

УДК 533.9

ИТОГИ И НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПО ФИЗИКЕ ПЛАЗМЫ, УПРАВЛЯЕМОМУ ТЕРМОЯДЕРНОМУ СИНТЕЗУ И ПЛАЗМЕННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ В РОССИИ В 2022 ГОДУ

© 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

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

Поступила в редакцию 20.06.2022 г.

После доработки 18.07.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Дан обзор новых наиболее интересных результатов, представленных на ежегодной XLIX Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся с 14 по 18 марта 2022 года в режиме online. Проведен анализ развития и достижений в основных направлениях исследований в области физики плазмы в России и их сопоставление с аналогичными работами за рубежом.

Ключевые слова: физика плазмы, термоядерный синтез, плазменные и лучевые технологии, международный проект ИТЭР, конференция, результаты

DOI: 10.31857/S0367292122600844

ВВЕДЕНИЕ

XLIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС) состоялась в режиме online с 14 по 18 марта 2022 года.

На конференции были представлены 180 научных докладов из 56 российских и 6 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, управляемому термоядерному синтезу, плазменным и лучевым технологиям. Общее количество участников и авторов докладов составило 607 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.

2. ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

На конференции состоялись пять пленарных заседаний, на которых было заслушано 12 обзор-

ных докладов о результатах отечественных и мировых исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям, а также по международному проекту ИТЭР (ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor). Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 168 устных докладов. Были также представлены доклады по смежным с физикой плазмы научно-техническим проблемам. Конференция проходила дистанционно.

5 июля 2021 года на 90-м году жизни скончался ученый с мировой известностью доктор физико-математических наук, профессор Лев Михайлович Коврижных (1931–2021). Участники конференции почтили его память докладом, который сделал В.А. Иванов (ИОФ РАН). В начале своего научного пути Лев Михайлович работал в области статистической теории взаимодействия волн в плазме. Он внес значительный вклад в развитие теории взаимодействия мощных электромагнитных волн с неоднородной плазмой и ускорение заряженных частиц в усиленном поле в области плазменного резонанса. Им были выполнены пионерские работы по устойчивости структуры винтовых магнитных полей в тороидальных магнитных ловушках с учетом давления удерживаемой плазмы и компенсации резонансных возмуще-

ний, в частности, в стеллараторах. Эти исследования привели к разработке новой концепции построения стеллараторных магнитных конфигураций, и полученные им результаты в настоящее время применяются во многих лабораториях мира, в которых работают современные стеллараторы. Л.М. Коврижных также был одним из создателей неоклассической теории переноса заряженных частиц и энергии плазмы в тороидальных магнитных системах. За эти работы в составе коллектива выдающихся ученых Л.М. Коврижных был удостоен Ленинской премии в 1984 году. Более 30 лет Л.М. Коврижных был председателем Программного комитета Международной Звенигородской конференции, руководил Научным советом РАН по физике высокотемпературной плазмы. Сообщество ученых, работающих в области физики плазмы, высоко ценит вклад в науку Льва Михайловича Коврижных, будет помнить его как прямого и доброжелательного человека в общении с коллегами и друзьями.

11 декабря 2022 года исполнилось бы 90 лет доктору физико-математических наук, профессору Владиславу Борисовичу Розанову, выдающемуся ученому в области ядерной физики и физики плазмы, одному из основоположников теории лазерного термоядерного синтеза. Доклад памяти В.Б. Розанова был сделан Г.А. Вергуновой (ФИАН). С 1956 по 1966 год В.Б. Розанов участвовал в реализации Атомного проекта СССР, и за эти научные исследования в составе коллектива ученых он был удостоен Ленинской премии в 1966 году. Позднее он внес значительный вклад в развитие работ в области физики мощных лазеров. Ему принадлежит одна из первых схем рентгеновского лазера, основанного на накачке активной среды за счет фотоионизации электронов из внутренних оболочек. Исследования В.Б. Розанова по изучению спектров излучения газовых разрядов и методов управления ими легли в основу разработки эффективных источников накачки для мощных лазеров различного типа. В.Б. Розанов также внес большой вклад в становление и развитие исследований в области лазерного термоядерного синтеза. При его основополагающем участии были созданы модели основных физических процессов в плазме, возникающих в условиях лазерного термоядерного синтеза. Он внес решающий вклад в разработку современной концепции создания мишени для лазерного термоядерного синтеза в виде многослойной сферической оболочки и выполнил цикл исследований по устойчивости сжатия такой мишени. В.Б. Розанов был автором пионерских работ по физике гибридного энергетического реактора синтез-деление при контролируемом инициировании ядерной реакции термоядерными нейтронами. Память о В.Б. Розанове будет храниться в сердцах его многочисленных учеников — специалистов в

