,5$  м), работающий в режиме омического нагрева, способен в импульсно-периодическом режиме со скважностью 0,8 в течение суток генерировать нейтронные импульсы с выходом  $2\times 10^{17}$  нейтронов в секунду. Для промышленного производства ядерного топлива необходима мощность нейтронного потока на уровне 1 ГВт, т. е. нейтронный поток должен быть на уровне  $4,4\times 10^{20}$  нейтронов в секунду. При таких условиях токамак будет набирать до 1,5 кг изотопа урана  $\text{U}^{235}$  в течение года. Расчеты показывают, что введение 100 МВт дополнительной мощности нагрева в ионную компоненту плазмы токамака приведет к росту потока нейтронов и, соответственно, к увеличению наработки изотопа урана в 200 раз.

Основываясь на результатах работы секции, можно сделать неутешительный вывод: уровень экспериментальных работ, выполняемых на российских термоядерных установках заметно ниже уровня работ, ведущихся в таких технологически развитых странах как США, Япония, Южная Корея, Китай и Евросоюз. Это связано с тем, что с 2012 года финансирование работ, связанных с высокотемпературной плазмой и термоядерными ис-

следованиями, сократилось в 4 раза. Крупнейшими действующими в России тороидальными магнитными ловушками, работающими с высокотемпературной плазмой, на сегодня остаются токамак Т-10 и стелларатор Л-2М, построенные более 40 лет тому назад, а самый «молодой» компактный сферический токамак «Глобус-М» построен более 20 лет назад.

### *Секция «Инерциальный термоядерный синтез (ИТС)»*

На секции «Инерциальный термоядерный синтез (ИТС)» (председатель секции Степанов Р. В.) было представлено 14 устных и 32 стендовых доклада. Результаты исследований, представленные в 12 докладах, получены при международном сотрудничестве с научными центрами США, Канады, Евросоюза, Индии, Кореи, Казахстана и Абхазии.

По представленным на секции докладам, можно выделить несколько направлений исследований по ИТС и смежным проблемам – как давно сформировавшихся, так и сравнительно новых, 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. Можно считать сформировавшейся тенденцию исследований по определению диапазонов параметров перспективных конструкций плазмобразующих нагрузок (прежде всего – каскадных) и совершенствованию методов их изготовления. В частности, была продемонстрирована возможность подавления магнитной неустойчивости Рэля-Тейлора при сжатии внутреннего лайнера. Также, использование излучения Z-пинчей в разных диапазонах позволило, благодаря оригинальной постановке эксперимента получить уникальные данные по непрозрачности плазмы, получаемой из олова (Sn), в диапазоне вакуумного ультрафиолета, имеющие критическую важность для ряда приложений. Комплекс диагностик плазмы установки «Ангара-5-1» постоянно совершенствуется. Взаимно плодотворным является сотрудничество ТРИНИТИ с ИПМ РАН. Совершенствование развитого в ИПМ РАН радиационного магнитогидродинамического (РМГД) кода MARPLE-3D в значительной степени основывается на экспериментальных результатах ТРИНИТИ. В свою очередь, эта вычислительная платформа помогает проводить углубленный анализ физиче-

ских процессов, протекающих на различных этапах сжатия плазмы в пинче. Рентгеноспектральные характеристики плазмы лазерно-индуцируемого вакуумного разряда малой мощности были рассмотрены в совместном докладе сотрудников ИГУ, ИПМ РАН и ФИАН.

Большой интерес представляют исследования, проводимые в Лаборатории проблем новых ускорителей ФИАН, где несколько лет назад была разработана концепция гибридного X-пинча (ГХП), ставшего с тех пор уникальным диагностическим инструментом в мягком рентгеновском диапазоне. Сотрудники лаборатории проводят поиск новых применений: так, в представленной в этом году работе были исследованы свойства ГХП как мощного импульсного источника излучения в более мягком диапазоне рентгеновского излучения (с длинами волн более  $20 \text{ \AA}$ ). Также, развитый ранее метод проекционной рентгенографии использовался для исследования процессов, проходящих при электровзрыве тонких фольг.

Актуальное направление «лабораторная астрофизика» было представлено исследованиями, проводимыми в НИЦ «Курчатовский институт» совместно с СФТИ (Сухум, Абхазия) и IPPLM (Варшава, Польша) на установках типа «плазменный фокус» (ПФ), направленными на выявление в лабораторных условиях механизмов, отвечающих за коллимацию астрофизических плазменных струй (джетов). Успешно реализованы схемы с импульсным напуском фонового газа, получены режимы с хорошей коллимацией плазменного потока и существенные данные о его структуре, распределении магнитных полей в нем, возможных механизмах охлаждения и торможения плазмы. Разработан пакет программ для расчета возникающих РМГД-течений. Исследованию плазменных струй в ПФ вблизи момента их рождения был посвящен доклад сотрудников Лаборатория физики плотной плазмы ФИАН.

Влиянию квантовых эффектов на процессы в сверхплотной плазме были посвящены две работы. В первой, выполненной в ИПМ РАН, было предложено усовершенствование модели Саха в предположении о частичном вырождении свободных электронов и неточности ионных остовов. Область применимости модели Саха при этом кардинально расширилась. В результате объединения новой модели и модели Томаса-Ферми (с квантовой и обменной поправками) существенно возросла точность такого широкодиапазонного уравнения состояния плазмы при сверхвысоких плотностях, что имеет большое значение для задач ИТС. Идейно близкой стала работа, представленная сотрудниками Лаборатории проблем новых ускорителей ФИАН, посвященная исследованию

процессов в экстремально плотной плазме горячей излучающей точки X-пинча, приводящих к её взрыву и прекращению рентгеновской вспышки.

Следует отдельно отметить исследование, проведенное сотрудниками ИПМ РАН и МГУ: оно было посвящено уточнению скоростей термоядерных реакций в горячей плазме. Расчетную базу составили около 2000 экспериментальных точек из 90 научных работ. Оригинальный метод, примененный авторами, позволил получить формулы, уточняющие старые данные на 10–20 % при низких температурах и кардинально улучшающие их при высоких температурах плазмы.

