

УДК 533.9

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ И УТС В РОССИИ В 2018 ГОДУ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ

© 2019 г. И. А. Гришина^{a, *}, В. А. Иванов^{a, b}

^a Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

^b Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

*e-mail: grishina@fpl.gpi.ru

Поступила в редакцию 20.06.2019 г.

После доработки 25.06.2019 г.

Принята к публикации 25.06.2019 г.

Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на ежегодной XLVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Проведен анализ развития и представлены достижения по основным направлениям исследований в области физики плазмы в России и их сравнение с зарубежными работами.

DOI: 10.1134/S036729211911009X

XLVI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в г. Звенигороде с 18 по 22 марта 2019 г. Ее организаторами явились 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. На конференции было представлено 266 научных докладов из 68 российских и 13 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее число зарегистрированных авторов докладов составило более 800 человек.

Тематика охватывала пять важнейших направлений:

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.

Состоялись четыре пленарных заседания, на них заслушано 19 обзорных докладов по результатам отечественных и мировых исследований, в

частности, выполненных, за последний год, и по некоторым смежным с физикой плазмы проблемам. Перечисленным направлениям была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 67 устных и 180 стендовых докладов.

20.02.2019 года исполнилось бы 100 лет Матвею Самсоновичу Рабиновичу. Как отмечено в мемориальном докладе С.Е. Гребенщикова и В.А. Иванова (ИОФ РАН) на первом пленарном заседании, работы М.С. Рабиновича в областях физики ускорителей, физики плазмы, управляемого синтеза и сильноточной СВЧ-электроники значительно обогатили отечественную и мировую науку. Разработка основ теории ускорителей заряженных частиц по праву позволяет считать М.С. Рабиновича одним из создателей теории современных ускорителей. Он был инициатором и последовательным защитником стеллараторной программы в нашей стране. Под его руководством запущен ряд уникальных установок стеллараторного типа, на которых получены фундаментальные результаты по нагреву и удержанию горячей плазмы. М.С. Рабинович и Л.А. Арцимович являлись организаторами и руководителями Совета по физике плазмы АН СССР. Ежегодные Звенигородские конференции – детище Матвея Самсоновича. Он был первым главным редактором журнала “Физика плазмы”.

В выступлении В.П. Пастухова (НИЦ “Курчатовский институт”), посвященном 90-летию со дня рождения академика Б.Б. Кадомцева, гово-

рилось о его идеях, которые во многом определили пути развития физики горячей плазмы и УТС. Борис Борисович – автор ряда ключевых работ по физической кинетике плазмы, теории устойчивости и турбулентности плазмы в магнитном поле. Обладая исключительной широтой научных интересов, он внес также большой вклад в фундаментальные вопросы нелинейной динамики распределенных сред и квантовой механики.

В 2018 г. исполнилось бы 90 лет выдающемуся ученому в области физики плазмы, УТС и электрореактивных двигателей А.И. Морозову. А.Б. Кукушкин (НИЦКИ) напомнил слушателям, что Морозову принадлежат такие достижения в теории, как предсказание наличия макроскопического электрического поля в плазме даже при ее высокой электропроводности, волокнистые структуры в замкнутых магнитных системах (магнитные острова), особый класс траекторий заряженных частиц в тороидальном магнитном поле (“бананы”), основы плазмооптики. Мировую известность принесли ему и пионерские работы по созданию и внедрению в космическую технику стационарных плазменных двигателей.

В докладе В.Д. Левченко (Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН), посвященном 85-летию со дня рождения Ю.С. Сигова, одного из пионеров теории и практики вычислительного эксперимента в физике плазмы, отмечено, что он внес определяющий вклад в создание первой в мире объектно-ориентированной модели плазмы, которая позволяет моделировать сильно неравновесную плазму и плазмopodobные среды на больших временах и пространственных масштабах.

Обзор новых результатов термоядерных исследований, проведенных в европейских научных центрах сделал Дж. Онгена (Королевская военная академия Бельгии, Брюссель). На токамаке JET (Великобритания) идет подготовка к будущим экспериментам с тритиевой и дейтерий-тритиевой плазмой, в ходе которых планируется получить выделение 15 МВт термоядерной мощности в течение 5 секунд и продемонстрировать электронный нагрев центральной области плазмы альфа-частицами при выделяемой мощности до 3 МВт. В экспериментах будет опробован новый метод ионного циклотронного нагрева (ИЦН) плазмы, основанный на наличии в плазме трех различных разновидностей ионов. Метод является перспективным для оптимизации экспериментов с D-T плазмой, так как дает возможность ускорить ионы дейтерия и трития с помощью ИЦН до тех энергий, при которых сечение D-T термоядерной реакции имеет максимум.

