

УДК 533.9

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ В РОССИИ (ПО МАТЕРИАЛАМ XLVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ (ЗВЕНИГОРОДСКОЙ) КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ И УТС, МАРТ 2020 г.)

© 2022 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 25.06.2021 г.

После доработки 20.07.2021 г.

Принята к публикации 20.07.2021 г.

Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на ежегодной XLVIII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся с 15 по 19 марта 2021 года в режиме онлайн. 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, плазменные и лучевые технологии, международный проект ИТЭР, конференция, результаты

DOI: 10.31857/S0367292122010073

ВВЕДЕНИЕ

XLVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в режиме онлайн с 15 по 19 марта 2021 года.

На конференции был представлен 201 научный доклад из 56 российских и 11 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее количество зарегистрированных авторов докладов составило более 650 человек.

На конференции были представлены 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 пять пленарных заседаний, на которых было заслушано 16 обзорных докладов о результатах отечественных и мировых исследований по актуальным направле-

ниям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям, и по международному проекту ИТЭР (ITER – International Toroidal Experimental Reactor). Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 185 устных докладов. В связи с пандемией COVID-19 конференция проходила дистанционно, и все доклады представлялись устно.

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

В обзорных докладах, которые были представлены на пленарных заседаниях конференции, подводились итоги фундаментальных и прикладных исследований, выполненных за последний год в области физики высокотемпературной плазмы, управляемого термоядерного синтеза, низкотемпературной плазмы, физических основ плазменных и лучевых технологий, а также докладывались результаты работ, выполненных российскими участниками международного проекта ИТЭР. Были также представлены доклады по смежным с физикой плазмы научно-техническим проблемам.

29 ноября 2020 года скоропостижно ушел из жизни выдающийся физик академик Владимир Евгеньевич Фортов (1946–2020). Участники конференции почтили его память. Доклад, посвя-

щенный памяти В.Е. Фортова, сделал академик Э.Е. Сон (ОИВТ РАН). Владимир Евгеньевич занимался очень интересной областью теплофизики – экстремальными состояниями вещества и физикой мощных ударных волн и получил в ней выдающиеся результаты. Он прошел путь от заведующего отделом Института высоких температур АН СССР до директора ОИВТ РАН (2007–2018) и Президента Российской академии наук (2013–2018). Успешной была работа В.Е. Фортова в проекте “ВЕГА” по изучению кометы Галлея, когда под его руководством была спроектирована система защиты космического аппарата от высокоскоростных ударов метеоритов. В 1992 г. им был создан Научно-исследовательский центр теплофизики импульсных воздействий (НИЦТИВ ИВТ АН СССР), специализирующийся на исследованиях концентрированных потоков энергии, на разработке ускорителей типа рельсотронов, на решении уравнений состояния плотной плазмы, и физике гиперсверхзвуковых ударов и взрывов. Выдающийся вклад академика В.Е. Фортова в развитие фундаментальной и прикладной науки, способствовавший росту научного и оборонного потенциала страны, высоко оценен нашим государством и научной общественностью.

23 ноября 2020 на 78-м году жизни скоропостижно ушел из жизни замечательный физик и человек, заведующий кафедрой физики плазмы НИЯУ МИФИ профессор Валерий Александрович Курнаев (1942–2020). Доклад, посвященный памяти В.А. Курнаева, был сделан Ю.М. Гаспаряном (НИЯУ МИФИ). Отмечалось, что в течение всей своей научной карьеры Валерий Александрович активно занимался проблемой управляемого термоядерного синтеза. Его первые работы по рассеянию легких ионов в металлах, включая уникальные эксперименты по взаимодействию ионов с шероховатыми поверхностями, носили пионерный характер. Позже Валерий Александрович со свойственным ему энтузиазмом руководил работами по взаимодействию плазмы со стенкой в термоядерных установках, диагностике плазмы и плазменным технологиям, получившими международное признание. Помимо своей научной уникальности, эти работы стали мощным инструментом вовлечения в научное творчество студентов и молодых ученых, которые сейчас активно и успешно работают во всех ведущих термоядерных центрах России и по всему миру.

Участники конференции также почтили память профессора Вячеслава Сергеевича Стрелкова (1933–2020), который скончался 19 июля 2020 г. В докладе Б.В. Кутеева (НИЦ Курчатовский институт) отмечалось, что научная деятельность В.С. Стрелкова связана с пионерными экспериментами на токамаках: ТМП, Т-1, Т-2. Он принадлежал к числу ближайших учеников и сорат-

ников академика Л.А. Арцимовича, который многие годы руководил термоядерными исследованиями в СССР. Впервые в мире В.С. Стрелков провел эксперимент по наблюдению образования в токамаке пучка ускоренных электронов и провел первые измерения рентгеновского излучения, первым экспериментально исследовал равновесие замагниченной тороидальной плазмы. С его участием был проведен эпохальный советско-британский эксперимент по лазерному зондированию плазмы, подтвердивший впервые в мире получение в токамаке горячей плазмы с температурой электронов 400–600 эВ. Это достижение способствовало международному признанию российской установки токамак как перспективной для создания и удержания термоядерной плазмы. Под руководством В.С. Стрелкова были построены токамаки Т-3, Т-4, Т-10 и Т-15 – первая в мире установка с магнитной системой токамака на основе сверхпроводящего сплава никеля и олова. Светлая память о Вячеславе Сергеевиче Стрелкове навсегда сохранится в наших сердцах.

Вопросам проектирования в России токамака с реакторными технологиями (TRT) был посвящен доклад коллектива авторов из Проектного центра ИТЭР, НИЦ Курчатовский институт, НИИЭФА и ТРИНИТИ. Представил доклад А.В. Красильников (Проектный центр ИТЭР). В докладе отмечалось, что технологической основой создания токамака TRT является впечатляющий прогресс в развитии высокотемпературных сверхпроводников REBCO, произошедший в последние годы. Токамак TRT разрабатывается как полномасштабный прототип будущего чисто термоядерного реактора, а также термоядерного источника нейтронов для гибридного реактора, в котором будет реализован процесс синтез-деления. Целью создания TRT являются разработка и интегрирование в одной установке ключевых технологий термоядерного реактора. Высокое магнитное поле ($B_0 = 8T$) обеспечит интенсивное течение термоядерных реакций в удерживаемой в токамаке TRT плазме с выделением удвоенной энергии в нейтронном потоке по сравнению с вложенной в плазму энергией ($Q > 2$). Компактные размеры реактора TRT (большой радиус тора $R = 2.15$ м, малый радиус $a = 0.57$ м) существенно снижают его стоимость и, соответственно, эксплуатационные расходы. Предполагается, что TRT будет работать в квазистационарных режимах (длительности импульса около 100 секунд) с водородной, гелиевой и дейтериевой плазмой при плотностях $n_e = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и с короткими ($t < 10$ с) разрядами с дейтерий-тритиевой плазмой при $Q > 2$.

Известные и малоизвестные факты, касающиеся природы возникновения и развития крупно-

масштабных срывов в токамаках, были представлены в пленарном докладе С.В. Мирнова (ТРИНИТИ). Предмет обсуждения был ограничен, в основном, срывами в классических токамаках круглого сечения. Отмечалось, что крупномасштабные срывы являются серьезным препятствием на пути создания токамака-реактора. Автор подчеркнул, что причиной их возникновения является резонансное взаимодействие магнитно-гидродинамических (МГД) мод, характеризующих внешнюю (внешняя идеальная винтовая мода) и внутреннюю (внутренняя идеальная винтовая неустойчивость и другие моды, связанные с давлением плазмы) МГД-активности плазменного шнура токамака. К настоящему времени в исследованиях на токамаках накоплен большой опыт предотвращения возникновения больших срывов. В обзоре были упомянуты такие методы, как охлаждение границы плазмы при инъекции различных видов вещества, создание дополнительного угла вращательного преобразования магнитных силовых линий в системе токамака с помощью дополнительных внешних катушек (аналогично структуре магнитного поля стеллараторов), а также другие методы, которые могут предотвратить возникновение резонанса внешней и внутренней МГД-активности плазменного шнура в токамаках.