Как и в предыдущие годы, важное место среди работ лазерно-плазменной тематики занимают 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 возможных приложений: от физики ИТС до биологических исследований и медицинских терапевтических методик, – этим обусловлена высокая актуальность таких работ. Следует отметить интересные расчетно-теоретические результаты, полученные в ФИАН в секторе лазерно-плазменной физики высоких энергий, ВНИИА, и в ОИВТ РАН в лаборатории теории лазерно-плазменных воздействий для задач лазерно-плазменной генерации излучения различного диапазона, включая терагерцовый диапазон, а также создание мощных пучков заряженных частиц. В результате исследований этими коллективами установлена важность учёта кинетических эффектов в лазерном термоядерном синтезе (ЛТС). Учет кинетических эффектов также важен при оптимизации разделения сортов ионов на фронте ударной волны в плазме, при анализе устойчивости радиационного теплового потока и расчете поглощения лазерного излучения на ионно-звуковой турбулентности. На заседаниях секции обсуждались возможные эксперименты по экспериментальному исследованию новых явлений, найденных теоретически и с помощью численного моделирования лазерной плазмы. Обзорные доклады экспериментальных исследований **А. Б. Савельева** (МГУ) и **М. В. Стародубцева** (ИПФ РАН) позволяют надеяться на прогресс в этом направлении, однако возможности имеющихся в России установок невелики по сравнению с мировым уровнем. В этих обзорных докладах подчеркивалось, что для развития экспериментальных исследований требуются лазерные системы мультипетаваттного уровня мощности. Интерес вызвали расчетно-теоретические работы, проводимые в ИПМ РАН по оптимизации пара-

метров плазменных волноводов, возникающих в капиллярных разрядах. Этот тип разрядов необходим для построения перспективных схем лазерно-плазменных ускорителей заряженных частиц, например, таких как проект BELLA (LBNL, США).

С предыдущим направлением непосредственно связана вызывающая большой интерес задача о генерации сильных магнитных полей (МП) в лазерной плазме. На секции была представлена расчетно-теоретическая работа сотрудников ФИАН и МИФИ, в которой был рассмотрен недавно предложенный способ генерации сверхсильного квазистационарного спонтанного МП в лазерной плазме при взаимодействии релятивистских лазерных импульсов с мишенями, обладающими кривизной поверхности. Методом PIC-моделирования (Particles in Cell – PIC) исследовано взаимодействие интенсивного импульса пикосекундной длительности с мишенями типа «улитка». Особое внимание было уделено выявлению физических механизмов генерации МП и описанию процессов ускорения электронов лазерной волной при учете спонтанного квазистационарного магнитного поля.

Технологическое направление было представлено текущими результатами, полученными в ходе реализации многолетних исследовательских программ, работа над которыми ведется сотрудниками Лаборатории термоядерных мишеней ФИАН. В разных областях ИТС (в том числе – для задач лазерно-плазменного ускорения частиц) востребованы различные малоплотные пористые мишени высокого качества, технологии производства которых успешно разрабатываются в Лаборатории. Другой аспект деятельности связан с созданием и совершенствованием технологии массового производства бесподвесных криогенных термоядерных мишеней (КТМ). В докладах были представлены результаты экспериментальных исследований с использованием высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) при разработке капсул-носителей для систем инъекционной доставки КТМ в центр экспериментальной камеры в схеме лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). Впервые продемонстрирована возможность осуществить стабильную левитацию ВТСП образцов в магнитном поле с индукцией  $B = 0,25\text{--}0,5$  Тл при реализации как линейного, так и циклического движения.

Результаты экспериментов в области ЛТС были традиционно представлены сотрудниками ИЛФИ ВНИИЭФ – института, в котором успешно функционируют крупнейшие в стране лазерные установки. На лазерной установке «Луч» для повышения однородности облучения мишеней создана система пространственно-временного сглаживания лазерного излучения с помощью

многомодового оптического волокна, позволяющая практически полностью устранить спекл-структуру излучения на мишени. На установке «Искра-5» разработана методика определения выхода нейтронов из лазерной плазмы по реакции активации изотопа индия быстрыми нейтронами. Среди работ, посвященных физике мишеней ЛТС, следует выделить расчетно-теоретические исследования, проводимые сотрудниками ИПМ РАН и Сектора теории лазерной плазмы ФИАН. Ими выполнен глубокий анализ многих процессов, происходящих в мишенях прямой и непрямоугольных схем сжатия, включая схемы с быстрым поджигом. В частности, расчеты имплозии мишеней прямого сжатия для импульса лазерной энергии  $\sim 1$  МДж (и масштабированных к этому уровню) дают близкие результаты по различным численным кодам для различных конструкций, а предполагаемые масштабы неоднородностей, связанных с геометрией облучения, сопоставимы для различных установок. При этом наиболее существенное негативное влияние на эффективность сжатия и поджиг мишени оказывает случайный сдвиг мишени из центра наведения пучков. Двукратное увеличение масштаба соответствующей неоднородности приводит к хорошему соответствию результатов расчетов экспериментальным данным на установке OMEGA (LLE, Rochester, США).

В целом, 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. Особенно отчетливо это проявляется в общей картине работ лазерно-плазменной тематики. Как уже отмечалось, налаженная кооперация и широкая экспериментально-диагностическая база способствуют стабильному развитию исследований, проводимых на электроразрядных установках. Так, в РФЯЦ-ВНИИЭФ создается четырехмодульный электрофизический комплекс «Гамма-4». Вместе с тем, весьма скудный набор лазерных систем, работающих в широком диапазоне параметров излучения, сдерживает прогресс российских научных групп. Актуальные исследования проводятся на небольшом количестве установок, таких как Международный лазерный центр МГУ, PEARL (ИПФ РАН), но их возможности ограничены. Перспектива создания в МИФИ субпетаваттной лазерной системы ELF, вызывает определенный оптимизм. Однако перспективный проект лазера мощностью в 180 ПВт системы XCELS, предложенной в ИПФ РАН, все еще не имеет определенного статуса.

Современный мировой уровень лазерно-плазменных исследований требует создания в Рос-

сии 2–3 мультипетаваттных лазерных систем и нескольких 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.