области высокотемпературной плазмы и лазерного термоядерного синтеза.

Обзор ключевых проблем удержания плазмы с термоядерными параметрами в магнитных ловушках открытого типа с линейной осесимметричной конфигурацией содержался в докладе П.А. Багрянского (ИЯФ СО РАН). Для исследования путей решения этих проблем в настоящее время в ИЯФ СО РАН разрабатывается проект газодинамической многопробочной ловушки (ГДМЛ). Этот проект является развитием достижений, полученных на установках ГДЛ и ГОЛ-3. Вместе со специально сконструированными устройствами СМОЛА, ГОЛ-NB и КОТ этот проект создаст физическую основу для источников нейтронов на базе газодинамической ловушки, а также прототипа термоядерного реактора. ГДМЛ будет состоять из центральной секции, двух многопробочных секций и торцевых расширителей плазменного потока. Проект будет реализован в два этапа. Первый этап включает создание центральной секции с магнитными пробками и расширителями. Многопробочные секции заменят магнитные пробки на втором этапе строительства ГДМЛ. На первом этапе работы ГДМЛ будут проведены исследования подавления кинетических неустойчивостей, связанных с анизотропией горячих ионов, и МГД-неустойчивостей в линейных устройствах с осесимметричной конфигурацией. Предполагается изучить продольное удержание плазмы и роль газовых условий в расширителе, а также решить проблемы ограничения радиуса плазмы и тепловых нагрузок на лимитеры в таких системах. Кроме того, для проекта ГДМЛ обсуждается возможность реализации и исследования диамагнитного удержания.

Пленарный доклад Н.Г. Гусейн-заде (ИОФ РАН) был посвящен актуальной проблеме поиска новых эффективных способов приготовления и модификации катализаторов на основе порошков из окислов металлов с нанесенными микрочастицами платины. Эта проблема интересна в связи с расширением применения процессов гидрирования и дегидрирования в промышленности, в частности, для транспортировки водорода в форме так называемых жидких органических гидридов. Другой важной проблемой, рассмотренной в докладе, является снижение активности катализаторов со временем за счет отложения углеродных соединений на их поверхности, что требует разработки методов реактивации для раскоксовывания катализаторов. В докладе были приведены данные, касающиеся создания керамических микрочастиц (носителей для катализаторов) из оксидов алюминия (Al_2O_3) и кремния (SiO_2) с нанесенными на них наночастицами платины (Pt) в условиях плазмохимического процесса, при его инициации микроволновым излучением мощного импульсного гиротрона в смесях порошков ме-

талла и диэлектрика (Pt/Al_2O_3 , Pt/SiO_2). Опыты по дегидрированию циклоалканов в присутствии полученных образцов показали возможность их использования в качестве катализаторов химических процессов.