Обзор новых результатов термоядерных исследований, проведенных в европейских научных центрах был дан в докладе Дж. Онгена (Королевская военная академия Бельгии, Брюссель). На токамаке JET (Великобритания) идет подготовка к эксперименту с тритиевой и дейтерий-тритиевой плазмой, запланированному на 2021 год. В ходе этих экспериментов планируется получить выход мощности потока термоядерных нейтронов на уровне 15 МВт при длительности импульса до 5 сек. Важным элементом подготовки этих экспериментов является исследование изотопных эффектов и разработка высокопроизводительных сценариев работы JET в дейтериевой (DD), а затем и тритиевой (ТТ) плазме (начало в 2021 г.). В 2020 г. в серии экспериментов с дейтериевой плазмой был достигнут пиковый выход нейтронов на уровне $4.8 \times 10^{16} \text{ c}^{-1}$ для сценария "hybrid". Кроме того, проводилось тестирование процедуры обеспечения безопасной циркуляции трития в будущих экспериментах. Доклад завершился кратким обзором текущего состояния исследований и подготовки к будущим исследованиям на токамаке JT-60SA (Япония и Евросоюз) и стеллараторе Wendelstein 7-X (ФРГ и Евросоюз).

В Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера совместно с фирмой Tri Alpha Energy Technologies (USA) разработан специализированный источник нейтронов, который необходим для клинических испытаний бор-нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей. Этой теме был посвя-

щен доклад А.А. Иванова (ИЯФ СО РАН). Принцип действия этого источника нейтронов состоит в следующем. Для проведения терапии больному вводится препарат, содержащий изотоп бор-10. В результате происходит накопление бора преимущественно в клетках злокачественной опухоли, после чего пациент проходит сеанс облучения эпитепловыми нейтронами. В результате захвата нейтрона ядром бора происходит ядерная реакция, с выделением энергии преимущественно в раковой клетке, что приводит к ее гибели. Разработанный источник нейтронов пригоден для проведения клинических испытаний в условиях госпиталя. Помимо применения в медицине, действующий в ИЯФ СО РАН прототип нейтронного источника также успешно используется для изучения активации конструкционных материалов термоядерных установок быстрыми нейтронами, а также для других прикладных исследований.

Доклад С.С. Ананьева и Б.В. Кутеева (НИЦ Курчатовский институт, НИЯУ МИФИ) посвящен современному состоянию вопроса о технологиях переработки и обращения с дейтерий-тритиевым топливом в термоядерных и гибридных реакторах. В докладе отмечалось, что работа термоядерных реакторов и гибридных систем на основе процесса синтез-деление, использующих изотопы водорода в качестве основного топлива, потребует организации в таких установках топливного цикла, обеспечивающего горение термоядерной плазмы изотопами водорода, а также переработку топливной смеси и воспроизводство трития. На сегодняшний день, прототипы системы топливного цикла термоядерных установок созданы как в России, так и за рубежом, однако многие вопросы до сих пор остались открытыми. В докладе был проведен обзор различных концепций топливного цикла термоядерных установок, обсуждаемых международным сообществом в последние 30 лет. Рассматривались методы моделирования топливных потоков и количества трития в установках, применяемые их разработчиками. Были приведены результаты анализа кандидатных технологий, которые могут быть использованы при проектировании базовых систем топливного цикла термоядерных установок.

Современное состояние проблемы генерации тока волнами промежуточного частотного диапазона в традиционных и сферических токамаках обсуждалось в докладе В.В. Дьяченко (ФТИ РАН). В докладе рассматривались механизмы создания тока с помощью электромагнитных волн промежуточного частотного диапазона, а также особенности распространения и возбуждения медленных (нижнегибридных) и быстрых (геликонов) волн в плазме как традиционных, так и компактных сферических токамаков. Рассматривались технические решения, применяемые при

создании современных СВЧ-антенн для плазменного эксперимента. Также обсуждались результаты экспериментов, расчетные модели и достижения, полученные в экспериментах по генерации тока на традиционных токамаках Tore Supra, East и других современных установках. На сегодняшний день, генерация токов увлечения СВЧ-волнами нижегибридного диапазона является самым эффективным методом создания тороидального тока в плазме токамака. В подтверждение этого, были приведены первые результаты экспериментов по нижегибридной генерации тока в плазме сферического токамака Глобус-М2 при полоидальном и тороидальном замедлении вводимых СВЧ-волн, в которых величина замещающего тока достигала 50%.

Большим коллективом авторов из ФТИ РАН был представлен доклад по результатам исследования излучения высокочастотных электромагнитных волн высокотемпературной плазмы токамака Туман-3М (докладчик С.В. Лебедев). Излучение в диапазоне частот 1–100 МГц обусловлено наличием в плазме токамаков замагниченных ионов. При индукции магнитного поля 1–5 Тл и плотности плазмы 10^{19} – 10^{20} м⁻³ в этом ВЧ-диапазоне оказываются альфвеновские волны и ионное циклотронное излучение (ИЦИ). Наблюдение такого типа излучения позволяет анализировать состав плазмы и поведение высокоэнергичных ионов. В большинстве случаев излучение в мегагерцовом диапазоне частот не является тепловым, а обусловлено развитием неустойчивостей плазмы в присутствии высокоэнергичных заряженных частиц. Анализ этого излучения дает возможность исследования физики возбуждения плазменных неустойчивостей в замагниченной плазме токамаков и стеллараторов. Особое внимание в докладе было уделено диагностическому потенциалу мегагерцового излучения плазмы. Были представлены результаты экспериментов по измерению изотопного состава плазмы по спектрам альфвеновских волн и по ионному циклотронному излучению, наблюдаемому в отсутствие высокоэнергичных ионов. Измерения отношения амплитуд основных гармоник ИЦИ в плазме, состоящей из смеси изотопов водорода, может служить методом определения изотопного отношения в перспективных установках УТС.

Большой интерес вызвал доклад В.Ю. Сергеева и Б.В. Кутеева (СПбПУ, НИЦ Курчатовский институт, НИЯУ МИФИ), посвященный проблеме смягчения последствий срыва тока в токамаках-реакторах. В докладе отмечалось, что технология смягчения срыва тока разряда в токамаке остается ключевым вопросом безопасной и надежной работы устройств в будущих крупных токамаках, включая ИТЭР. В современных установках предложено и экспериментально апробировано несколько подходов, демонстрирующих

возможности инъекции в плазму массивных газов, гранул, пыли и жидкости для предотвращения наиболее опасного механизма образования лавины убегающих электронов – генерации очень высокого электрического поля в токамаке на заключительном этапе теплового срыва. Эксперименты показали, что эффективным инструментом для подавления убегающей лавины является быстрое увеличение плотности плазмы с помощью упомянутых выше методов (в 100–1000 раз в течение достаточно короткого времени – 10 мс). При этом количество инжектируемого вещества оказывается в диапазоне нескольких килограммов, что может негативно воздействовать на внутрикамерные технологические системы токамака-реактора. В докладе был представлен новый подход к этой проблеме, который направлен на борьбу с “зародышами” лавины убегающих электронов (потоками электронов на начальной стадии образования лавины) сразу после теплового срыва. Он состоит в инъекции твердой мишени для сбора “зародышей” лавины, которая задерживает образование лавины, и ее последующем захвате в коллекторе, расположенном внутри бланкетной зоны токамака. Были представлены результаты моделирования инъекции вольфрамовой мишени в плазму ИТЭР для основного режима его работы, которые показали, что “зародыши” лавины с энергиями до 25 МэВ успешно захватываются мишенью.

Свойства сверхкритических флюидов плазмы паров металлов, инертных газов и экситонов были рассмотрены в пленарном докладе А.Л. Хомкина и А.С. Шумихина (ОИВТ РАН). Были рассмотрены переходы пар–жидкость и диэлектрик–металл, а также процесс металлизации – экспоненциальный рост проводимости при сжатии паров металлов. Исследован механизм “холодной” ионизации на основе выдвинутой гипотезы о существовании электронного “желе” – затчка зоны проводимости в газовой фазе. Рассчитаны параметры критических точек и бинодали большинства металлов периодической таблицы Менделеева (включая щелочные металлы), водорода и экситонов. Проведено сравнение результатов эксперимента и теоретических расчетов для уравнений состояния паров металлов и проводимости в критических точках, на бинодали, а также на околокритических изотермах с учетом процессов “холодной” и термической ионизации. Предложена модель “скачкообразной” металлизации инертных газов при сжатии, близкая по природе переходу Мотта. Сделано заключение, что пары металлов в окрестности критической точки являются газообразным металлом из-за наличия процесса “холодной” ионизации, а не диэлектрическим состоянием. Вместо перехода металл–диэлектрик точнее говорить о существовании перехода: жидкий металл–газообразный

металл, и о процессе “холодной” металлизации при сжатии.