### **Секция «Физические процессы в низкотемпературной плазме»**

В рамках Научного совета РАН по комплексной проблеме «Физика низкотемпературной плазмы» эта секция работала под председательством В. С. Воробьева. Было заслушано 23 устных доклада и 54 стендовых сообщения. Было представлено три работы, выполненные в сотрудничестве с научными центрами Японии, Китайской Народной Республики и Франции.

Устные доклады подытоживали исследование, проводимые в области изучения термодинамических и транспортных свойств так называемой горячей теплой материи (warm dense matter). Этот термин стал использоваться несколько лет назад применительно к плотному нагретому веществу (плотное плазменное образование), в котором процессы ионизации играют заметную роль. Были представлены новые результаты исследований элементарных процессов в плазме, кинетических свойств газоразрядной низкотемпературной плазмы. На секции обсуждались также различные применения стационарной низкотемпературной плазмы, и плазмы, возникающей в импульсных процессах. По этим же направлениям можно разбить и стендовые доклады, хотя здесь было представлено значительное количество докладов, связанных с технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Следует еще раз отметить новое направление, которое применимо к условиям, когда низкотемпературная плазма, превращается в так называемую «теплую плотную материю» (warm dense matter). Это направление интенсивно развивается в ведущих мировых исследовательских центрах в Германии, США, Японии. Интерес к такому состоянию вещества обусловлен новыми явлениями, которые были обнаружены и имеют перспективы для применения. Исследования российских ученых играют существенную роль в развитии теории этого направления. На конференции было заслушано четыре устных доклада по этой тематике. Интерес вызвал доклад **А. Л. Хомкина и А. С. Шумихина**

(ОИВТ РАН) «Эффекты металлизации в плотных, закритических парах металлов». 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 и электроны «желе», возникающие в результате перекрытия волновых функций валентных электронов. Разработанная авторами теория описывает также неидеальные свободные ионы и электроны в таком состоянии как warm dense matter. Электроны желе возникают на «хвостах» волновых функций валентных электронов и существуют при отрицательных энергиях, а свободные, термические электроны при положительных ионах сосуществуют независимо. В докладе **В. С. Воробьева и Е. М. Апфельбаума** (ОИВТ РАН) «Линия единичного фактора сжимаемости для некоторых металлов» показано, что свойство линейности для линии единичного фактора сжимаемости (Zero line-ZL) также подтверждается для жидкой фазы металлов Mg, Ca, Sr, Ba, Al, Cu, and U в закритической области. Для описания взаимодействия между частицами использовался потенциал погруженного атома (Embedded atomic potential-EAM). Привлек внимание доклад **Г. В. Шпатаковской** «О зависимости электронных энергий связи в свободных ионах от заряда ядра и степени ионизации», где по образцу, полученному в квазиклассическом приближении в модели Томаса-Ферми, был проведен анализ экспериментальных и теоретических электронных спектров для атомов периодической системы от неона до урана. В результате была установлена упорядоченность электронных уровней в заполненных оболочках, проявляющаяся в их подобию по атомному номеру.

Другое перспективное направление связано с применением спектральных методов диагностики высокочастотных разрядов. Было предложено использовать для этой цели излучение триплетных состояний. Этот вопрос был рассмотрен в докладе **В. А. Шахатова и Ю. А. Лебедева** (ИНХС РАН) «Анализ возможности использования излучения триплетных состояний молекулярного водорода для диагностики неравновесных СВЧ-разрядов в водороде».

На двух заседаниях стендовой секции было представлено 54 доклада. Значительная часть из них была связана с технологическими применениями низкотемпературной плазмы. Другая часть стендовых докладов была связана с исследованиями 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, прошла на высоком научном уровне и показала, что ряд новых направлений, таких как warm dense matter и изучение свойств низкотемпературной плазмы при пробое газов и конденсированных сред, успешно развиваются в России и не уступают мировому уровню. Результаты конференции свидетельствуют о достаточно высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России в области низкотемпературной плазмы. Это объясняется тем, что стоимость экспериментальных установок для создания и исследования такой плазмы существенно ниже установок для ЛТС и установок для магнитного удержания высокотемпературной плазмы, а теория плазмы, как и 30 лет назад, занимает высокое место в мире благодаря сохранению в России научных школ и традиций в области физики плазмы.

#### **Секция «Физические основы плазменных и лучевых технологий»**

Секция «Физические основы плазменных и лучевых технологий». На секции «Физические основы плазменных и лучевых технологий» (председатель секции А. Ф. Александров) было представлено 14 устных и 37 стендовых доклада из институтов РАН, вузов стран СНГ и других ведущих научных центров России, в том числе из Москвы, Троицка, Долгопрудного, Иркутска, Новосибирска, Нижнего Новгорода, Татарстана, Дагестана, Чувашии, Мордовии, Санкт-Петербурга и Томска. Восемь докладов были результатом совместных исследований с институтами США, Великобритании, Беларуси и Таджикистана. Тематика докладов, представленных на секции, была достаточно широка: создание технологий для получения новых материалов электроники, изучение процессов воздействия плазмы на поверхность материалов, в том числе работы по разработке технологии получения износостойких покрытий, исследования по плазмохимии, в том числе газоразрядное воспламенение топлива, работы по применению плазмы в медицине, атмосферная плазма и ее применение, воздействие газового разряда на гидродинамические потоки газов и другие перспективные прикладные тематики. Ряд докладов был посвящен новым аспектам традиционных тематик: это генерация низкотемпературной плазмы, в том числе с помощью ВЧ- и СВЧ-полей, диагностика плазмы, ускорение частиц и плазмы, проблемы генерации СВЧ и управления частотой излучения с использованием плазмы, различные аспекты взаимодействия СВЧ-излучения с плазмой, воздействие лазерного излучения на вещество. Два доклада были

посвящены воздействию СВЧ-излучения на биологические объекты.