От имени коллектива авторов из ИСЭ СО РАН В.Ф. Тарасенко сделал пленарный доклад, посвященный вопросам экспериментального моделирования в лаборатории атмосферных разрядов типа “голубых струй” и “красных спрайтов”. Такие явления экспериментально наблюдаются в высотных атмосферных разрядах. Многие вопросы, касающиеся этих явлений, остаются неизученными. К ним относятся механизмы появления различных короткоживущих световых явлений и их взаимного влияния, а также природа цвета в наблюдаемых высотных разрядах. В докладе приведены результаты лабораторных исследований аналогичных явлений, проведенных в ИСЭ СО РАН. Было установлено, что на цвет министруй существенное влияние оказывает материал электродов независимо от полярности инициирующего импульса напряжения. Показано, что цвет плазмы в области министруи в большей степени соответствует цвету атмосферных разрядов (красных спрайтов и голубых струй), наблюдаемых на больших высотах, чем свечение диффузных разрядов в воздухе и азоте при том же давлении. Показано также, что использование электродов из алюминия окрашивает министруи в красный цвет, электроды из меди — в зеленый, а из железа — в голубой.

Вопросам проектирования в России токамака с реакторными технологиями (РТТ) был посвящен доклад А.В. Красильникова (Проектный центр ИТЭР). В докладе отмечалось, что токамак РТТ разрабатывается как полномасштабный прототип будущего чисто термоядерного реактора, а также термоядерного источника нейтронов для гибридного реактора. Многие технологии, необходимые для строительства термоядерного реактора, были разработаны в России во время реализации международного проекта экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Российская Федерация имеет право использовать в национальной термоядерной программе все технологии, созданные в рамках проекта ИТЭР. Но технологическая платформа ИТЭР не включает в себя все технологии, необходимые для создания термоядерного реактора, а именно, литиевую первую стенку, методы безиндуктивной генерации плазменного тока, высокотемпературные сверхпроводящие магнитные обмотки, технологические испытаний на радиационную стойкость компонентов реактора и ряд других технологий. Поэтому в России необходимо создать экспериментальную научно-технологическую базу — токамак с реакторными технологиями, которая позволит

разработать и интегрировать в одной установке ключевые технологии термоядерного реактора.

Современному состоянию строительства токамака ИТЭР был посвящен доклад Л.Н. Химченко и А.В. Красильникова (Проектный центр ИТЭР). В докладе отмечалось, что на данном этапе ИТЭР вступил в наиболее сложную фазу строительства — сборку токамака. Это потребовало перестроить систему управления. За основу графика работ на ИТЭР был принят график поставок оборудования с требованием беспрекословного выполнения этих поставок. При этом глобальный характер пандемии Covid-19 внес коррективы в темп строительства установки. К настоящему моменту Международная организация ИТЭР полностью ввела в строй здание ИТЭР и шахту, где будет собрана установка. В шахте установлен механизм юстировки и закреплены две нижних катушки полоидального поля — PF-6 и PF-5. Был собран первый секторный модуль (всего их будет девять), состоящий из сектора вакуумной камеры, на котором закреплены две сверхпроводящие катушки тороидального поля и тепловая защита. Точность сборки не хуже — 1.5 мм. В докладе также отмечалось, что особенностью данного этапа строительства является консолидация исследований высокотемпературной плазмы на ряде токамаков в мире для выполнения физической программы ИТЭР. Так, на токамаке WEST (Европейский союз) будут исследованы тепловые нагрузки высокого уровня, соизмеримого с нагрузками на первую стенку вакуумной камеры в диверторе ИТЭР. На токамаке JET (Европейский союз и Великобритания) будет исследована физика удержания альфа-частиц в эксперименте с дейтерий-третиевой плазмой. Исследования на токамаке EAST (КНР) будут направлены на получение длинного импульса при предельных параметрах плазмы. На токамаке DTT (Европейский союз и Италия) будут изучены в работе материалы дивертора, применяемые в ИТЭР. На вновь построенном и запущенном, самом крупном в мире, токамаке JT-60SA (Япония), основная программа исследований нацелена на получение предельных параметров плазмы и времени ее удержания.