Обзор первопринципных методов расчета термодинамических, транспортных и оптических свойств сильно неидеальной вырожденной плазмы металлов были рассмотрены в докладе П.Р. Левашова (ОИВТ РАН). Такая плазма возникает во многих задачах современной физики, в том числе в существующих и перспективных энергоустановках, при воздействии мощных потоков электромагнитного излучения на вещество, в сильноточных устройствах, в астрофизике, геофизике, металлургии и т.п. В частности, при описании физических свойств жидких металлов и электролитов эти системы необходимо рассматривать как плазму с сильным межчастичным взаимодействием. При первопринципном подходе к описанию вырожденных систем не используется эмпирическая информация, за исключением заряда и массы ядер составляющих вещество элементов, а также фундаментальных физических констант. Был проведен анализ различных методов описания вырожденной плазмы металлов и проведено сравнение результатов моделирования с ударно-волновыми экспериментальными данными и экспериментами для жидких металлов; кроме того, были приведены примеры первопринципных оценок критических параметров металлов. Анализ различных методов показал, что современные подходы, основанные на методе квантовой молекулярной динамики и формуле Кубо–Гринвуда, позволяют в рамках одной модели с хорошей точностью рассчитывать весь комплекс теплофизических свойств неидеальной вырожденной плазмы.

Пленарный доклад С.А. Белькова (РФЯЦ-ВНИИЭФ) был посвящен обзору исследований в области физики плазмы и высоких плотностей энергии, проводимых во ВНИИЭФ. Сообщалось, что в процессе строительства находится мегаджоульная лазерная установка (192 канала, энергия лазерного импульса 2.8 МДж на 2-й гармонике излучения Nd-лазера) для экспериментов по зажиганию термоядерной реакции в мишенях лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). На установке будут проводиться фундаментальные исследования поведения веществ при значениях плотности в 100 раз превышающих твердотельную плотность и при температурах в сотни миллионов градусов. Первый лазерный модуль (8 каналов) уже введен в опытную эксплуатацию. Помимо исследований в области ЛТС в перспективе мегаджоульный лазер станет центром фундаментальных исследований коллективного пользования в области лабораторной астрофизики. Он может быть использован для моделирования процессов в центрах гигантских планет и в их магнитосферах, для изучения строения ядер планет и звезд, а также для изучения прочности за-

щиты Земли магнитосферой от плазменных потоков солнечного ветра, либо от мощных высотных ядерных взрывов. На этой установке будут изучаться закономерности взрывов сверхновых, исследование поведения веществ в экстремальных состояниях, и определение критериев разрушения астероидов прелентивным ядерным взрывом (обеспечение астероидной безопасности Земли).

На конференции были также представлены два доклада, познакомившие участников с современным статусом и состоянием исследований на двух российских тороидальных установках: новом токамаке Т-15МД, эксперименты на котором должны начаться к середине 2021 года, и сферическом токамаке Глобус-М2, который недавно вступил в строй после значительной реконструкции.

О подготовке установки Т-15МД к физическому пуску рассказывалось в докладе большого коллектива авторов, представляющих НИЦ Курчатовский институт, НИИЭФА и ТРИНИТИ. С сообщением выступил П.П. Хвостенко. В докладе сообщалось, что токамак Т-15МД имеет следующие параметры: $R = 1.48$ м, $a = 0.67$ м, $B = 2.0$ Т, $I_{pl} = 2.0$ МА. Он представляет собой компактную установку с дивертором, не имеющую аналогов в мире по параметрам: тороидальное магнитное поле 2 Тл при аспектном отношении плазмы 2.2. Электромагнитная система способна поддерживать без перегрева ток плазмы в диапазоне 2 МА – 250 кА в течение импульса до 400 секунд. Помимо начального индукционного возбуждения тока в плазме его поддержание может быть обеспечено как инжекцией пучков быстрых атомов, так и мощными электромагнитными волнами. К настоящему моменту на установке проведены предварительные испытания систем омического прогрева вакуумной камеры и возбуждения тлеющего разряда для обработки стенок камеры. Работа технологического оборудования систем высоковакуумной откачки, электропитания систем прогрева и тлеющего разряда во время кондиционирования стенок вакуумной камеры осуществлялась штатной системой управления. Эксперименты по получению и исследованию плазменного режима будут начаты в середине 2021 г.

Первые результаты экспериментов на сферическом токамаке Глобус-М2 и планы дальнейших научных исследований были изложены в докладе В.К. Гусева, представляющего большой научный коллектив сотрудников ФТИ РАН, ИЯФ СО РАН, СПбПУ, ООО Иоффе Фьюжн Текноложи и НИИЭФА. В докладе были представлены результаты экспериментальных кампаний предыдущих трех лет работы. Эксперименты проводились в дейтериевой плазме при инжекции дейтериевого пучка с энергией 28 кэВ. При росте магнитного

поля до 0.8 Тл и увеличении тока плазмы до 0.4 МА зарегистрировано повышение энергозапаса и времени жизни энергии плазмы (τ_E) до 3-х раз. Данные экспериментов расширяют скейлинг сферических токамаков, полученный ранее на токамаках NSTX (USA), MAST(UK) и Глобус-М (Россия), на область более высоких магнитных полей. При росте тока плазмы и магнитного поля фиксировалось заметное увеличение нейтронного выхода. В экспериментах при максимальных значениях магнитного поля и тока наблюдался рост комбинированного параметра $nT\tau_E$ – тройного произведения плотности плазмы (n), ее температуры (T) и времени жизни энергии (τ_E) – на порядок величины по сравнению с разрядами при низких полях и переход плазмы в так называемый бесстолкновительный режим с параметром столкновительности существенно меньше 1.

МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

На секции “Магнитное удержание высокотемпературной плазмы” (председатель секции – А.И. Мещеряков) был представлен 61 доклад. Тематика докладов связана, прежде всего, с исследованиями, проводимыми на действующих установках с магнитным удержанием плазмы, таких как токамаки Глобус-М2, ТУМАН-3М, Т-11М, стелларатор Л-2М, открытые ловушки ГДЛ, ГОЛ-3, и открытая ловушка с винтовыми пробками СМОЛА. Кроме того на секции был представлен ряд работ по результатам обработки экспериментальных данных на закрывшемся в 2018 году токамаке Т-10.

Среди действующих установок наибольшее количество докладов представляло результаты, полученные на сферическом токамаке Глобус-М2. На этой установке была проведена модернизация магнитной системы и системы питания. В результате стало возможным проводить эксперименты с магнитным полем до 0.8 Тл и током плазмы до 0.4 МА. При этом зарегистрировано повышение энергозапаса и времени жизни энергии плазмы до 3-х раз. Одновременно была проведена модернизация некоторых диагностик. Например, применение технологии машинного обучения позволило существенно улучшить точность определения электронной температуры. При этом для обучения использовались данные диагностики плазмы на основе томсоновского рассеяния лазерного излучения. Для исследования процессов переноса в условиях увеличенного магнитного поля и плазменного тока модернизированной установки Глобус-М2 создается единый комплекс оптических диагностик, который будет включать в себя модернизированную диагностику радиационных потерь, методику определения эффективного заряда плазмы, новую диагности-

ку температуры электронов на основе измерения характеристик мягкого рентгеновского излучения плазмы, а также спектроскопическую диагностику, включающую обзорный спектрометр и дискретные монохроматоры оптического излучения плазмы. Разработана и создана новая система экваториальной диагностики томсоновского рассеяния. Рассеянное излучение собирается телескопическим объективом, при этом наблюдаемые углы рассеяния лежат в пределах от 118° в центральной части токамака до 137° на периферии. Область обзора объектива одновременно покрывает пространство по нормализованному малому радиусу тороидальной плазмы (r/a) от 0.45 со стороны сильного поля до 0.9 со стороны слабого. Методом доплеровского обратного рассеяния проведено исследование спектральных характеристик турбулентности плазмы при переходе к режиму улучшенного удержания, при этом было зарегистрировано подавление мелкомасштабной турбулентности плазмы. Полученные данные для различных областей разряда, указывают на периферийный характер подавления турбулентности.