Интерес участников устного заседания секции вызвал доклад **Г. И. Змиевской и Т. А. Авериной** (ИПМ РАН, ИВМ и МГ СО РАН), в котором рассматривался механизм формирования капель расплава (зародышей карбида кремния) в плазме газового разряда. Расчет показал, что возникновение неустойчивости Релея приводит к бимодальному распределению капель конденсата по размерам, что важно знать при зарядовом диспергировании в процессе получения порошков. Доклад **Смоланова Н. А. с соавторами** (МГУ имени Н. П. Огарева) был посвящен разработке методов и технологий формирования поверхностей с оптимальными свойствами. Образующаяся пленка имеет особую структуру на поверхностях трения толщиной в несколько сотен нанометров. В ней реализуется особый механизм деформации, протекающий без накопления дефектов, свойственных усталостным процессам. В докладе **Шавелкиной М. Б. с соавторами** (ОИВТ РАН, НИИ биомедицинской химии имени В. Н. Ореховича РАН, МГУ) показана возможность прямого синтеза гидрированных графеновых материалов в плазмоструйном реакторе. **Коршунов С. Н. с соавторами** (НИЦ «Курчатовский институт») установили, что сопутствующее электронное и последующее ионное облучение приводит к образованию в пленках связей с  $sp$ - и  $sp^3$ -гибридизацией в различной пропорции, причем ионное облучение в большей степени стимулирует образование связей с  $sp$ -гибридизацией, а сопутствующее электронное облучение увеличивает долю связей с  $sp^3$ -гибридизацией. **А. М. Анпилов с соавторами** (ИОФ РАН, ООО «Плазма СК», Саратов) исследовали влияние термических нагрузок на вторичноэмиссионные характеристики наноуглеродных пленок. **Сергейчев К. Ф. с соавторами** (ИОФ РАН) представили применение факельного СВЧ-разряда при атмосферном давлении в технологии МРАСVD синтеза алмаза. Реализовано осаждение алмазных пленок nano- и микрокристаллической структуры на инородных подложках площадью около  $1 \text{ см}^2$  из тугоплавких металлов, композитов и кремния с предварительным засевом наноалмазным порошком или наноуглеродным коллоидом в ультразвуковой ванне.

В работе **Корнева Р. А. с соавторами** (ИХВВ РАН, ИОФ РАН) приводятся результаты исследования процесса плазмохимического водородного восстановления тетрафторида кремния в различных типах разрядов в широком диапазоне технологических параметров. В работе **Казеева М. Н. с соавторами** (НИЦ «Курчатовский институт») получена база данных по испарению и нагреву с



использованием массивных неразрушаемых образцов из вольфрама и молибдена, определена кинетика испарения металлов при высоких импульсных потоках энергии на поверхность (до 2 ГВт/см<sup>2</sup>) на основе использования разработанной численной модели, а также изучена динамика поведения поверхности испарения на основе металлографических исследований. **Миронов М. М. с соавторами** (КНИТУ) исследовали воздействие высокочастотной плазмы на ксенонеперикард хирургических имплантатов. Авторы показали, что обработка приводит к упорядочению структуры коллагена, активации сшивающих агентов, усреднению размеров микро- и нанопор, что определено расчетом и подтверждается электронной микроскопией структуры. **Иванов В. А. с соавторами** (ИОФ РАН, МИФИ, ИМаш РАН) исследовали микроплазменные разряды, возбуждаемые потоком плазмы на поверхности конструкционных металлов. В работе показано, что поверхностное упрочнение обусловлено формированием в микроплазменных разрядах прочного микрорельефа на поверхности металлов, что открывает широкие перспективы для создания износостойких образцов, которые могут найти применение в промышленности композитных материалов, а также в ортопедии и стоматологии. Еще один доклад этого направления (**Иванов В. А. с соавторами**, ИОФ РАН, МИФИ) был посвящен оптической диагностике микроплазменных разрядов. СВЧ-реактор для паровой конверсии газов и его апробация на примере CO<sub>2</sub> представлен в докладе **Бархударова Э. М. с соавторами** (ИОФ РАН, Edinburgh Napier University, Edinburgh, НИУ «Высшая школа экономики»).

В докладе **Е. А. Филимоновой с соавторами** (ОИВТ РАН) было проведено численное исследование влияния химически активных частиц на задержку воспламенения в компрессионном двигателе в 0-мерной постановке. В результате моделирования было показано, что наработанные разрядом химически активные частицы являются активаторами воспламенения, которые меняют процесс протекания низкотемпературной стадии горения, «подталкивая» ее начало и ускоряя протекание в случае холодного старта или использования бедной смеси, для которых характерны пропуски воспламенения. **Косарев И. Н. с соавторами** (МФТИ, Принстонский университет США) исследовали термическое и плазменно-стимулированное воспламенение смеси диметилэфира (ДМЭ) с кислородом. Цель исследования заключалась в расширении экспериментальной базы данных воспламенения ДМЭ и уточнения кинетических механизмов моделирования его воспламенения. В еще одном докладе этой же научной

группы (**Анохин Е. М. с соавторами**) исследовался распад плазмы высоковольтного наносекундного разряда в горючих смесях. Анализ результатов измерений показал, что скорость рекомбинации плазмы в исследованных горючих смесях превосходит скорость рекомбинации в чистых углеводородах и чистом кислороде. **Дешко К. И. с соавторами** (МГУ) продолжили цикл экспериментов по исследованию малогабаритного магнитоплазменного компрессора в частотном режиме для воспламенения высокоскоростной воздушно-пропановой смеси.

**Сайфутдинов А. И. с соавторами** (КФУ, СПбГУ) на основе системы уравнений Навье-Стокса, уравнения теплового баланса, а также уравнений Максвелла провели серии численных экспериментов по определению основных параметров современной коммерческой установки по плазменному напылению газотермических покрытий «Термоплазма 50-01». Получено распределение температуры в плазменном канале, смоделировано истечение струи из плазмотрона и поле скоростей плазмы в плазменном реакторе. **Саргсян М. А. с соавторами** (ОИВТ РАН) разработали оригинальную двухузловую конструкцию мегаваттного генератора низкотемпературной плазмы аргона, включающую катод, полый анод и сопла с расширяющимся каналом, что позволило получить высокоэнтальпийный плазменный поток со средней температурой 10000÷17000 К и концентрацией электронов в приосевой области плазмы до  $9 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

**Бычков В. Л. с соавторами** (МРТИ РАН, МГУ) исследовали роль процессов прилипания и отлипания в сухом воздухе в предпробойных условиях в постоянном электрическом поле. Представлены полная и укороченная модели процессов с участием отрицательных ионов, которая хорошо описывает кинетику процессов в около пороговой области. Рассмотрена одномерная математическая модель подъема потока атомарных и молекулярных ионов кислорода O<sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sub>3</sub><sup>-</sup> на высоту до 2 км от генератора ионов, поднятого над землей на высоту от 30 до 50 м с учетом дрейфа, диффузии и плазмохимических процессов. Расчет ведется в присутствии внешнего поля, порожденного положительным зарядом облака и с учетом внешнего поля Земли.