А.В. Брантов (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН) дал обзор теории и численного моделирования лазерно-плазменного уско-

рения ионов из мишеней, облучаемых мощными фемтосекундными лазерами. Представленные результаты включали в себя оптимизацию ускорения ионов по толщине и по плотности мишени; зависимость энергии ускоренных протонов от энергии падающего лазерного импульса. Показано, что циркулярная поляризация является более выгодной с точки зрения ускорения ионов из тонких фольг или малоплотных мишеней. Приведены результаты оптимизационных расчетов по наработке изотопов технеция и углерода. Лазерная установка с частотой 10 кГц и энергией 10 Дж в каждом импульсе может генерировать нейтронный пучок с числом частиц порядка 10^{13} с^{-1} , что значительно превышает поток нейтронов из нейтронных трубок.

Л.Н. Химченко и А.В. Красильников (Проектный центр ИТЭР) осветили ход сооружения крупнейшего токамака ИТЭР, создаваемого международным сообществом в составе семи стран-участниц (Китай, Европейский союз, Индия, Япония, Корея, Россия и США). Представлено состояние работ по подготовке основных систем ИТЭР участниками проекта и управленческие решения, направленные на оптимизацию сборки токамака и соответствующее развитие его инфраструктуры. Проект “перевалил” 50% уровень объема работ по сооружению установки ИТЭР и созданию инфраструктуры. В соответствии с графиком сборки ИТЭР на площадки сборки систем токамака свозятся конструкции, которые изготовлены в каждой стране-участнице проекта в “натуральном” виде. В 2018 г. Россия полностью выполнила свои обязательства по созданию сверхпроводников для катушек тороидального и полоидального поля.

В докладе А.В. Красильникова и С.В. Коновалова (Проектный центр ИТЭР, НИЦКИ) обсуждались термоядерные технологии, которые будут использованы при эксплуатации ИТЭР и последующих более крупных установок. Первая стенка и дивертор ИТЭР изготавливаются из бериллия и вольфрама, соответственно. Однако в проектах дивертора “следующего шага” активно рассматриваются продвинутое магнитные топологии и жидкий литий. Более 30 методов и комплексов аппаратуры для диагностики плазмы создаются и будут применены и усовершенствованы в процессе исследований на ИТЭР. Многие из созданных методов, и особенно те, что продемонстрируют длительную работоспособность в условиях интенсивных радиационных потоков, будут в дальнейшем использованы на термоядерном реакторе. Это же в полной мере относится к роботизированным системам и системам управления плазменным разрядом (управление профилями параметров плазмы, система предотвращения срывов и другие) и дистанционного участия в экспериментах.

А.Д. Беклемишев с соавторами (Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН) рассмотрели состояние и перспективы экспериментов на линейных ловушках с точки зрения получения термоядерной плазмы. Возрождение в последнее время интереса к экспериментам на линейных ловушках связано с двумя факторами: успешным созданием и быстрым развитием экспериментальных установок серии С-2 (типа FRC) коммерческой компанией Три Альфа Энерджи в США, а также с достижением электронной температуры порядка одного кэВ в газодинамической ловушке ГДЛ в Новосибирске. На установке ГДЛ рекордной электронной температуры удалось достичь с помощью небольшого дополнительного приосевого электронного циклотронного резонансного нагрева. При этом область электронно-горячей плазмы составляла лишь около четверти сечения, и влияние этой зоны на быстрые ионы было невелико. Тем не менее, сам факт нагрева электронной компоненты имеет принципиальное значение для оценки перспектив ловушек типа ГДЛ.

В докладе В.М. Кулыгина и В.А. Жильцова (НИЦКИ) обсуждалось новое направление в разработке плазменных ракетных двигателей, основанное на результатах многолетних исследований по термоядерному синтезу и физике горячей плазмы и реализующее схему с магнитной изоляцией плазменного потока и безэлектродными высокочастотными методами введения энергии в плазму. Научные и технические разработки, а также развитие обеспечивающих технологий, стимулированные выполнением исследований горячей плазмы, сделали возможным начать работы по созданию мощных плазменных ракетных двигателей нового поколения, способных резко расширить возможности по освоению ресурсов космоса.