Актуальный взгляд на применение термоядерного источника нейтронов для наработки топливных нуклидов был изложен в пленарном докладе Б.В. Кутеева и М.Н. Шленского (НИЯУ МИФИ, НИЦ “Курчатовский институт”). В докладе отмечалось, что вопрос обеспечения электроэнергией является ключевым для устойчивого развития современного общества. В мире наблюдается непрерывный рост потребления электроэнергии. Из существующих на сегодняшний день источников обеспечения электроэнергией ядерная энергетика является наиболее перспективной. Однако и в этой отрасли есть серьезные проблемы, связанные с ограниченностью ресурсной

базы. Для систем с открытым топливным циклом серьезной проблемой является накопление большого количества высокорadioактивных материалов. Развиваемые в ряде передовых стран ядерные системы с замкнутым топливным циклом (типа реакторов на быстрых нейтронах), обладают пока низким значением коэффициента воспроизводства топлива. В докладе было рассмотрено применение термоядерного источника нейтронов для наработки топлива из сырьевых пока неиспользуемых изотопов урана (U-238) и тория (Th-232). Термоядерные источники нейтронов могут решить проблемы ядерной энергетики, связанные как с истощением ресурсной базы, так и с распространением и хранением высокорadioактивного отработанного топлива. По мнению авторов доклада, для систем ядерной энергетики, состоящих из тепловых реакторов и гибридных систем синтез-деление (ГССД), предпочтительнее использовать уран-ториевый (U-Th) топливный цикл. В этом случае стоит протестировать новые составы ядерного топлива, содержащие протактиний (Pa-231). В случае наработки стартовых загрузок для быстрых реакторов, предпочтительнее использовать уран-плутониевый (U-Pu) топливный цикл, в рамках которого можно набирать в 2-3 раза больше топливных нуклидов, чем в случае U-Th цикла. Расчеты авторов показывают, что добавление в бланкет гибридных систем синтез-деление минорных актинидов позволит в несколько раз увеличить наработку ядерного топлива.

Вопросы, связанные с функционированием системы управления международной установкой ИТЭР, были рассмотрены в докладе И.Б. Семенова (Проектный центр ИТЭР). В докладе отмечалось, что система управления установкой ИТЭР, имеющая название CODAC (Control, Data Acquisition and Communication), разделена на два уровня управления: центральный (верхний) супервайзер, за создание которого отвечает Международная организация ИТЭР, и нижний локальный уровень управления, за который отвечают Национальные агентства. Супервайзер включает в себя центральное ядро системы управления (CODAC Core System), систему ядерной безопасности, систему блокировок и защит, систему управления плазмой и центральное вычислительное ядро, обеспечивающее работу установки в реальном времени. На нижнем уровне находятся более 130 технологических и диагностических подсистем установки. Системы управления базируются на компьютерных сетях с пропускной способностью 10–40 Гбит/с. При создании этих систем необходимо учитывать вопросы, связанные с их интеграцией в центральную систему управления на стадиях приемо-сдаточных испытаний на предприятиях изготовителях, непосредственно на площадке ИТЭР, во время запуска

установки, при получении первой плазмы. Кроме того, эта система должна решать проблемы электромагнитной и радиационной совместимости. Отдельно в докладе были рассмотрены вопросы интеграции и управления диагностическими комплексами установки в режиме удаленного доступа в рамках созданного в Проектном центре ИТЭР “Центра удаленного доступа”.

Обзор экспериментальных методов генерации и диагностики неидеальной плазмы и сильно разогретого плотного вещества, получивших развитие в последние годы, был представлен Г.Э. Норманом и И.М. Саитовым (ОИВТ РАН, НИУ ВШЭ, МФТИ (НИУ)). В докладе рассмотрены современные теоретические методы, применяемые для решения задачи о фазовых переходах флюид-флюид, включая плазменный фазовый переход. Особое внимание уделено фазовому переходу во флюидах водорода и дейтерия в области высоких давлений. Проанализированы многие экспериментальные работы в этой области исследований неидеальной плазмы, рассмотрено развитие химической модели плазмы при описании фазового перехода в плазме водорода. Также были представлены результаты по ионизации молекул при фазовом переходе во флюиде водорода. Особенность фазовых переходов, сопряженных с ионизационным или диссоциативным равновесием, позволила выдвинуть гипотезу о существовании двух классов фазовых переходов – диссоциативного и плазменного – с одинаковой топологией фазовых характеристик. Особое внимание было уделено сходству фазового перехода во флюиде водорода с плазменным фазовым переходом и отличиям от него. Три особенности являются прямым указанием на плазменный фазовый переход: 1) скачок плотности вещества, сопровождающийся резким увеличением электропроводности вследствие ионизации; 2) сильное перекрытие метастабильной и стабильной ветвей изо термы с возникновением области трехзначности зависимости давления P от объема V ; 3) отрицательный наклон линии сосуществования фаз на плоскости температура–давление ($T-P$).