Много интересных результатов, полученных на открытых ловушках, было представлено участниками конференции из ИЯФ СО РАН. Продолжены теоретические работы по исследованию удержания плазмы в открытой газодинамической магнитной ловушке (ГДМЛ) в режиме так называемого “диамагнитного пузыря”. Идея заключается в том, чтобы в центральной области ловушки сформировать “пузырь” плазмы высокого относительного давления с $\beta = 8\pi p/B_v^2 \sim 1$ (B_v – магнитное поле в объеме пузыря, p – давление плазмы). Внутри пузыря магнитное поле близко к нулю, поскольку практически полностью вытеснено плазмой. Оценки показывают, что это приводит к значительному увеличению пробочного отношения ловушки и эффективному улучшению удержания плазмы. В результате численного моделирования в рамках гибридной модели (плазма состоит из горячих ионов и холодной равновесной фоновой плазмы) получены равновесные решения типа диамагнитного пузыря в широком диапазоне параметров, в частности, рассчитаны равновесные состояния плазмы в ГДМЛ в режиме диамагнитного удержания. Один из докладов был посвящен новому методу подавления продольных потерь в открытой ловушке – динамическому многопробочному удержанию вращающейся плазмы в магнитном поле с геликоидальной симметрией. Теоретически предсказана экспоненциальная зависимость эффективности подавления потерь от длины участка с винтовым полем, приводящая к существенному повышению эффективного пробочного отношения в открытой ловушке. Проверка данной кон-

цепции проводится на установке СМОЛА в ИЯФ СО РАН. Вращение плазмы в ловушке задается за счет создания контролируемого профиля радиального электрического поля. Были приведены обнадеживающие результаты экспериментов по подавлению продольного потока плазмы при среднем по сечению пробочном отношении $R_{\text{mean}} > 1.5$ и скорости вращения плазмы на периферии, близкой к ионно-звуковой скорости.

В докладах участников конференции, работающих на стеллараторе Л-2М, были представлены результаты исследований самосогласованности профилей температуры и давления электронной компоненты плазмы. Показано, что профили электронной температуры в общем случае не являются самосогласованными: при мощности СВЧ-нагрева плазмы свыше 250 кВт в режиме электронного циклотронного резонанса (ЭЦР на 2-й гармонике), форма профилей температуры заметно меняется и становится более плоской в центральной части плазменного шнура. Установлено, что в экспериментах по ЭЦР-нагреву плазмы в стеллараторе Л-2М наблюдаются самосогласованные профили давления плазмы только при относительно небольших значениях СВЧ-мощности, менее 250 кВт.

Много работ было посвящено проектируемым и создаваемым установкам. Токамак Т-15МД (НИЦ “Курчатовский институт”) уже построен, и в ближайшее время он вступит в строй действующих установок. Поэтому много работ было посвящено созданию и подготовке рабочих систем этого токамака, методов нагрева плазмы и системы предварительной ионизации газа, а также диагностическим системам этого токамака. Были представлены результаты абсолютной калибровки магнитных зондов токамака Т-15 МД. На специально созданном стенде удалось прокалибровать магнитные зонды с погрешностью, не превышающей 0.1%. Рассматривались возможности использования турбулентных процессов в плазме токамака Т-15 МД. Сканирование частоты зондирующего сигнала во время разряда позволит проводить измерения с высоким пространственным и временным разрешением, а также проводить измерения в различных областях плазменного шнура в течение одного разряда. Также рассказывалось о комплексе диагностик жесткого (с энергией квантов 0.1–10 МэВ) и надтеплого (с энергией квантов 10–150 кэВ) рентгеновского излучения, предназначенных для исследования быстропеременных возмущений излучения на начальной стадии разряда и в момент срыва тока. Комплекс включает в себя многоканальную систему регистрации надтеплого рентгеновского излучения в потоковом режиме, многоканальную систему спектрометрических кадмий-теллуридных (CdTe) детекторов и двухканальные спектромет-

ры. Были также представлены доклады, посвященные разработке двух дополнительных методов нагрева для Т-15МД. Система нейтральной инжекции предназначена для ввода пучков атомов водорода с энергией до 75 кэВ при максимальной суммарной мощности не менее 6 МВт. На первом этапе длительность импульса должна быть до 30 секунд, на втором предполагается удлинение импульса до 400 секунд, что практически соответствует стационарному режиму. Система электронного циклотронного СВЧ-нагрева использует гиротрон на рабочей частоте 82.6 ГГц, резонансной для магнитного поля с индукцией 1.5 Тл. Основной задачей СВЧ-излучения гиротрона является пробой рабочего газа в токамаке на второй гармонике необыкновенной волны для развития плазменного разряда. Выходная мощность гиротрона составляет 1 МВт при максимальной длительности импульса 30 секунд.

Продолжается разработка технологий тритиевого цикла для проекта ДЕМО-ТИН. Проведено совместное моделирование топливных потоков в плазме и в системах инжекции и откачки ДЕМО-ТИН. Проведено моделирование потоков топливных изотопов в топливном цикле, подобраны параметры топливной инжекции для обеспечения заданных условий в основной и диверторной плазме для различных сценариев изотопного состава нагревных инжекторов.

По результатам работы секции, можно сделать вывод, что уровень экспериментальных работ, выполняемых на российских термоядерных установках до 2020 года, заметно отстает от уровня работ, выполняемых в таких странах, как США, Япония, Южная Корея, Китай и странах Евросоюза. Это связано с устаревшей технической базой: прежде всего отсутствием новых экспериментальных установок и низким уровнем текущего финансирования работ, связанных с термоядерными исследованиями. Российские ученые, работающие в области магнитного удержания высокотемпературной плазмы, возлагают большие надежды на новый российский токамак Т-15МД, первую плазму на котором планируют получить в середине 2021 года. Участники конференции, работавшие в секции “Магнитное удержание высокотемпературной плазмы”, отмечали, что с 2021 года ожидается существенное увеличение финансирования термоядерных исследований, включая строительство новых экспериментальных и технологических установок, которое может быть реализовано в ходе выполнения Комплексной программы Российской Федерации “Развития техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии на период до 2024 года”, в состав которой входит важная для работ по УТС подпрограмма “Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий”.

ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

По тематике секции “Инерциальный термоядерный синтез” (председатель секции Г.А. Вергунова) на конференции было представлено 22 устных доклада. Можно перечислить несколько основных направлений исследований по инерциальному термоядерному синтезу (ИТС). К ним относятся лазерный термоядерный синтез (ЛТС), мощные сильноточные короткоимпульсные разряды, физика высоких плотностей энергии в плазме, Z-пинчи, физические процессы в системе типа плазменный фокус, численное моделирование в указанных областях, а также смежные проблемы, на которых сосредоточены усилия российских научных коллективов, задействованных в данной сфере. В мире в области ЛТС продолжают эксперименты по зажиганию на ряде установок Европы, Японии и на самой мощной установке NIF (Ливерморская лаборатория США) с энергией 1.8 МДж в 192 лазерных пучках. В ФИАН проведены расчетно-теоретические исследования на основе полученных в США результатов. Эти исследования показали, что степень конверсии лазерной энергии в энергию быстрых электронов и температура этих частиц, измеренные в экспериментах на установке NIF, объясняются действием резонансного механизма поглощения лазерного излучения вблизи критической плотности плазмы с учетом трансформации лазерного излучения в сильные плазменные волны. Также были представлены результаты расчетов по программе радиационной гидродинамики мишеней при непрямом облучении лазерно-индуцированным рентгеновским импульсом в системе типа хольраум (hohlraum), которые показывают, что даже относительно небольшая пространственная неоднородность (около 3%) рентгеновского облучения мишеней в экспериментах на установке NIF приводит к существенному снижению нейтронного выхода.

В расчетно-теоретических работах ученых ФИАН и ИПМ исследованы ударные волны с габаритным уровнем давления, инициируемые потоком лазерно-ускоренных электронов, и продемонстрирована возможность достижения в твердом веществе давлений габаритного уровня при использовании лазерного импульса с интенсивностью превышающей значение 10^{18} Вт/см², обеспечивающего эффективную трансформацию лазерной энергии в энергию быстрых электронов. В другом докладе обсуждались вопросы экспериментальных и теоретических исследований неустойчивостей Релея–Тейлора, Рихтмайера–Мешкова и Кельвина–Гельмгольца. На основании 2D и 3D гидродинамических расчетов установлены закономерности развития неустойчивостей в условиях ряда современных эксперимен-

тов, изучена динамика роста возмущений, их характер, а также проанализировано развитие зоны перемешивания.