Большой интерес вызвал доклад Б.В. Кутеева (НИЦКИ), посвященный гибридным системам синтез-деление (ГССД). В настоящий момент часть гибридных систем, связанная с синтезом, приближается по параметрам к энергетическим. На сегодняшний день проектирование таких ГССД находится на уровне эскизного проектирования, которое позволило определить общие параметры ГССД и наметить программу необходимых НИОКР для технического проектирования и сооружения установок. Будущее развитие ГССД связано с оптимизацией процессов при генерации нейтронов синтеза и преобразовании ядерных нуклидов. Повышается интерес к бридингу в ГССД трития для запуска термоядерных электростанций, а также к трансмутации минорных актинидов и производству синтетического ядерного топлива для быстрых и тепловых реакторов. Современные прогнозы говорят о реализуемости промышленных ГССД к 2050 г.

Процессы ионизации, конденсации и излучения тропосферы рассмотрены в обзоре Б.М. Смирнова (ОИВТ РАН). Представлена единая физическая картина атмосферных процессов, где ионизация, перенос, эволюция аэрозолей и парниковый эффект взаимно связаны. Ионизация в атмосфере создается космическими частицами как солнечного, так и внегалактического происхождения. Ионы являются ядрами конденсации атмосферного водяного пара, при наличии которых устанавливается равновесие между локальным количеством атмосферной воды в конденсированном состоянии и в форме свободных молекул. Образующиеся аэрозоли могут находиться в жидком, твердом (льдинки), твердом аморфном (снегообразном), а также в смешанном твердом состоянии. Столкновение аэрозолей в разных фазовых состояниях определяет последующую зарядку облаков, что создает электрический потенциал облаков, а также зарядку посредством молний, причем разрядка Земли происходит под действием молекулярных ионов, образуемых в результате ионизации атмосферы космическими лучами.

И.А. Косый с соавторами (ИОФ РАН, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН) изучили в эксперименте нелинейную стадию ионизационно-перегревной неустойчивости с образованием нитей в фотоплазме самоподдерживающегося несамостоятельного СВЧ-разряда в метане и в воздухе, завершающуюся взрывным процессом роста температуры электронов, температуры газа и плотности плазмы в плазменных нитях, в результате которой возникает полная диссоциация молекул в таких нитях и быстрый газодинамический разлет плазмы и горячего газа из них. Эти процессы приводят к быстрому охлаждению продуктов разлета за головной частью разряда, т.е. возникновению эффективного процесса образования и “заковки” новых соединений, полученных в результате их синтеза в плазменных нитях.

Промышленным и биомедицинским приложениям взаимодействия плазмы атмосферного давления с поверхностями посвящен пленарный доклад Н.Ю. Бабаевой (ОИВТ РАН). Использование плазмы атмосферного давления (диэлектрических барьерных разрядов или плазменных струй) в промышленных или биомедицинских приложениях связано с наработкой и диффузией активных частиц к обрабатываемым поверхностям. Эти поверхности могут обладать сложной формой и иметь множество глубоких каналов или трещин, которые затрудняют деактивацию бактерий или вирусов. Плазма обладает способностью конформно распространяться вдоль таких поверхностей. Показано, что плазменные стримеры в диэлектрическом барьерном разряде способны равномерно покрывать и обрабатывать поверх-

ность, а также проникать в глубокие трещины и каналы.

Последние достижения в области физики лазерной абляции отражены в обзоре Н.А. Иногамова (Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН). Описаны сложные способы доставки лазерной энергии на поверхность мишени и проанализированы пространственные распределения интенсивности вдоль поверхности мишени и влияние этих распределений на динамику абляции. Также рассмотрено воздействие лазерного импульса на металлическую мишень через прозрачную жидкость, начиная от поглощения импульса, распространения тепловых волн в мишени и в жидкости и динамике, связанной с полями напряжений. Далее происходит расширение и охлаждение материала мишени до пересыщенного пара, конденсация пара, а также диффузия жидкости и пара и развитие гидродинамической неустойчивости Рэлея–Тейлора. На последних стадиях процесса воздействия лазерного импульса давление в жидкости падает ниже критического давления для жидкости и начинается развитие пузырька, заполненного паром из жидкости.