Результаты экспериментов на плазменном релятивистском усилителе СВЧ-шума с инверсной геометрией были изложены в докладе А.В. Пономарева и Д.К. Ульянова (ИОФ РАН). Усилитель СВЧ-шума представлял собой плазменный мазер с инверсной геометрией взаимодействия трубчатого релятивистского электронного пучка и трубчатой плазмы, работающий в режиме усиления СВЧ-шума с минимизированной обратной связью при сильном подавлении СВЧ-излучения, отраженного от выходного устройства. Эксперименты проводились при двух длительностях импульса релятивистского электронного пучка (РЭП, ток 1.2 кА, напряжение 270 кВ). В этих случаях для разрыва обратной связи использовались

два различных механизма. При работе на ускорителе с длительностью импульса РЭП 50 нс в пространство взаимодействия помещался специальной формы СВЧ-поглотитель, а при длительности импульса РЭП 2 нс обратная связь была невозможна в силу того, что отраженная СВЧ-волна уже не могла усиливаться, так как импульс РЭП завершался до прихода отраженной СВЧ-волны. В обоих случаях был экспериментально получен режим усиления в сверхширокополосном режиме с широкой перестройкой частоты СВЧ-излучения от 3 до 24 ГГц при импульсной мощности СВЧ-излучения около 10 или 100 МВт в режимах с длинным и коротким импульсом, соответственно. Ток и ускоряющее напряжение РЭП были примерно одинаковы в обоих случаях.

В пленарном докладе С.И. Кудряшова (ФИАН) был дан обзор мультимасштабных динамических эффектов, исследуемых на малогабаритной лабораторной лазерной установке, генерирующей ультракороткие импульсы. Установка позволяет изучать широкий круг явлений, возникающих при взаимодействии субрелятивистских ультракоротких лазерных импульсов с веществом и плазмой. К таким явлениям относятся взаимодействие лазерного излучения с поверхностью материалов в режиме фемтосекундной лазерной абляции (ФЛА), сверхбыстрая термоэлектронная эмиссия с возникновением заряда на поверхности и эмиссией двойного плазменного слоя, сверхбыстрый транспорт горячих электронов и электрон-фононная релаксация, генерация мегабарных ударных волн в веществе и выброс сверхкритического флюида. Рассматривались применения ФЛА для ударно-волнового упрочнения материалов и формирования функциональных нано- и микроструктурных поверхностных покрытий.

О рекордных достижениях Ливерморской лаборатории им. Лоуренса (США) в области лазерного термоядерного синтеза сообщалось в докладе С.Ю. Гуськова (ФИАН). В докладе обсуждалось достижение рекордного выхода энергии импульса нейтронов в дейтерий-тритиевой реакции в эксперименте по непрямому облучению “термоядерной” капсулы импульсом лазерно-индуцированного рентгеновского излучения, который был проведен в августе 2021 года. Большое значение этого эксперимента состоит в том, что достигнутый выход термоядерной энергии 1.35 МДж не только значительно превысил прежние результаты этой установки, но и вплотную приблизился к затраченной лазерной энергии — энергия термоядерной реакции синтеза составила 70% от энергии лазерного импульса, которая в этом эксперименте была равна 1.93 МДж. В Ливерморской лаборатории эксперименты проводятся с использованием крупнейшей в мире лазерной установки NIF (длина волны 351 нм, энер-