В ФИАН проведены исследования угловых, спектральных и энергетических характеристик терагерцового излучения, возникающего при наклонном падении s-поляризованного лазерного излучения на границу разреженной плазмы, в зависимости от угла падения и длительности импульса лазера. Показано, что возникающее терагерцовое излучение распространяется в направлении лазерного импульса, отраженного от границы плазмы, и полная плотность энергии импульса максимальна при скользящем падении лазерного импульса, когда имеет место эффект полного отражения лазерного излучения от плазмы.

На секции было представлено несколько докладов, посвященных физике и технологии изготовления и транспортировки мишеней для ЛТС (ФИАН). Для применения в устройствах ЛТС перспективным является метод получения полых полимерных оболочек в качестве основы мишеней. Пустотелые полимерные оболочки получали методом микрокапсулирования в нескольких технических вариантах исполнения этого метода с использованием способов вертикального и горизонтально-роторного перемешивания. Полимерные микрокапсульные оболочки, полученные в оптимальных условиях после термического удаления внутренней воды, отличались хорошей сферической формой с максимальным отклонением 0.5% от среднего значения диаметра сферы и отклонением 2% от среднего диаметра 2150 мкм в группе из 100 полых оболочек. Было предложено использовать бесконтактную систему доставки мишеней в камеру, в которой для ускорения сверхпроводящего “снаряда”, изготовленного из высокотемпературного сверхпроводника II рода и применяемого в качестве носителя криогенной топливной мишени, происходило в электромагнитном ускорителе, снабженном системой стабилизации.

Часть работ была посвящена совершенствованию диагностической аппаратуры. Была представлена работа, посвященная разработке времяпролетного спектрометра импульсных нейтронных и корпускулярных потоков на основе алмазного детектора для исследования физических процессов в ЛТС (ИТЭР-центр). В качестве детектора предложено использовать алмазную гомоэпитаксиальную структуру, представляющую собой легированную бором подложку с нанесенной тонкой пленкой алмаза толщиной 40–50 нм. Малая толщина пленки позволяет регистрировать сигнал длительностью, сравнимой с характерным временем термоядерного горения в ЛТС. Совершенствуются диагностики измерения температуры и плотности в пинчевой плазме пу-

тем исследования новых эффектов, влияющих на относительные интенсивности линий гелиеподобных и водородоподобных ионов (НИЦ Курчатовский институт).

Продолжаются исследования различных импульсных плазменных систем.

На установке типа плазменный фокус ПФ-3 в НИЦ Курчатовский институт в рамках программы по лабораторному моделированию астрофизических джетов была проведена серия экспериментов по исследованию влияния эффекта вакуумного следа на джет, генерируемый в сильноточном разряде. Результаты этих экспериментов согласуются с результатами численного моделирования. На той же установке тремя независимыми методиками показано наличие вращения плазменного потока в джете, при этом полученные значения скорости вращения около 10^6 рад/с находятся в соответствии с МГД-теорией струйных выбросов из молодых звезд.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан двумерный МГД-код для проведения расчетных исследований динамики токовой плазменной оболочки в сферических камерах с плазменным фокусом с учетом генерации нейтронов. Сравнение расчетных зависимостей с экспериментальными данными по току, напряжению и нейтронному выходу позволило уточнить параметры, используемые в расчетах и добиться удовлетворительного согласия расчета с экспериментом.

Была представлена работа, посвященная механизмам генерации нейтронов в Z-пинчах. Показана сложность интерпретации, основанной только на полностью ускорительном или только на термоядерном механизме генерации нейтронов. Дело в том, что в процессе развития импульсного разряда в Z-пинчах может происходить изменение механизма генерации нейтронов. Если из-за какого-то механизма набора энергии ионы приобретают немаксвелловское распределение по энергии, то из-за того, что сечение кулоновских столкновений существенно больше сечения ядерных столкновений, направление движения этих ионов хаотизируется, а распределение по энергии максвеллизуется. В итоге для ионов, которые приобрели значительную энергию в разряде, в результате последующих столкновений механизм генерации нейтронов становится тепловым, т.е. термоядерным.

Работа секции “Инерциальный термоядерный синтез” была успешной и прошла на высоком научном уровне. Практически все представленные доклады относились к поисковым направлениям, нацеленным на решение актуальных проблем физики лазерно-плазменного взаимодействия, лазерной и электроразрядной плазмы. Налаженная кооперация и широкая экспериментально-диагностическая база способствуют стабильному

развитию исследований, проводимых на электроразрядных установках в различных диапазонах мощности.

Благодаря сохранению научных школ и традиций в области физики плазмы, теоретические исследования российских ученых высоко оцениваются в мире. При этом, в отличие от США, Евросоюза, Японии и Китая, в России до сих пор нет сети лазерных установок с широким набором параметров по мощности, длительности импульса и длине волны, на которых можно было бы проводить эксперименты по ЛТС и смежным проблемам, реализовывать новые идеи и экспериментальные схемы, а также проводить отработку новых диагностик. Как результат, на секции было представлено очень мало докладов, связанных непосредственно с экспериментами по ЛТС, в основном это были расчетно-теоретические работы. В связи с этим важнейшим направлением работ была и остается реализация единственного российского проекта строительства мегаджоулевого лазера (РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров) для исследований по ЛТС.

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

На конференции в рамках работы секции “Физические процессы в низкотемпературной плазме” (председатель секции В.С. Воробьев) было заслушано 29 устных докладов.

На секции были представлены результаты исследований в следующих основных направлениях: элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы, различные применения низкотемпературной плазмы, исследование плазмы, возникающей в импульсных процессах, физика атмосферных процессов, промышленные и биомедицинские приложения низкотемпературной плазмы. По всем направлениям секции можно отметить значительный прогресс в исследованиях, результаты которых обсуждались в секционных заседаниях. При этом следует отметить, что большое количество докладов было связано с технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Ряд работ был посвящен лабораторному моделированию процессов, происходящих в атмосфере. В частности, исследовался один из наиболее интересных вопросов, относящихся к динамике токовых слоев, который состоит в возможности появления в них электрических токов обратного направления. Были рассмотрены динамические процессы в токовых слоях, которые вызваны движением направленных потоков плазмы в магнитном поле и возбуждением индукционных электрических полей. Это позволило объяснить причины возникновения обратных токов, осо-

бенности их эволюции и последствия их появления. Обсуждение базируется на результатах, полученных с помощью установки ТС-3D (ИОФ РАН). Установлено, что обратные токи могут возникать в широком диапазоне экспериментальных условий, в том числе при формировании токового слоя в плазме с ионами различной массы, однако, момент появления обратных токов и их величины могут быть различными.

Одним из направлений, представленных на секции, было исследование пылевой плазмы, находящейся в сильном магнитном поле. Отмечалось, что в этой области произошел существенный прогресс. В случае применения ВЧ-разряда диапазон магнитной индукции распространился до 6 Тл, исследовалось влияние такого магнитного поля на плазменные процессы. В случае тлеющего разряда были созданы протяженные пылевые структуры в магнитном поле до 2.2 Тл, обнаружены новые (помимо стоячих страт) пылевые ловушки, создано пылевое образование в неоднородном магнитном поле. Протяженные пылевые структуры позволили впервые наблюдать пылевую плазму в сильно неоднородном магнитном поле. При этом оказалось, что скорость вращения пылевых структур имеет очень большие градиенты.

В настоящее время для переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) используется химический экстракционный PUREX-процесс. Несмотря на промышленное применение метода, при переработке образуется большое количество жидких радиоактивных отходов (РАО). Это, создает дополнительную нагрузку на окружающую среду. Поэтому на сегодняшний день не прекращаются поиски новых технологий переработки ОЯТ для снижения активности РАО и уменьшения их количества. Были представлены результаты экспериментального исследования одной из таких технологий: плазменной сепарации веществ, содержащих РАО. Концепция плазменной сепарации базируется на идее последовательных шагов. 1-й шаг — испарение и ионизация ОЯТ. 2-й шаг — разделение плазменного потока ОЯТ на две массовые группы (актиноиды и продукты распада урана) в скрещенных электрическом и магнитном полях в присутствии буферной плазмы, при этом задача буферной плазмы состоит в компенсации объемного заряда разделяемых пучков для повышения производительности процесса по сравнению с электромагнитными методами. 3-й шаг — осаждение разделенных потоков ОЯТ на подложку. Для моделирования этих процессов в экспериментах была использована смесь серебра со свинцом. Экспериментально было установлено, что электрическое поле буферного разряда увлекает ионы серебра и свинца в попе-

речном, по отношению к магнитному полю, направлении. Хорошо разделенные в пространстве компоненты смеси уже осаждаются на подложку.