Д. Маргароне (ELI-Beamlines, Institute of Physics, Прага, Чехия) рассказал об экспериментах по ускорению ионов на международной установке ELI в Чешской Республике, применению пучков ионов в научных и прикладных целях. Европейский проект Extreme Light Infrastructure (ELI) посвящен исследованию взаимодействия с веществом коротких лазерных импульсах с релятивистской интенсивностью. В Праге в 2015 г. введена в строй мощная лазерная установка (длительность лазерного импульса 10–15 фс, мощность 10 ПВт). На ней установлена пользовательская линия ионного ускорения ELIMAIA (ELI Multidisciplinary Applications of Laser-Ion Acceleration). Задача ELIMAIA состоит в том, чтобы обеспечить стабильные, полностью характеризующиеся и перестраиваемые пучки ионов, ускоряемых лазерами с длительностью импульса 10–15 фс и мощностью 10 ПВт, и использовать эти пучки в медицинских, радиобиологических и научных исследованиях, проводить доклинические исследования в области адронотерапии и лечения рака.

В.Т. Тихончук (CELIA, Université de Bordeaux, Франция; ELI-Beamlines, Institute of Physics, Прага, Чехия) сделал обзор наиболее значимых результатов исследований в области лазерного термоядерного синтеза. Исследования ведутся в двух направлениях: прямого и непрямого сжатия мишени. Эксперименты по непрямого сжатия, направленные на зажигание термоядерной мишени, проводятся в Ливерморской лаборатории США на крупнейшем в мире лазере NIF с энергией 1.8 МДж в 192 пучках. Непрямое облучение ла-

зерно-индуцированным рентгеновским излучением является более энергетически затратным по сравнению с прямым облучением лазерными пучками, поскольку конверсия в рентгеновское излучение сопряжена с потерей значительной части лазерной энергии. Однако не прямое облучение рентгеновским излучением, заполняющим конвертор, позволяет обеспечить более однородный нагрев и более устойчивое сжатие мишени, чем при прямом облучении конечным числом лазерных пучков. Международная программа по прямому сжатию 2020 развивается на установке OMEGA в Рочестерском университете США в сотрудничестве с европейскими учеными. В последних экспериментах на этой установке с энергией лазера 30 кДж при сжатии сферической мишени в виде двухслойной оболочки удалось увеличить выход нейтронов в D-T реакции с 3×10^{13} до 1.6×10^{14} нейтронов за импульс.

М.В. Стародубцев (Институт прикладной физики РАН) рассказал об экспериментальных исследованиях в области лабораторной астрофизики с использованием мощных лазеров при сотрудничестве ИПФ РАН, LULI Ecole Polytechnique (Франция), ОИВТ РАН, Парижской обсерватории и Института астрономии РАН. В настоящее время лазер PEARL (ИПФ РАН) является самым мощным из работающих в России лазеров. Он может работать как в импульсном режиме (длительность импульса 1 нс, энергия в импульсе 300 Дж), так и в импульсном режиме с петаваттной мощностью (длительность импульса 50 фс, энергия в импульсе 30 Дж). В серии экспериментов по лабораторному моделированию процессов взаимодействия высокоскоростных потоков горячей плотной лазерной плазмы с внешними магнитными полями изучались физические процессы в пограничном слое между движущейся плазмой и магнитным полем, что является ключевым фактором в физических моделях внутреннего края аккреционных дисков, аккреционных колонок, астрофизических джетов и пр.

Достижениям в области плазменных нанотехнологий с атомными масштабами точности был посвящен доклад К.В. Руденко и В.Ф. Лукичева (Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН). Низкотемпературная химически активная плазма уже около 50 лет является одним из основных инструментов создания приборных интегральных схем. В современной микроэлектронике минимальные топологические размеры достигли величины 7–10 нм, а толщина ряда функциональных слоев, составляющих прибор, еще меньше — до 2–3 нм. Таким образом, линейные размеры областей полупроводниковых приборов составляют 15–50 постоянных кристаллической решетки. Поэтому технологии, обеспечивающие как осаждение, так и структурирование слоев с точностью в один атомный монослой весьма вос-

требованы. В докладе обсуждались прецизионные процессы атомно-слоевого осаждения и атомно-слоевого травления функциональных пленок нанoeлектронных приборов и были продемонстрированы возможные применения этих процессов, способные значительно улучшить характеристики приборов нанoeлектроники, а также создать перспективные приборы на 2D-материалах.