В работе **Куратова А. С. с соавторами** (ЦФПИ ВНИИА, ФИАН) исследована генерация электромагнитного излучения вследствие лазерно-иницированного разлета плазмы в вакуум. Показано, что для современных лазеров эффективность трансформации лазерной энергии в терагерцовую может достигать значения 10<sup>-4</sup>. Даны общие выражения для терагерцовых электромагнитных по-

лей, возникающих в металлических мишенях при наличии внешних токов, появляющихся вследствие воздействия лазерного импульса на плоскую и цилиндрическую (проволока) мишень.

Изучению взаимодействия газовых разрядов с потоками газа была посвящена группа докладов. В работе **И. А. Знаменской** (МГУ) приведены данные по самолокализации объемного разряда в прямоугольном канале в сверхзвуковом потоке за плоской ударной волной с числом Маха 2–4,5. Определены условия перераспределения тока объемного разряда в газодинамические структуры: зоны ударных волн, отрыва газового потока, вихревые зоны. Во втором докладе, представленном этой же научной группой, экспериментально исследованы оптическими методами и численно промоделированы процессы при инициировании разрядов наносекундной длительности (~300 нс) в условиях неоднородного распределения плотности, реализующегося в процессе дифракции плоской ударной волны на клине в канале ударной трубы. Обнаружено, что после начала дифракции ударной волны на донной части клина разряды инициируются преимущественно в вихревой зоне. **Шибков В. М. с соавторами** (МГУ) изучали динамику пульсирующего разряда, создаваемого с помощью источника постоянного тока в условиях высокоскоростных воздушных потоков. Показано, что исследуемый разряд представляет собой тонкий плазменный канал диаметром около 1 мм. В зависимости от скорости потока и величины разрядного тока длина плазменного канала изменяется от 5 до 40 см. Пульсирующий характер разряда в потоке приводит к осцилляциям напряжения на разрядном промежутке, разрядного тока и свечения плазмы. Показано, что глубина модуляции напряжения разряда и свечения плазмы достигают 100 %.

Большая группа докладов была посвящена исследованию задач взаимодействия СВЧ-излучения с плазмой, генерации СВЧ и (обратная задача) использования его для ускорения частиц, а также проблеме управления мощным СВЧ-излучением. **Ернылева С. Е. с соавторами** исследовали импульсно-периодический плазменный релятивистский СВЧ-усилитель с инверсной геометрией, в которой трубчатый релятивистский электронный пучок распространяется снаружи от трубчатой плазмы и, далее, осаждается на стенку камеры. В работе показано, что частота излучения может перестраиваться в диапазоне от 3,5 до 9 ГГц, что примерно вдвое шире, чем в предшествующих устройствах. **Карташов И. Н. с соавторами** (МГУ) теоретически рассмотрели пучково-плазменную неустойчивость в нестационарной плазме и пока-

зали, что изменение частоты генерации пропорционально производной изменения плотности плазмы во времени. **Туев П. В. с соавторами** (ИЯФ СО РАН, НГУ) рассмотрели взаимодействие релятивистского протонного пучка с плазменным шнуром переменной плотности вдоль оси симметрии. Параметры плазмы и драйвера соответствуют условиям первого эксперимента по протонному кильватерному ускорению AWAKE. С помощью численного моделирования изучен захват электронов в возбуждаемую ленгмюровскую волну. Идентифицированы и объяснены области захвата электронов в фазовом пространстве начальных координат и импульсов. В докладе **Урюпина С. А. и Фролова А. А.** (ФИАН, ОИВТ РАН) рассмотрен один из нелинейных механизмов возбуждения поверхностных волн, связанный с генерацией тока увлечения наклонно падающим под углом  $\alpha$  к поверхности проводника импульсом лазерного излучения, сфокусированного цилиндрической линзой. Показано, что если длительность лазерного импульса  $\tau$  много больше времени свободного пробега электронов, то основной причиной генерации поверхностных волн является ток увлечения, а генерация вследствие пондеромоторного воздействия импульса существенно менее эффективна. Проникновение электромагнитного импульса в плазму с током рассмотрено **К. Н. Овчинниковым и С. А. Урюпиным** (ФИАН). Представленная в докладе теория может быть использована для анализа проникновения электромагнитного импульса в «дозвуковые» разряды на установках ТУМАН-3, Alcator, ASDEX, TFTR, если длительность импульса превышает характерное время нагрева частиц плазмы. **Гришков В. Е. и Урюпин С. А.** (ФИАН) рассмотрели отклик плазмы на воздействие излучения на базе кинетического уравнения, учитывающего столкновения электронов с ионами. Показано, что наряду с пондеромоторной силой, сила увлечения также приводит к генерации плазменных волн. Продемонстрировано, что для типичных плазм основной причиной возбуждения плазменных колебаний является нелинейный ток, порождаемый пондеромоторной силой. В докладе **Двинина С. А. и соавторами** (МГУ, Национальный университет Таджикистана) теоретически рассмотрено вынужденное рассеяние Манделъштама-Бриллюэна в длинном плазменном слое.