В ИЯФ СО РАН ведутся работы по исследованию генерации плазмы на установке с ВЧ-источником плазмы на основе геликонного разряда. Перспективным применением такого источника является генерация плазмы в линейных магнитных ловушках и линейных плазменных системах для материаловедческих исследований (Plasma-Material Interaction — PMI). В свою очередь, PMI-исследования важны при изучении материалов, которые предполагается использовать в качестве первой стенки термоядерных реакторов. На источники плазмы для таких установок накладывается ряд требований, таких как высокая плотность плазмы, отсутствие примесей и стационарный режим работы. Одним из наиболее подходящих устройств является ВЧ-источник плазмы, обладающий высокой эффективностью генерации плазмы и длительным временем работы. В эксперименте достигнута плотность плазмы около 10^{13} см^{-3} с электронной температурой 7–10 эВ на оси источника.

Большой интерес вызвал доклад, посвященный термодинамическим свойствам газоплазменного состояния вещества в низкотемпературном пределе. Была рассмотрена термодинамика вещества в пределе бесконечно разреженной плазмы нулевой температуры (так называемый “ХМП-предел”): $\rho \rightarrow 0$, $T \rightarrow 0$, химический потенциал электрона $\mu_e(\rho, T) = \text{const}$. Термодинамика плазмы приобретает в этом пределе замечательную схематическую структуру, являющуюся прообразом реальной структуры с термодинамическими зависимостями газовой плазмы при $T > 0$. Естественным управляющим параметром в ХМП-пределе является химический потенциал электрона $\mu_e(\rho, T)$ или атома, молекулы и др. При специальном выборе координат оба уравнения состояния плазмы (термическое и калорическое) вырождаются в ХМП-пределе в почти идентичные объекты предельно простой, ступенчатой формы (так называемая “лестница ионизации”).

При решении различных фундаментальных и прикладных задач физики плазмы, возникающих в процессах мощного электрического взрыва проводников или взаимодействия излучения или потоков частиц с веществом необходимо знание теплофизических величин или свойств вещества, таких как уравнение состояния и электронные коэффициенты переноса. Их изучение представляет особую сложность при повышенных температурах, и, в частности, для низкотемпературной плазмы металлов или полупроводников. В этом состоянии температура вещества — металла или проводника — как правило, превышает 5 кК, что приводит к естественным сложностям в проведе-

нии измерений. В теоретических исследованиях и расчетах также возникают свои сложности. Они связаны с тем, что при повышении плотности даже на 0.1 от значения при нормальных условиях межчастичное взаимодействие становится существенным, но его уже сложно учесть в рамках приближенных моделей. Тем не менее, в последние годы для ряда металлов и полупроводников появились как новые измерительные данные в узком диапазоне параметров, так и расчеты, которые частично восполняют этот пробел. В частности, на конференции были представлены результаты расчета термодинамических величин (давление, внутренняя энергия) и электронных коэффициентов переноса (электропроводность, теплопроводность и термоэдс) в низкотемпературной плазме галлия.

Отметим работу, посвященную созданию плазмохимических реакторов для утилизации диоксида углерода CO_2 . Для этого используется низкотемпературная плазма различных газовых разрядов атмосферного давления: барьерный разряд, микроволновый и высокочастотный разряды, тлеющий разряд постоянного тока. В докладах была представлена новая согласованная математическая и физическая модель низкотемпературной плазмы в чистом CO_2 . Модель включает компонентный состав (модели химических соединений с соответствующими квантовыми состояниями), физико-химические процессы (с базами данных сечений, констант скоростей, коэффициентами переноса), уравнения (электродинамики, процессов переноса излучения, компонент газовой среды и теплопроводности) и методы самосогласованного решения уравнений.

В целом, работа секции “Физические процессы в низкотемпературной плазме” была успешной и прошла на высоком научном уровне. Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПЛАЗМЕННЫХ И ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На секции “Физические основы плазменных и лучевых технологий” (председатели секции А.Ф. Александров и С.А. Двинин) были заслушаны 28 устных докладов. Обсуждались результаты исследований, проводимых в институтах РАН, вузах СНГ и других ведущих научных центрах России. Дистанционный формат конференции привел к уменьшению числа докладов с зарубежными соавторами; в этом году из зарубежных ученых были лишь участники из Таджикского Национального университета.

Тематика заслушанных докладов соответствовала всему спектру направлений плазменных технологий. Следует отметить, что значительно увеличилась доля докладов, посвященных экспериментальным исследованиям: 23 доклада с экспериментальными результатами из общего количества докладов 28.

Одно из заседаний было полностью посвящено проблеме генерации СВЧ-излучения и создания сильноточных электронных пучков. Традиционно тематика плазменных релятивистских генераторов развивается в ИОФ РАН. Один доклад был посвящен сверхширокополосному источнику излучения на основе плазменного релятивистского генератора с длительностью микроволнового импульса 300–500 нс для области частот 1–5 ГГц. Во втором докладе доложены результаты создания мощного источника монохроматического СВЧ-излучения с возможностью электронной перестройки частоты. Получить относительно высокий уровень отношения сигнал/шум в режиме усиления монохроматического сигнала удалось благодаря обнаруженному эффекту подавления шумов. Коллективом авторов ИЯФ СО РАН и НГУ представлены результаты исследований на специализированной установке ГОЛ-ПЭТ. Были представлены экспериментальные исследования механизмов генерации субмиллиметровых волн в диапазоне субтерагерцовых частот 0.1–0.8 ТГц мультимегаваттной мощности при коллективной релаксации пучка релятивистских электронов с энергией 0.6 МэВ, током 20 кА и длительностью импульса 6 нс. Во втором докладе из ИЯФ СО РАН были представлены результаты измерений динамики плотности плазмы при различных начальных условиях эксперимента. Обсуждаются факторы, определяющие изменения плотности во времени, и то, насколько существенно эти изменения влияют на характеристики потока терагерцового излучения, генерируемого в плазменном столбе. В третьем докладе были представлены результаты экспериментов по исследованию характеристик потока генерируемого излучения в области частот 0.15–0.6 ТГц, выходящего вдоль оси пучково-плазменной системы.

Доклад коллектива авторов из ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” был посвящен результатам экспериментальных исследований эффективности варианта конструкции генераторов электронных пучков (ГЭП) на основе стационарного анодального высоковольтного тлеющего разряда с убеганием электронов – открытого разряда. Генератор организован так, чтобы сквозь разрядный канал ГЭП продувался замещающий газ, эффективность создания электронного пучка в котором была приближена к максимально достижимым ускоряющим напряжениям.

В работе коллектива авторов из ОИВТ РАН и НИУ МЭИ плазмохимический подход, основанный на применении плазмотрона постоянного тока, был использован для синтеза широкого спектра углеродных наноструктур: углеродные нанотрубки, наностенки, графен, гидрогенизированный графен и смесь нанотрубок с графеном. Синтез проводился в плазмохимическом реакторе с варьированием давления в диапазоне 350–710 Тор и типа углеводорода в плазмообразующей смеси с гелием.

Большое внимание привлек цикл докладов, выполненный большим коллективом авторов из НИЦ Курчатовский институт, НИУ МЭИ, МФТИ. В первой из работ исследовалось воздействие электронного пучка на сферопластики — это высокопрочные закрытоячеистые композиционные материалы, выдерживающие воздействие очень больших гидростатических давлений и имеющие широкое применение в технике и промышленности. С помощью электронного пучка обеспечивается уровень энерговыделения, достаточный для испарения материала мишени и генерации ударно-волновых процессов. Во второй работе предложена новая схема диодного узла в ускорителе “Кальмар”, позволяющая минимизировать влияние катодной плазмы на исследование воздействия сильноточного электронного пучка на материалы первой стенки мощных плазменных установок. В третьей работе представлены экспериментальные результаты исследования распространения возмущений, вызванных сильноточным электронным пучком, в прозрачных образцах при работе ускорителя в режиме низкой энергетики. В качестве основной измерительной методики использовалось лазерное зондирование в сочетании с электронно-оптической регистрацией теневых фотографий в хронографическом режиме.