На секции “Магнитное удержание высокотемпературной плазмы” (председатель секции А.И. Мещеряков) обсуждались 62 доклада (15 устных и 47 стендовых), выполненных сотрудниками 20 российских научных центров, 3 работы подготовлены сотрудниками научных центров Белоруссии и Казахстана.

Тематика связана, прежде всего, с экспериментами, проводимыми на действующих установках с магнитным удержанием плазмы, таких как токамак Глобус-М2, ТУМАН-3М, Т-11М, стелларатор Л-2М, открытые ловушки ГДЛ, ГОЛ-3, а также с совершенствованием применяемых на этих установках диагностик и методов обработки экспериментальных данных. Эти работы направлены, в конечном счете, на решение проблемы создания управляемого термоядерного реактора на основе таких ловушек. В большинстве современных токамаков происходит переход в Н-режим, то есть в режим улучшенного удержания, который предполагается и в строящемся экспериментальном реакторе ИТЕР. Поэтому исследования транспортных переходов в современных установках по-прежнему актуальны. В докладе С.В. Неудачина “Триггеры нелокальных процессов формирования транспортных барьеров в разных режимах генерации тока ЭЦ-волнами в токамаке Т-10” представлен анализ L-H переходов, наблюдавшихся на токамаке Т-10, которые можно назвать полуглобальными. В экспериментальных условиях с внутренним транспортным барьером (ВТБ-событиях) в плазме токамака Т-10 спад потоков тепла и частиц происходит в зоне шириной 30–50% от радиуса. В экспериментах было обнаружено, что переходы происходят через 5 и 15 мс после начала напуска неона.

В рамках исследований, проводимых на открытых ловушках, продолжают развиваться два направления: поиск режимов удержания плазмы с высоким давлением в линейной осесимметричной ловушке и исследование винтового удержания плазмы в открытой ловушке. В докладе С.Е. Константинова “Вихревое удержание плазмы с высоким давлением в открытой ловушке” анализ эффектов сдвигового вращения продлан для плазмы с $\beta \sim 1$. Ранее моделирование вихревого удержания проводилось с плоским профилем плотности и неоднородной температурой. В данной работе модель расширена на случай неоднородной

плотности и большого давления, причем появляется возможность описания не только желобковой неустойчивости, но также и центробежной неустойчивости. Ф.В. Судниковым (“Эксперименты по удержанию плазмы винтовой пробкой в линейной магнитной ловушке”) приведены результаты экспериментов на вновь созданной ловушке – установке СМОЛА. Основной частью установки является уединенная винтовая пробка длиной 216 см, содержащая 12 периодов винтового поля. Соотношение винтовой и продольной компонент магнитного поля в винтовой секции может быть произвольно изменено. Вращение плазмы задается контролируемым профилем радиального электрического поля. Эксперименты показали, что эффект винтового удержания плазмы существует, то есть наблюдается существенное и воспроизводимое подавление потока плазмы в режиме удержания, при этом эффективность подавления растет с повышением среднего пробочного отношения.

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

Продолжает развиваться тематика моделирования работы термоядерного источника нейтронов (ТИН) и его применения в гибридных реакторах. С.В. Мирнов дал анализ концепции гибридного энергетического реактора на основе ТИН с бланкетом на отвальном уране. Поскольку в настоящее время на АЭС используется уран U^{235} , обогащенный до 4.5%, то более 90% добываемого природного урана идет в отвал. В мире накопилось более 1500000 тонн “отвального” U^{238} (с обогащением 0.2–0.3%), и он будет накапливаться далее по мере развития атомной энергетики на медленных нейтронах. В качестве базового ТИН, способного создавать мощные потоки термоядерных нейтронов, был выбран токамак-реактор (физический аналог с параметрами ИТЭР), снабженный бланкетом с отвальным ураном.

По результатам секции можно сделать вывод, что уровень экспериментальных работ, выполня-

емых на российских термоядерных установках, заметно отстает от таких стран, как США, Япония, Южная Корея, Китай, и стран Евросоюза. Это связано с устаревшей технической базой, прежде всего отсутствием новых экспериментальных установок, и низким уровнем текущего финансирования термоядерных исследований. В 2018 г. были остановлены эксперименты на токамаке Т-10, проводившиеся с 1975 г. В настоящее время ведутся работы по созданию нового токамака Т-15 МД, который должен вступить в строй в 2020 г.