гия в импульсе около 2 МДж в 192 лазерных пучках). Непрямое облучение является более энергозатратным, чем прямое облучение термоядерной капсулы непосредственно лазерными пучками. При непрямом воздействии на капсулу энергия лазерного излучения в системе конвертера типа “холь—раум” преобразуется в энергию рентгеновского излучения, которое воздействует в конечном итоге на капсулу. При этом эффективность конверсии лазерного излучения в рентгеновское составляет всего около 10% от энергии лазерного импульса. Команде, работающей на установке NIF, удалось улучшить работу лазерной установки, что привело к увеличению энергии лазерного импульса на 10% по сравнению со штатным режимом работы лазера. Также оптимизация параметров конвертера привела к заметному увеличению доли рентгеновского излучения, воздействующего на термоядерную капсулу. Эти физико-технические новации явились основными факторами, приведшими к достижению рекордного результата ЛТС.

3. МАГНИТНОЕ УДЕРЖАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

На секции “Магнитное удержание высокотемпературной плазмы” (председатель секции — А.И. Мещеряков) был представлен 61 доклад. Тематика докладов была связана, прежде всего, с исследованиями, проводимыми на действующих установках с магнитным удержанием плазмы, — это токамаки Глобус-М2, ТУМАН-3М, Т-11М, стелларатор Л-2М, открытые ловушки ГДЛ, ГОЛ-3, и открытая ловушка с винтовыми магнитными пробками СМОЛА. Кроме того на секции представлен ряд работ, связанных с экспериментами на вступившем в строй в 2021 году учебном токамаке МИФИСТ-0 (НИЯУ МИФИ).

Результаты, полученные на сферическом токамаке Глобус-М2, были представлены в серии работ, вызвавших большой интерес участников конференции. Этот интерес обусловлен проведенной недавно модернизацией магнитной системы токамака, которая позволила увеличить тороидальное магнитное поле установки в 2 раза, и исследовать удержание плазмы при магнитных полях, рекордных для сферических токамаков: до 1.0 Т. На токамаке Глобус-М2 был исследован нагрев электронной компоненты плазмы в режимах с инжекцией нейтральных частиц. Полученные результаты сравнивались с режимом омического нагрева плазмы. Эксперименты проводились в условиях, когда магнитное поле в токамаке составляло величину $B_T \leq 0.8$ Тл, плазменный ток $I_p \leq 0.4$ МА, а мощность нейтральной инжекции — $P_{NBI} \approx 390$ кВт. Была измерена и проанализирована зависимость энергосодержания электронной компоненты от средней концентрации электро-

нов в плазме в разрядах с дополнительным нагревом методом нейтральной инжекции, и в режимах с омическим нагревом. Была также проведена модернизация комплекса нейтронной диагностики токамака Глобус-М2. Увеличение тороидального магнитного поля токамака Глобус-М2 позволило существенно повысить нейтронный выход из плазмы за счет уменьшения потерь быстрых частиц, возникающих при инжекционном нагреве плазмы. Поэтому возникла необходимость реконструировать имеющийся на данный момент комплекс нейтронной диагностики. Исследованы разряды с инжекцией нейтрального дейтериевого пучка (D-пучка) в дейтериевую плазму (D-плазму), а также разряды с инжекцией D-пучка в водородную плазму (H-плазму). В первом случае рождение нейтронов в основном обусловлено протеканием ядерных реакций D–D-синтеза при взаимодействиях быстрых частиц с частицами основной плазмы (т.н. режим *beam-target*), а во втором случае – при взаимодействиях быстрых дейтериевых частиц друг с другом (т.н. режим *beam-beam*). На этом токамаке также проводились исследования потерь быстрых ионов, вызванных распространением тороидальных альфвеновских мод (ТАЕ), которые оказались достаточно высокими. В плазме сферических токамаков именно ТАЕ являются наиболее опасными из альфвеновских неустойчивостей. В другой работе с помощью трехмерного МГД-кода был проведен анализ устойчивости пилинг-баллонной моды в разрядах токамака Глобус-М2. Предварительные результаты, полученные при исследовании плазмы в токамаке Глобус-М2, показали, что эффективность дестабилизации краевых неустойчивостей посредством перезамыкания магнитных силовых линий имеет обратную зависимость от плазменного тока и температуры плазмы. При температуре электронов более 300 эВ вблизи магнитной поверхности с относительным радиусом 0.9 проникновение вглубь плазмы токового возмущения ограничено и не вызывает дестабилизации пилинг-баллонной неустойчивости.