Управление мощным СВЧ-излучением с помощью электромагнитных кристаллов рассмотрено в докладе **Усачёнка М. С. с соавторами** (ИФ НАН Республики Беларусь). В работе продемонстрирована возможность управления распространением СВЧ-излучения большой (около 50 кВт)

мощности с помощью электромагнитного кристалла, сформированного в волноводе  $23 \times 10 \text{ мм}^2$  тремя импульсными разрядами в аргоне при атмосферном давлении. В работе **Андреева В. В. и Умнова А. М.** (РУДН) методами численного моделирования исследовано формирование релятивистских плазменных сгустков с прогнозируемыми параметрами в коротком пробкотроне. Результаты численных экспериментов показали возможность управления параметрами генерируемых релятивистских сгустков в широких пределах при изменении как ускорительных параметров, так и рабочих параметров инжектора. Энергия, приобретаемая электронами, может достигать десятков МэВ, а плотность частиц в сгустках может достигать значений  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ , которая определяется параметрами инжектора и напряженностью СВЧ электрического поля. В еще одной работе, представленной коллективом РУДН (**Чупров Д. В. с соавторами**), результаты численного моделирования сопоставляются с экспериментально наблюдаемыми результатами исследования плазменных сгустков, получаемых при гиромагнитном авторезонансе. Экспериментально показано, что при двукратном увеличении амплитуды импульсного поля средняя энергия частиц сгустка возрастает до значений 0,6–0,8 МэВ. Первые результаты сравнения источников мощных (10 МВт) электронных пучков субмиллисекундной длительности в источниках с многоапертурной электронно-оптической системы диодного типа с решетчатыми и плазменными анодами проведено коллективом авторов (**Астрелин В. Т. с соавторами**) Новосибирского университета, ИЯФ СО РАН и ИСЭ СО РАН. **Степанов В. Д. с соавторами** (НГУ, ИЯФ СО РАН) представили измерения углового разброса электронов сильноточного релятивистского электронного пучка (РЭП) с помощью многоколлекторного датчика. **Каньшин Л. А.** (ЦФПИ ВНИИА) предложил метод согласования корпускулярного потока с ускоряющей системой малогабаритных линейных ускорителей заряженных частиц. В работе **Казакова Е. Д. с соавторами** (НИЦ «Курчатовский институт», ИПМ РАН, МФТИ) представлены результаты экспериментального исследования динамики плазмы в диодном зазоре при воздействии сильноточного РЭП на образцы из эпоксидной смолы; произведено сравнение с данными моделирования. Малогабаритный сильноточный ионный диод с импульсной магнитной изоляцией электронов на энергию 500 кэВ разработан **Исаевым А. А. с соавторами** (НИЯУ МИФИ).

Еще один биомедицинский доклад, представленный коллективом белорусских ученых (ИФ НАН Республики Беларусь, Научно-практический

центр гигиены, Беларусь), был посвящен инактивации планктонных микроорганизмов и их консорциумов плазменными струями атмосферного давления на постоянном токе.

Ряд не упомянутых выше работ был посвящен плазмооптической масс-сепарации, разработке аналитических моделей газового разряда низкого давления, исследованию ультрафиолетового излучения локализованного в атмосфере подпорогового разряда в пучке микроволн, особенностям формирования ударных волн в фотоплазме воздуха и динамике формирования объемного разряда в гелии атмосферного давления, диагностике процессов в прозрачных мишенях при их облучении электронным пучком, и оптической диагностике микроволнового разряда.

Работа секции в целом показала, что в области плазменных и пучковых технологий ведется активная исследовательская и конструкторская работа, причем из года в год растет число докладов, представляющих выполненные на хорошем уровне научные исследования с большим объемом опытно-конструкторских работ. Общее число докладов, представленных на секции «Физические основы плазменных и лучевых технологий» в 2017 году немного уменьшилось по сравнению с 2016 годом, но имеется положительная тенденция – увеличение количества работ, выполненных с участием молодых ученых, аспирантов и студентов старших курсов университетов.

Работа секции на конференции способствовала решению многочисленных проблем, где задействованы плазменные и лучевые технологии. Создание и модернизация высокоэнергетических плазменных устройств, таких как мощные плазмотроны, генераторы терагерцового излучения, источники мощного СВЧ-излучения, развитие плазменных методов создания новых перспективных веществ, модификации поверхности и формы образцов как плазмохимическими, так и плазмодинамическими методами – вот далеко не полный перечень актуальных проблем, рассматривавшихся на конференции. Часть работ проделана в сотрудничестве с зарубежными коллективами. Уровень российских исследований в этих областях не уступает мировому, а заметная часть представленных работ находится на самых передовых рубежах исследований.

#### **Секция «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего»**

На секции «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего» (председатель секции А. В. Красильников) в этом году было представлено 34 доклада, из

них 10 были доложены на устном заседании, 24 – на стендовом.

Доклады устного заседания были посвящены состоянию работ по созданию систем международного проекта ИТЭР. Работа **Гиниятулина Р. Н. с соавторами** (НИИЭФА) посвящена вопросам разработки, изготовления, испытаний и поставки внутрикамерных компонентов установки реактора-токамака ИТЭР. В рамках российских международных обязательств необходимо разработать, изготовить, испытать и поставить на площадку ИТЭР (г. Кадараш, Франция) серию энергонапряженных внутрикамерных компонентов (ВКК), являющихся важными компонентами реактора-токамака. Предстоит поставить 58 центральных сборок дивертора (ЦСД), 179 панелей первой стенки (ППС), провести тепловые испытания 850 элементов дивертора. Отмечалось, что на базе АО «НИИЭФА» создан уникальный комплекс технологического и испытательного оборудования в совокупности с набором базовых технологий, позволяющих приступить к изготовлению полноразмерных прототипов компонентов реактора-токамака. Созданный технологический комплекс является частью производственного процесса изготовления требуемой масштабной серии элементов ЦСД и ППС. После завершения изготовления полноразмерных прототипов ЦСД и ППС в 2019 году последует фаза серийного изготовления, которая должна быть завершена к 2027 году.