В секции “Инерциальный термоядерный синтез” (председатель Г.А. Вергунова) было представлено 12 устных и 23 стендовых доклада. Можно перечислить несколько направлений исследований по ИТС и смежным проблемам, на которых сосредоточены усилия российских научных коллективов, задействованных в данной сфере.

В устных и стендовых докладах обсуждались результаты экспериментальных и теоретических исследований, проводимыми российскими учеными в области взаимодействия лазерного излучения с веществом, лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) и электровзрывных импульсных систем, физики высоких плотностей энергии и численного моделирования в указанных областях.

В области ЛТС продолжают эксперименты по зажиганию на установке NIF (Ливерморская лаборатория США) с энергией 1.8 МДж в 192 пучках. Получен выход термоядерной энергии, превышающий энергию, вложенную в горючее. В настоящее время исследования направлены на повышение эффективности вклада энергии в мишень с целью примерно 15-ти кратного увеличения выделяющейся энергии по отношению к энергии лазера, чтобы достичь зажигания. Активно развиваются исследования в направлении перспективных методов зажигания – быстрого зажигания (fast ignition) и зажигания сфокусированной ударной волной (shock ignition).

В расчетно-теоретических работах ученых ФИАН и ИПМ РАН изучены важные аспекты сжатия и горения мишеней ЛТС при различных схемах зажигания. Исследовано влияние генерации быстрых электронов на сжатие мишени искрового зажигания. Обоснована возможность обеспечить зажигание несимметрично сжатых мишеней при дополнительном быстром нагреве пучком лазерно-ускоренных быстрых электронов.

Совершенствуются технологии мишеней ЛТС (ФИАН). Определены условия получения смесей для создания твердого изотропного криогенного слоя мишеней для ЛТС. Проводятся исследования, направленные на получение новых типов низкоплотных (0.9 – 0.2 от плотности сплошного

вещества, как пластика, так и металла) полимерных сред и изучение их пористой структуры.

Продолжаются работы по источникам пучков заряженных частиц и вторичного импульсного рентгеновского и нейтронного излучения при помощи интенсивных ультракоротких лазерных импульсов. Подобные источники имеют очень широкий спектр применения.

В ИПФ РАН прорабатывается проект использования петоваттного импульса лазерного излучения для создания сверхярких лазерных источников нейтронов с целью изучения взаимодействия нейтронов с плотной горячей плазмой. Такая постановка эксперимента тесно связана с задачами нуклеосинтеза тяжелых элементов в плазме и лабораторной астрофизикой.

Экспериментальные и расчетные работы по Z-пинчам направлены на увеличение выхода нейтронов, мягкого рентгеновского излучения, развитие физических моделей и расширение диагностики.

Рассматриваются различные схемы создания импульсных источников нейтронов, пути увеличения нейтронного выхода разработанных систем. Во ВНИИЭФ (г. Саров) на основе сферической газоразрядной камеры с плазменным фокусом создан источник нейтронного излучения с длительностью на полувывоте 75–80 нс и интегральным выходом 10^{13} DT-нейтронов.

Представлены первые экспериментальные результаты по безнейтронному инициированию ядерной реакции протон – бор в поле виртуального катода, и проведено моделирование всех сопутствующих процессов в рамках полного электродинамического кода КАРАТ.

Следует отметить как позитивную тенденцию увеличение числа исследований, выполненных в сотрудничестве с зарубежными коллективами. Практически все доклады относились к поисковым направлениям, нацеленным на решение актуальных проблем физики лазер-плазменного взаимодействия, лазерной и электроразрядной плазмы. Налаженная кооперация и широкая экспериментально-диагностическая база способствуют стабильному развитию исследований, проводимых на электроразрядных установках в различном диапазоне мощности. Вместе с тем следует отметить, что наиболее крупная установка в области инерциального термоядерного синтеза с использованием излучения мощных Z-пинчей – в лаборатории Сандия (США) – значительно превосходит по энергетике крупнейшую отечественную установку “Ангара-5”. Для того чтобы успешно продолжать исследования в этой области в России, должна быть построена установка с энергией, по крайней мере, в 5–10 раз превосходящей энергию “Ангара-5”.