Много интересных результатов, полученных на открытых магнитных ловушках, было представлено участниками из ИЯФ СО РАН. Были представлены результаты экспериментов по изучению взаимодействия электронного пучка с плазмой в установке “Газодинамическая ловушка” (ГДЛ). Для экспериментов была специально разработана электронная пушка со следующими параметрами пучка: энергия электронов 20–30 кэВ, ток 5–10 А, длительность пучка до 15 мс. Пушка была установлена в одном из расширителей ГДЛ, и позволяла вести инжекцию электронного пучка вдоль магнитного поля. Интересно, что в экспериментах с инжекцией электронного пучка в плазму может возникать популяция “го-

рячих” электронов с энергией, на порядок превышающей энергию электронов исходного пучка. Проведено экспериментальное и теоретическое изучение механизма генерации этих “горячих” электронов в плазме ГДЛ в экспериментах такого рода. Была локализована область, в которой происходит генерация “горячих” электронов, и предложен механизм их генерации. На установке ГДЛ были также проведены измерения электрического потенциала и ионной температуры различных компонент плазмы: основной ионной компоненты (водородной и дейтериевой) и компоненты примеси ионов гелия. Для измерения был использован спектроскопический метод CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy), основанный на перезарядке ионов плазмы на пучке инжектируемых атомов, представляющем собой искусственную мишень. Впервые были проведены измерения пространственного профиля амбиполярного потенциала в ГДЛ. Построена зависимость потенциала плазмы от электронной температуры.

В этом году на конференции был представлен ряд работ по исследованию самоорганизации плазмы в тороидальных магнитных ловушках. Эта тема является весьма важной, поскольку использование концепции самоорганизации плазмы позволяет описать явления теплопереноса в турбулентной плазме магнитных ловушек. Две работы были посвящены исследованию релаксации плазмы при ее вынужденном отклонении от равновесного состояния. В одной из работ (НИЦ Курчатовский институт) на токамаке T-10 исследовались режимы с насыщенным омическим удержанием (SOC), в которых достигается максимальное энергосодержание плазмы. Показано, что такой режим соответствует минимальному отклонению профиля давления от самосогласованного профиля. Экспериментально определен минимальный коэффициент теплопроводности плазмы, соответствующий каноническому профилю давления. Вторая работа была посвящена исследованию релаксации плазмы к каноническим профилям давления после выключения ЭЦР-нагрева на стеллараторе Л-2М (ИОФ РАН). Показано, что после выключения нагрева удержание плазмы переходит в режим, характеризующийся минимальными потерями энергии для каждого значения энергосодержания. При этом зависимость мощности потерь плазмы от энергосодержания имеет степенной характер ($P_{\text{loss}} \sim W^3$). Получен скейлинг для энергетического времени жизни плазмы на стадии после выключения ЭЦР-нагрева, и показано, что он весьма близок к скейлингу стелларатора Л-2М для квазистационарного режима.

Много работ на секции было посвящено новым установкам — токамакам Т-15МД и МИФИСТ-0, а также открытой ловушке ГОЛ-NB.