Большой цикл работ из ИОФ РАН (и смежных организаций) был посвящен исследованию свойств газового разряда в условиях реализации различных технологических процессов. Представлены результаты следующих исследований. (1) Исследованы возможности применения микроволнового факела как способа плазменной обработки катодов различного состава (карбидов кремния, титана, алюминия). Обсуждались физические аспекты процессов, происходящих при контакте плазмы с поверхностью. (2) Были приведены результаты предварительных экспериментов, демонстрирующих возможность получения кубических нанокристаллов оксида меди (Cu_2O) в результате процесса электрофореза коллоидного раствора наноуглерода в этаноле. Коллоидный раствор наноуглерода был получен при помощи высоковольтного многоискрового разряда в этаноле с инъекцией аргона в межэлектродное пространство. (3) Исследована динамика

свечения и структура микроплазменного разряда. Визуально в макромасштабе оно имеет разветвленную структуру типа дендрита, которая в микромасштабе состоит из большого количества ярко светящихся “точечных” образований — локализованных на поверхности титана катодных пятен. Установлено, что микроплазменный разряд распространяется “скачками” по поверхности титана, покрытого тонкой сплошной диэлектрической пленкой толщиной до 10 нм, со средней скоростью 15 м/с. (4) Разработаны методы спектральной диагностики разрядов, возбуждаемых импульсами мощного гиротрона в металлodieлектрических порошковых смесях.

Ряд докладов был посвящен решению общих вопросов, возникающих при реализации различных технологических процессов. Так в докладе авторов из МГУ и ТНУ были рассмотрены электродинамические свойства емкостного ВЧ-разряда низкого давления (частота столкновений электронов много меньше частоты поля) с электродами большой площади при возбуждении его электромагнитным полем частотой выше 13 МГц.

В совместном докладе авторов из ГНЦ РФ ТРИНИТИ и РФЯЦ–ВНИИТФ представлены результаты исследования взаимодействия мощного потока плазмы с импульсной газовой струей. Экспериментальные данные анализируются совместно с проведенным расчетно-теоретическим моделированием. Полученные результаты могут представлять интерес, как с фундаментальной точки зрения, так и для решения некоторых прикладных задач, например, для разработки диссипативного дивертора ИТЭР и лабораторного моделирования звездных джетов, проникающих в межгалактический газ.

В докладе, представленном авторами из НИИ механики МГУ, исследовались возможности стабилизации стационарной дуги во внешнем аксиальном магнитном поле. Проведено расчетно-теоретическое и экспериментальное исследование процессов при иницировании, стабилизации и гашении протяженных сильноточных электрических дуг в открытой воздушной среде атмосферного давления.

Работа секции в целом показала, что в области плазменных и пучковых технологий ведется активная исследовательская работа, продолжается рост числа работ, имеющих явную технологическую направленность. На секции были представлены доклады по большинству направлений развития современных технологий. Общее число докладов в сравнении с предыдущими конференциями уменьшилось (2017 — 38 докладов, 2018 — 57, 2019 — 36, 2020 — 28). Возможно, это связано с дистанционным характером конференции, так как многие участники считают обеспечение личных контактов с коллегами главным достоинством

ством конференций. Возможно, трудные условия работы, которые сложились в прошедшем году из-за пандемии, также сыграли свою роль. Очень заметно уменьшилось также число докладов, представленных небольшими группами авторов.

Продолжается модернизация больших экспериментальных установок, прослеживается тенденция к вводу новых диагностик. Исследователи стараются увеличить эффективность исследований, но эти стремления сдерживаются недостаточным госбюджетным финансированием исследований.

ПРОЕКТ ИТЭР. ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО

На сессию “Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего” (председатель секции А.В. Красильников) в этом году было представлено 40 докладов. Доклады были посвящены состоянию работ по созданию систем ИТЭР, разрабатываемых и изготавливаемых в России.

К таким системам относится “Диверторный монитор нейтронного потока” (ДМНП). Для этой диагностики предстоит важный этап – финальный проект диагностики должен пройти защиту в международной организации ИТЭР. Диагностика должна обеспечить измерение полного нейтронного выхода и термоядерной мощности реактора ИТЭР с заданной точностью и временным разрешением. Чтобы удовлетворить требованиям ИТЭР по вакууму, было принято новое техническое решение о переносе модуля ДМНП с диверторной кассеты на поверхность вакуумной камеры. Для новой позиции размещения модуля ДМНП выполнены уточненные ядерно-физические расчеты, которые включали в себя анализ воздействия нейтронного излучения, анализ наведенной активности в применяемых материалах и радиационных отходов. Подробные физико-технические данные проектов регистрации нейтронов представляются ниже.

Вертикальная нейтронная камера (ВНК) ИТЭР – это диагностическая система, предназначенная для построения профиля нейтронного источника в реальном времени. ВНК имеет 11 хорд наблюдения, расположенных в верхнем (№ 18) и нижнем (№ 14) портах вакуумной камеры токамака. Для детектирования быстрых нейтронов в ВНК используются ионизационные камеры деления на основе ^{238}U и алмазные детекторы. В настоящий момент диагностика находится на стадии разработки финального проекта. При разработке данной диагностической системы была успешно решена проблема значительного фона рассеянных нейтронов в каналах коллиматоров. За счет оптимизации конструкции детекторов и формы коллиматоров удалось улучшить в

3–4 раза соотношение сигнал–фон. Был изготовлен блок детектирования быстрых нейтронов (БДБН) оптимизированной конструкции и выполнены испытания детекторов в условиях, приближенных к условиям в каналах коллиматоров ВНК: рабочая температура до 150°C , технологический прогрев до 250°C , поток 14 МэВ нейтронов с плотностью потока до 10^9 н/см² с. По результатам испытаний можно сделать вывод, что детекторы БДБН обеспечат измерение нейтронного потока в условиях ИТЭР с требуемой по проекту погрешностью.

Был рассмотрен статус работ по диагностике “Спектроскопия водородных линий (СВЛ)” для ИТЭР. Диагностика находится в стадии изготовления.

В ИЯФ СО РАН проводятся работы по интеграции диагностических портов ИТЭР. В ходе прошедшего периода был выполнен очередной этап проектирования верхних портов. На каждом этапе проектирования работоспособность разрабатываемых конструкций была подтверждена серией инженерных расчетов по моделированию радиационных, тепловых, гидравлических, электромагнитных, сейсмических и механических нагрузок. Обсуждалась подготовка производственных мощностей ИЯФ СО РАН к изготовлению и сборке оборудования для размещения диагностических систем в соответствии с правилами и требованиями французского кода RCC-MR 2007. Проведены тесты керамики карбида бора для защиты диагностических портов. Это обусловлено тем, что в ИЯФ СО РАН для нейтронной защиты разрабатываемых институтом порт-плагов ИТЭР предложено использовать керамику из карбида бора, так как она имеет малый вес, что критично для порт-плагов, и бор имеет высокое сечение захвата нейтронов. Однако в ходе концептуального проектирования вакуумной камеры ИТЭР использовать керамику В4С не предполагалось, в то время как на этапе финального проектирования экваториального порт-плага (ЭПП) № 11 планируется использование большого количества такой керамики.

В Проектном центре ИТЭР идет разработка диагностики “Диверторный монитор нейтронного потока” (ДМНП), предназначенной для определения выхода нейтронов и термоядерной мощности плазмы ИТЭР в широком динамическом диапазоне измерений. Временное разрешение диагностики составляет 1 мс. Требуемая относительная погрешность измерений для DT-плазмы – 10%, а для DD-плазмы – 20%. В качестве детекторов ионизирующего излучения будут применены ионизационные камеры деления (ИКД) с различным изотопным составом и массой делящегося вещества (изотопы урана ^{235}U и ^{238}U). ИКД с ^{238}U особенно чувствительны к нейтронам

высоких энергий (>1 МэВ). Для минимизации влияния на измерения тепловых нейтронов в данных детекторах планируется использование ^{238}U с изотопной чистотой 99.9999%. В течение эксплуатации ИТЭР в данных ИКД нарабатывается ^{239}Pu изотоп плутония, что ведет к изменению чувствительности детекторов до 8%. Изменение чувствительности ИКД будет вносить дополнительную погрешность в измерения. Кроме того, столь высокая степень содержания ^{238}U ведет к увеличению стоимости изготовления детекторов ДМНП. Применение отвального урана или урана промежуточной чистоты не требует существенной переработки конструкции ИКД ДМНП, так как чувствительность меняется не более чем на 17% относительно особо чистого урана (при этом погрешность нанесения урана на обкладки ИКД $\sim 20\%$). Применение отвального урана существенно удешевит стоимость изготовления ИКД.