В докладе **Васильева А. А. с соавторами** (ИЯФ СО РАН, НГУ, НГТУ) представлено исследование эрозии вольфрама при мощной импульсной тепловой нагрузке, создаваемой пучком электронов. Разрушение пластин первой стенки и элементов диверторной зоны токамака-реактора ИТЭР под воздействием выбросов плазмы является одной из главных проблем для будущих установок управляемого термоядерного синтеза. Поскольку существующие плазменные ловушки не могут воспроизвести предполагаемые условия воздействия плазмы на материал элементов реактора-токамака ИТЭР, то изучение поведения материала при импульсных тепловых нагрузках проводится на специализированных установках, в том числе и на новом испытательном стенде, разработанном в ИЯФ СО РАН. Стенд оснащен набором оптических диагностик, позволяющих исследовать эрозию материала мишени. Были получены экспериментальные результаты по образованию трещин в перегретых областях на поверхности материала, а также данные по движению расплава при нагрузке существенно выше порога плавления испытываемого материала. Исследована динамика плавления вольфрама на краях образовавшихся

трещин. Были измерены величины скоростей разлета микрочастиц на различных расстояниях от поверхности мишени, а также определен порог их интенсивной генерации.

В работе **Лелехова С. А.** (Проектный центр ИТЭР) было доложено о статусе сверхпроводящей электромагнитной системы ИТЭР – самой дорогостоящей системы реактора ИТЭР. Стоимость её вместе с системой криогенного обеспечения составляет около 70 % от полной стоимости установки реактора-токамака ИТЭР. Производство сверхпроводящих проводников и изготовление из них катушек электромагнитной системы является высокотехнологичным процессом, освоенным в России. К настоящему времени работа по изготовлению катушек электромагнитной системы установки ИТЭР вышла на завершающую стадию. В докладе была дана информация о состоянии дел с изготовлением электромагнитной системы ИТЭР на сегодняшний день.

В работе **Иванцовского М. В. с соавторами** представлена информация о состоянии работ в ИЯФ СО РАН, Проектном центре ИТЭР, НГТУ, СПбПУ, НГУ и Объединении «Энергопул» по проекту ИТЭР. Перечисленные организации активно участвуют в проекте ИТЭР с 2013 года, они выполняют разработку, макетирование и интеграцию элементов будущей установки. В настоящее время идет совместная работа по интеграции четырех диагностических портов: экваториального порта № 11 (поставляемого к первой плазме) и верхних портов № 02, № 07 и № 08. Также идет работа по двум российским диагностикам для ИТЭР: вертикальная нейтронная камера (ВНК) и диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП).

В докладе **Бестужева К. О. с соавторами** (НИИЭФА) рассказано о квалификационных испытаниях коммутационной аппаратуры для системы питания сверхпроводящих обмоток ИТЭР. В международном экспериментальном термоядерном реакторе ИТЭР требуется создание устройств прерывания больших постоянных токов как для стадии создания плазменного разряда в начале каждого рабочего цикла, так и для защиты сверхпроводящих обмоток в случае появления нормальной проводящей фазы в сверхпроводящих катушках. Для обеспечения этих функций в АО «НИИЭФА» разработаны два комплексных коммутационных устройства. Высокое напряжение, необходимое для пробоя газа и инициирования плазмы, будет обеспечиваться с помощью системы оперативной коммутации тока, а защита сверхпроводящих обмоток от разрушения будет осуществляться путём перевода тока в энергопоглощающий мощный резистор с помощью систе-

мы быстрого вывода энергии. Успешные результаты квалификационных испытаний подтвердили пригодность конструкции аппаратов и их соответствие требованиям технической спецификации установки, что позволило начать производство мелкосерийной партии для поставки в ИТЭР.

Разработанные в НИИЭФА для проекта ИТЭР аппараты можно разделить на две группы. Первая группа включает в себя три типа многоцветных устройств: размыкатели, замыкатели и разъединители, имеющие общее конструктивное исполнение и схожие характеристики. Эти аппараты предназначены для системы оперативной коммутации токов и напряжений в электрических системах установки ИТЭР. Вторая группа включает в себя приводимые в действие энергией детонации взрывчатого вещества размыкатель и замыкатель повышенной надежности, которые будут использоваться в качестве резервных защитных устройств. Все эти аппараты характеризуются чрезвычайно быстрым, для механических устройств, временем работы. Аппараты системы оперативной коммутации срабатывают за 2–4 мс, а резервные аппараты системы быстрого вывода энергии менее чем за 1 мс.

В докладе **Поддубного И. И. и соавторов** (НИКИЭТ) представлены конструкции, расчетное и экспериментальное обоснование работоспособности электрических соединителей модулей бланкета ИТЭР. Режим работы ИТЭР подразумевает появление нестационарных процессов длительностью от 36 до 300 мс, во время которых в модулях бланкета наводятся электрические токи до 225 кА, вызывающие появление знакопеременных электромагнитных сил в конструкциях бланкета. С целью обоснования работоспособности электрических соединителей (ЭС) были проведены расчеты нестационарных полей температур и напряженно-деформированного состояния с последующей оценкой статической и циклической прочности, в соответствии с нормами прочности ИТЭР SDC-IC. Одновременно было выполнено экспериментальное обоснование работоспособности конструкции ЭС, включающее циклические механические и электрические испытания.

Работа **Курскиева Г. С. с соавторами** (ФТИ РАН) посвящена разработке и созданию диагностики томсоновского рассеяния (ТР) излучения лазера на плазме в диверторе ИТЭР. Важной частью экспериментальной программы ИТЭР станет мониторинг плазменных параметров в диверторе. Это необходимо, главным образом, для контроля нагрузки на диверторные пластины и положения выхода сепаратриссы на диверторные пластины. Основной сложностью создания диагностики ТР в диверторе является ограниченный доступ к плазме и короткая по длительности работоспособность

оптических компонентов, расположенных в непосредственной близости от диверторной плазмы с высокой концентрацией продуктов эрозии первой стенки. В работе представлен отчет о подготовке предварительного проекта диагностики томсоновского рассеяния в диверторе токамака ИТЭР, сформулированы основные направления работ и приведен план дальнейшего развития диагностического комплекса.