Благодаря сохранению научных школ и традиций в области физики плазмы, теоретические работы российских ученых высоко оцениваются в мире. Предложенные ими перспективные методы быстрого зажигания и зажигания сфокусированной ударной волной мишеней ЛТС успешно исследуются в США, Японии, странах Евросоюза. Но в России до сих пор нет установок, на которых можно было бы проводить эксперименты по ЛТС, реализовывать новые идеи и экспериментальные схемы, а также проводить отработку новых диагностик. Как результат, на секции было мало докладов, связанных непосредственно с экспериментами по ЛТС, в основном присутствовали расчетно-теоретические работы. В связи с этим важнейшей задачей остается реализация российского проекта строительства мегаджовульного лазера для исследований по ЛТС, направленных на зажигание.

Секция “Физические процессы в низкотемпературной плазме” (председатель В.С. Воробьев) включала 23 устных доклада и 54 стендовых. Две работы выполнены в сотрудничестве с научными центрами Канады и Франции.

Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям: термодинамические и транспортные свойства так называемой теплой плотной материи (warm dense matter); элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы; различные применения низкотемпературной плазмы; плазма, возникающая в импульсных процессах; физика атмосферных процессов; промышленные и биомедицинские приложения низкотемпературной плазмы. Многие работы связаны с технологическими применениями.

Отметим лабораторное моделирование процессов, происходящих в магнитосфере. В частности, исследовалась структура лабораторных токовых слоев. Показано, что существует фундаментальное сходство между токовыми слоями в хвостовой области земной магнитосферы и в лабораторной плазме. Результаты этих исследований позволяют интерпретировать целый ряд спутниковых наблюдений в хвостовой части магнитосферы.

Выделим также работу по определению факторов риска здоровью при технологическом применении низкотемпературной плазмы. Неблагоприятными факторами при использовании таких технологий являются интенсивный шум и токсичные пылегазовые смеси, включающие озон (от 0.8 до 7 ПДК), окислы азота (от 0.3 до 2 ПДК) и высокодисперсные аэрозоли (размер частиц до 1 мкм), состоящие из расплавленных частиц исходных порошков и конденсата паров металлов и их соединений.

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

Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России. Особенно необходимо отметить новое направление, связанное с изучением своеобразного плазменного объекта – так называемой ультрахолодной плазмы, которая возникает при фотоионизации атомов, охлаждаемых лазером. Это направление интенсивно развивается в ведущих мировых исследовательских центрах, и работы российских ученых играют заметную роль. Еще одно перспективное направление связано с применением спектральных методов диагностики разрядов.

В целом, в ряде новых направлений, таких как ультрахолодная плазма, состояния вещества типа “warm dense matter”, свойства низкотемпературной плазмы при пробое газов и конденсированных сред, исследования в России развиваются успешно и не уступают мировому уровню.

На секции “Физические основы плазменных и лучевых технологий” (председатели секции А.Ф. Александров и С.А. Двинин) с 12 устными и 34 стендовыми докладами обсуждались результаты работ, проводимых в институтах РАН, вузах СНГ и других ведущих научных центрах России. Часть докладов была представлена международными авторскими коллективами, в состав которых входили ученые из Франции (CNRS, Ecole Polytechnique, Sorbonne university, University of Pierre and Mary Curie), США (Princeton university), Таджикистана и Беларуси.

В широком спектре тем следует выделить несколько наиболее важных направлений: создание технологий для новых материалов электроники (в том числе пленок), изучение физических процессов в разрядах для технологии обработки поверхности (включая микроэлектронику), исследования взаимодействия плазмы и ускоренных пучков частиц с поверхностью, процессов в ускорителях электронов и ионов, плазмохимических процессов (включая горение и очистку воды) и экспериментальное исследование процессов в атмосферных разрядах. Отметим серию докладов,

посвященных технологиям генерации СВЧ с помощью электронных пучков в плазменных волноводах и теоретическому исследованию поведения электромагнитных полей в плазме. По сравнению с 2017 годом значительно увеличилась доля экспериментальных докладов.

Одна из работ касалась применения плазменных электрических реактивных двигателей для обеспечения компенсации аэродинамического сопротивления при движении мини-спутников в ионосфере. Изучалась возможность замены привозимого на борт рабочего тела, на котором работают двигатели, на газы верхней атмосферы. Среди экспериментальных работ по созданию новых материалов наибольший интерес вызвала работа, в которой для синтеза углеродных наноматериалов применена плазменная струя мощного плазмотрона, что позволяет управлять производительностью синтеза и получать порошки с заданными составом, формой и размером наночастиц.