Серия физических экспериментов по ослаблению нейтронного потока проведена на стенде нейтронной диагностики. Ионизирующее излучение создавалось импульсными нейтронными генераторами ИНГ-07Д (энергия нейтронов 2.5 МэВ) и ИНГ-07Т (энергия нейтронов 14 МэВ). В качестве барьерного материала, ослабляющего нейтронное излучение, использовались следующие образцы конструкционных материалов ИТЭР: полиэтилен, нержавеющая сталь SS316L-IG и бронза марки БрХЦр. Толщина барьера варьировалась от 4 см до 24 см. В качестве монитора потока прямых нейтронов, измеряющего распределение нейтронов по энергиям, использовался сцинтилляционный детектор на основе кристалла паратерфенила. Анализ проведенных экспериментов позволил подтвердить корректность ядерных констант для используемых материалов.

На заседаниях секции были представлены доклады, посвященные численному моделированию работы диагностик ИТЭР. Например, было проведено численное моделирование диагностики “Активная спектроскопия ИТЭР” с использованием технологии трассировки лучей. Был разработан код “sxrs” для моделирования спектров излучения плазмы, регистрируемых этой диагностикой, которая основана на регистрации и анализе излучения, возникающего в результате перезарядки ядер легких примесей плазмы на нейтральных атомах диагностического пучка. Диагностика позволяет определить концентрацию и температуру ядер легких примесей, а также скорость движения плазмы как целого. Для разработки кода был выбран язык программирования Python. Разработанный код позволяет учесть особенности геометрии стенок реактора ИТЭР, а также вклад отраженного света в регистрируемые спектры излучения плазмы.

В проектом центре ИТЭР также проводятся работы по исследованию свойств различных кристаллов, которые можно использовать в проектируемых диагностиках. Один из докладов был посвящен синтезу CVD-алмаза электронного качества для радиационно-стойких приборов и детекторов ионизирующего излучения. Синтетический алмаз является перспективным материалом для создания детекторов ионизирующих излучений, в которых нуждаются термоядерные и космические исследования, атомная энергетика, медицина и другие отрасли. На основе алмаза может быть создана элементная база для сильноточной электроники, уникальные электронные и оптические устройства для работы в условиях повышенной радиации, высоких температур, химически агрессивных сред. Проведенные в “Проектом центре ИТЭР” исследования качества алмазного материала различных изготовителей показали, что только компания Element 6 производит CVD алмазные кристаллы электронного качества. Сегодня уже понятно, что широкое применение алмаза вызовет технологическую революцию в электронике, поэтому крайне актуальным является создание технологии отечественного производства синтетических CVD алмазных монокристаллов электронного качества. В другом докладе был дан анализ характеристик кристалла хлорида лантана LaCl_3 для целей нейтронной диагностики дейтериевой плазмы. В ходе работы со сцинтилляционным детектором на основе LaCl_3 (CE – Conformaté Européenne, т.е. “европейское соответствие”) получены следующие результаты: измерен собственный фон кристалла, измерен отклик кристалла при регистрации DD-нейтронов, создаваемых импульсным генератором нейтронов ИНГ-07Д, на основании измеренных откликов подобраны оптимальные параметры разделения, получены разделенные амплитудные спектры при регистрации α -частиц, γ -квантов и нейтронов. Полученные экспериментальные результаты позволяют говорить о перспективности использования детектора на основе LaCl_3 в целях спектрометрии быстрых DD-нейтронов с использованием цифрового метода разделения сигналов по формам импульсов. Показана возможность калибровки детектора на основе $\text{LaCl}_3(\text{CE})$ с использованием собственного фона кристалла.

Также были представлены доклады, посвященные сбору и обработке экспериментальных данных диагностик, а также вопросам, связанным с интеграцией технологических и диагностических систем в центральную систему управления на различных стадиях работы ИТЭР: при запуске установки и во время получения первой плазмы. Отдельно рассмотрены вопросы интеграции и

управления диагностическими комплексами установки в режиме удаленного доступа в рамках созданного в Проектном центре ИТЭР “Центра удаленного доступа”.

Были представлены результаты исследований особенностей накопления дейтерия в образцах из вольфрама с добавкой тантала, а также особенностей накопления трития в вольфраме, в том числе, содержащем электронно-индуцированные дефекты структуры.

Было исследовано влияние конверсии мод при отражении излучения от стенок на многопроходное поглощение внешнего электронного циклотронного излучения на начальной стадии разряда в ИТЭР. Из-за технологических особенностей токамака-реактора ИТЭР омический пробой рабочего газа будет возможен для узкого диапазона значений давления нейтрального газа и ограниченного содержания примесей. Поэтому для ионизации рабочего газа на начальной стадии разряда в ИТЭР, для преодоления радиационного барьера и увеличения тока плазмы, предусмотрено использование электронно-циклотронного резонансного нагрева.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

XLVIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в России и странах СНГ. Она проходила уже в 48-й раз и собрала на свои заседания более 650 участников из научных центров России и других стран. Число российских (56) и иностранных организаций (11), представивших доклады на конференцию, стабильно остается на высоком уровне.

Уровень экспериментальных исследований, выполненных российскими учеными на крупных российских установках в области магнитного удержания горячей плазмы, пока еще достаточно высок, несмотря на физическое и концептуальное старение экспериментального и диагностического оборудования. В течение ряда лет в России отсутствует стратегическая национальная программа по управляемому термоядерному синтезу, в рамках которой развивались бы исследования одновременно на нескольких крупных установках УТС с параметрами плазмы близкими условиям термоядерного реактора, например, сверхпроводящие токамак, стелларатор, осесим-

метричная ловушка. Важным является также создание ряда средних плазменных установок в университетах для начального обучения студентов и подготовки аспирантов для работы с высокотемпературной плазмой. Отсутствие такой программы уже привело к отставанию российских научных центров, ведущих исследования по управляемому термоядерному синтезу и термоядерным технологиям на десятилетия от исследований по этим направлениям, ведущихся в технологически лидирующих странах.

С 2021 года в России началась реализация Комплексной программы Российской Федерации “Развития техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии на период до 2024 года”. Эта программа разработана в ГК РОСАТОМ при участии ведущих российских научных центров, финансируется как государственной корпорацией, так и государственным бюджетом РФ, она в значительной части стимулирует развитие ядерной энергетики и ядерных технологий и их широкое применение в экономике России. Важно, что в составе Комплексной программы имеется важная подпрограмма “Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий”, которая является верным шагом, направленным на преодоление научно-технического отставания России по управляемому термоядерному синтезу. Необходимо чтобы за ней последовали следующие шаги, которые в совокупности сформируют широкую национальную программу исследований по фундаментальным и прикладным направлениям физики плазмы. Следует иметь в виду, что в результате реализации программы международного проекта ИТЭР, разработанные новые технологии должны быть освоены российскими учеными и инженерами для их успешного применения в разработках российских промышленных термоядерных реакторов, что невозможно в отсутствие национальной программы по физике плазмы и УТС.

Современный мировой уровень лазерно-плазменных исследований требует создания в крупных научных центрах России, по крайней мере, двух конкурирующих мультитераваттных лазерных систем, направленных на решение проблемы ЛТС и смежных задач. Также целесообразно создать сеть из нескольких лазерных установок с меньшей мощностью, на которых было бы возможно проверять новые идеи и экспериментальные схемы, а также проводить отработку новых диагностик. Так эффективно работают научные программы стран Европы, Японии, Китая и США. В России стратегических долгосрочных планов строительства таких лазерных установок нет, и это ведет к дальнейшему отставанию наших научных исследований по ЛТС от уже достигнутого мирового уровня.

Работа выполнена в соответствии с государственными заданиями по темам “Физика высокотемпературной плазмы. Фундаментальные проблемы динамики, удержания и нагрева плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях” (0024-2019-0006) и “Фундаментальные основы плазменных и микроволновых технологий” (0024-2019-0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. “XLVIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу” 15–19 марта 2021 г., г. Москва. Сборник тезисов докладов. М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. 246 с. ISBN 978-5-6042115-4-0.
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVIII/Zven_XLVIII.html