В докладе **Ковалева А. О. с соавторами** (Проектный центр ИТЭР) описана синтетическая диагностика диверторного монитора нейтронного потока (ДМНП) токамака-реактора ИТЭР. Это симулятор, который разрабатывается для имитации поведения диагностического оборудования при нормальных и запроектных условиях эксплуатации, для валидации предполагаемых сценариев эксплуатации, для разработки процедур и инструкций управления, а также для тренировки будущих операторов. Представленный алгоритм позволяет рассчитать выходной сигнал диагностики ДМНП от объемного плазменного источника DD и/или DT нейтронов в режиме реального времени. Входными параметрами являются следующие динамические и статические данные: нейтронный профиль плазмы, геометрия магнитных поверхностей плазмы, результаты аналитической оценки и Монте-Карло моделирования плотности потока нейтронов и скорости реакции деления от кольцевых источников DD/DT нейтронов в делящемся веществе детекторов диагностики ДМНП.

В докладе **Семенова И. Б. с соавторами** (Проектный центр ИТЭР) дан обзор состояния дел на февраль 2017 года по системе управления верхнего уровня, а также по системам управления технологическими и диагностическими системами, за которые отвечает Российское национальное агентство ИТЭР. Система управления установкой ИТЭР — CODAC (Control, Data Acquisition and Communication) разделена на два уровня управления: на центральный супервайзер, за создание которого отвечает Международная Организация ИТЭР, и нижний локальный уровень управления, за который отвечают Национальные Агентства. Супервайзер включает в себя центральное ядро системы управления (CODAC Core System), систему ядерной безопасности, систему блокировок и защит, систему управления плазмой и центральное вычислительное ядро, обеспечивающее работу установки в реальном времени. На нижнем уровне находятся около 130 технологических и диагностических подсистем установки. CODAC использует систему SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) EPICS. Она построена на идеологии сервер-клиент, и, в настоящее время, базируется на компьютерных сетях с пропускной способностью 10–40 Гбит/сек. В докладе рассмотрены основные

проблемы, которые решались по мере создания систем управления в 2016 году. В частности, вопросы, связанные с радиационной стойкостью электронных компонент, а также ограничения, связанные с конечной пропускной способностью компьютерных сетей при организации передачи исходных экспериментальных данных (Raw Data).

В работе **Зими́на А. М. с соавторами** (МГТУ, НИЦ «Курчатовский институт») рассказано об атласе конструкций реактора ИТЭР. Атлас прошел апробацию при подготовке студентов кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н. Э. Баумана на территории ее филиала в НИЦ «Курчатовский институт», и рекомендован Международной организацией ИТЭР к использованию университетами и научными учреждениями Российской Федерации.

Работа секции «Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего» была успешной. Она показала существенный прогресс в научно-исследовательских и конструкторских работах, выполняемых по проекту ИТЭР в рамках ответственности по поставкам Российской Федерации.

### Заключение

В целом следует отметить, что XLIV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2017 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, национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Федеральное агентство научных организаций России, ЗАО Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН и Проектный центр ИТЭР ГК РОСАТОМ. Организаторами прошедшей XLIV 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. XLIV 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 СНГ. Она проходила уже в 44-й раз и собрала на

свои заседания более 800 участников из научных центров России и других стран. Число российских (72) и иностранных организаций (20), представивших доклады на конференцию, стабильно остается на высоком уровне.

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

3. Уровень экспериментальных работ, 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 приведет в самое ближайшее время к отставанию на десятилетия от мировой программы УТС.

4. Современный мировой уровень лазерно-плазменных исследований требует создания в разных научных центрах России по крайней мере двух конкурирующих мультипетаваттных лазерных систем по проблеме ЛТС и нескольких 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 центрах Европы, Японии и США. Это указывает на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых в области физики плазмы остаются высокими, и востребованы мировым научным сообществом.

7. На конференции было представлено 94 доклада, результаты которых получены в рамках действующих проектов РФФИ, что составляет 34 % от всех докладов, заслушанных на конференции. Проблематика этих проектов РФФИ соответствует перечню актуальных проблем, рассматривавшихся на конференции: магнитное удержание высокотемпературной плазмы – 27 докладов (41 %), инерциальный термоядерный синтез – 20 докладов (43 %), физические процессы в низкотемпературной плазме – 30 докладов (39 %), физические основы плазменных и лучевых технологий – 17 докладов (33 %).

8. Оргкомитетом конференции издана книга «XLIV Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» Сборник тезисов докладов. – М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. 342с. ISBN 978-5-9903264-7-7. Материалы конференции также размещены на сайте

конференции [http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIV/Zven\\_XLIV.html](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIV/Zven_XLIV.html).

*Работа выполнена в соответствии с государственными заданиями №№ 01200953485 (Исследование высокотемпературной плазмы), 01200953486 (Физические основы плазменных технологических процессов), 01200953487 (Плазмохимия термонеровесных и нестационарных плазменных объектов), 01200953488 (Динамика токнесущей плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях), 01200953489 (Мощные плазменные релятивистские источники СВЧ-излучения), а также по программе РАН 1.11П «Фундаментальные проблемы удержания и нагрева плазмы в магнитных ловушках» и в рамках реализации проекта РФФИ 17-02-20023 г.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. «XLIV Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу» 13–17 февраля 2017 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. – М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. – 342 с. ISBN 978-5-9903264-7-7.
2. [http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIV/Zven\\_XLIV.html](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIV/Zven_XLIV.html)

PACS: 52.55.-s, 52.25.-b

## Status of scientific researches in plasma physics and plasma technologies in Russia in 2016

*(Review of the reports of the XLIV International Zvenigorod Conference 2017)*

*I. A. Grishina<sup>1</sup>, V. A. Ivanov<sup>1,2</sup>, and L. M. Kovrizhnych<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
38 Vavilova str., Moscow, 199911, Russia  
E-mail: [ivanov@fpl.gpi.ru](mailto:ivanov@fpl.gpi.ru)

<sup>2</sup> National Research Nuclear University “MEPHI”  
37 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

*Received May 28, 2017*

*The review is given on the most interesting new results presented at the XLIV International Zvenigorod conference on plasma physics and controlled fusion which took place in Zvenigorod city of Moscow region on February 13–17, 2017. 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 XLIV International Zvenigorod Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion, Zvenigorod,

Moscow Region, Russia. February 13-17, 2017. ISBN 978-5-9903264-7-7 (Published by PLAZMAI OFAN Co Ltd. 2017) [in Russian].

2. [http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIV/Zven\\_XLIV.html](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIV/Zven_XLIV.html)