В области плазменных и пучковых технологий число работ, которые можно характеризовать как НИОКРовские, растет. Заметно стремление авторов к улучшению эффективности установок. Состав и тематика исследований показывают, что модернизация установок и развитие новых диагностических методов сдерживаются ухудшением государственного финансирования. Сокращение количества докладов из крупных периферийных городов России указывает на то, что местная промышленность сокращает финансирование прикладных научных исследований и поддержку местных научных кадров.

На секцию “Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего” в этом году был представлен 51 доклад; из них 8 были доложены на устном заседании, 43 – на стендовом.

Доклады устного заседания были посвящены состоянию работ по созданию систем ИТЭР. В соответствии с графиком сборки ИТЭР на площадке сборки систем токамака свозятся конструкции, которые изготовлены в отдельных странах-участницах проекта. В 2018 г. Россия полностью выполнила свои обязательства по созданию сверхпроводников для катушек тороидального и полоидального поля. Начались испытания катушек тороидального поля – т.н. “Cold test”. В самом объемном здании ИТЭР собираются катушки полоидального поля, которые также должны пройти испытания при захолаживании. В Европе и Корее изготавливается вакуумная камера токамака. В США завершается намотка центрального соленоида. Китай начал испытания созданных криофидеров, подводящих электроэнергию непосредственно к токамаку. Проводится сборка криостата.

В настоящий момент в рамках обязательств перед международной организацией ИТЭР в рос-

сийском домашнем агентстве разрабатывается диагностическая система Вертикальная Нейтронная Камера (ВНК). Данная система построена на основе многоканальных нейтронных коллиматоров и предназначена для измерения профиля нейтронного источника и профиля термоядерной мощности в реальном времени.

В рамках российского вклада в проект ИТЭР учреждение “Проектный центр ИТЭР” разрабатывает диагностическую систему Диверторный Монитор Нейтронного Потока (ДМНП). Данная система предназначена для измерения динамики полного нейтронного выхода и термоядерной мощности в токамаке-реакторе ИТЭР.

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

Важной частью экспериментальной программы ИТЭР станет мониторинг электронных параметров в диверторе. Знание электронной температуры и плотности необходимо как для изучения плазмы в диверторном объеме, так и для контроля нагрузки на диверторные пластины и контроля положения выхода сепаратриссы на диверторные пластины. Разработка диагностического комплекса томсоновского рассеяния дивертора токамака ИТЭР также находится в рамках ответственности России.

Одной из нерешенных задач проекта ИТЭР является проблема эрозии первой стенки и дивертора при взаимодействии с плазмой. По сравнению с существующими установками для магнитного удержания плазмы, токамак ИТЭР будет иметь большую длительность разряда (до 400 секунд) и большой поток тепла на компоненты вакуумной камеры, обращенные к плазме. Более того, во время экспериментальной кампании ИТЭР не могут быть исключены мощные импульсные воздействия на поверхность дивертора. В этих случаях эрозия материала значительно увеличится, на поверхности будет появляться расплавленный слой, из которого возможен выброс микрочастиц. Микрочастицы могут проникнуть в центр плазмы и вызвать значительный рост ради-

ационных потерь, что, в свою очередь, может привести к проблемам с удержанием плазмы. Кроме этого, накопление большого количества микрочастиц в вакуумной камере приведет к накоплению трития, количество которого ограничено требованиями радиационной безопасности.

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

В целом, XLVI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 2019 года стала событием, оказавшим заметное влияние на развитие научных исследований и их координацию в ведущих научных центрах России и за рубежом. Ежегодно происходящий обмен информацией и опытом между учеными России, стран дальнего и ближнего зарубежья способствует установлению и поддержанию научных контактов между научными центрами, занимающимися близкими проблемами. Это подтверждается работами, совместно выполненными сотрудниками российских и зарубежных научных центров.

Финансовую поддержку конференции оказали Российский фонд фундаментальных исследо-

ваний, ЗАО Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН и Проектный центр ИТЭР ГК РОСАТОМ.

Оргкомитетом издан сборник тезисов докладов [1]. Материалы конференции также размещены на сайте http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVI/Zven_XLVI.html.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. XLVI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу” 18–22 марта 2019 г., г. Звенигород // Сборник тезисов докладов. М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН, 2019. ISBN 978-5-6042115-0-2.