Работы с крупнейшего в России токамака Т-15МД, запущенного в НИЦ “Курчатовский институт” (большой радиус $R = 1.48$ м, малый радиус $a = 0.67$ м, аспектное отношение $A = 2.2$, тороидальное магнитное поле $B_{\text{тор}} \leq 2$ Тл, плазменный ток $I_{\text{pl}} \leq 2$ МА) были посвящены созданию и подготовке рабочих систем токамака, систем дополнительного нагрева плазмы, системы предварительной ионизации водорода, а также различных диагностических систем. Системы дополнительного нагрева плазмы, линии питания и охлаждения установки и другие технологические системы, обеспечивающие работу токамака, располагаются в одном зале с установкой, что существенно ограничивает пространство, доступное для размещения диагностик плазмы. Для оптимального расположения оборудования с учетом всех ограничений и требований безопасности создана трехмерная модель токамака и зала установки. Ее использование позволит обеспечить согласованное размещение необходимого оборудования и подведение технологических коммуникаций. Кроме того, она позволит реалистично оценить возможности ввода установки в эксплуатацию и последующего обслуживания размещенного оборудования, а также облегчит проектирование новых элементов.

На токамаке Т-15МД планируется использовать восемь гиротронов для ЭЦР-нагрева плазмы. Помимо своей основной задачи — нагрева электронной компоненты плазмы, гиротроны будут применяться в диагностических целях. Диагностика коллективного Томсоновского рассеяния (CTS — Collective Thomson Scattering) в токамаках и стеллараторах использует СВЧ-излучение гиротрона для получения физических данных об ионной составляющей плазмы. В отличие от стандартной диагностики томсоновского рассеяния, где рассеяние происходит на отдельных электронах, в случае CTS, рассеяние возникает на флуктуациях электронной плотности плазмы. Данная диагностика позволяет определять одномерную функцию распределения ионов, температуру ионов и изотопный состав плазмы.

На токамаке Т-15МД планируется также установка двойной диагностики плазмы с помощью пучка тяжелых ионов (Heavy Ion Beam Probe — НИБР): две аналогичные системы будут установлены в разных полоидальных сечениях, разнесенных на 90° по обходу тора. Такое расположение позволит изучать как полоидальные, так и тороидальные корреляции флуктуаций электрического потенциала плазмы и концентрации электронов.

Вступивший в строй в 2021 году токамак МИФИСТ-0 представляет собой учебно-демонстра-

ционный сферический токамак, созданный в НИЯУ МИФИ (большой радиус установки $R = 0.25$ м, малый радиус $a = 0.13$ м, параметр вытянутости $\delta = 2.0$, тороидальное магнитное поле $B_{\text{тор}} \leq 0.5$ Тл). Основная задача установки — обучение студентов и подготовка научных кадров для дальнейших работ на крупных установках. На этой установке создан токонесящий разряд, существующий в течение ~ 0.4 мс. Плазменный ток достигал величины $I_{\text{pl}} = 3$ кА, а плотность плазмы составляла 0.3×10^{13} см $^{-3}$. Проводятся работы по созданию новых диагностик для токамака МИФИСТ-0. В частности, созданы система измерения электронной плотности плазмы на основе гетеродинного интерферометра и анализатор потока нейтралов перезарядки.

Вступившая в строй установка ГОЛ-NB (ИЯФ СО РАН) была предложена как элемент физической программы создания открытой ловушки следующего поколения ГДМЛ. Полная длина ГОЛ-NB составляет около 10 м. Магнитная система ловушки включает центральную ловушку газодинамического типа (длина 2.5 м, магнитное поле в центре $B(z = 0) = 0.3$ Тл) и прилегающие секции сильного магнитного поля ($B_{\text{max}} = 4.5$ Тл). Секции сильного поля могут включаться либо в соленидальном режиме, либо в многопробочном режиме с тринадцатью периодами гофрировки магнитного поля (размер каждой гофры $l = 22$ см) и глубиной гофрировки $R_{\text{mm}} = 1.4$. Кроме того, в магнитную систему ловушки включены баки расщирителя магнитного потока, содержащие торцевые плазмодриемники. Низкотемпературная стартовая плазма с плотностью $n \sim (1-10) \times 10^{19}$ м $^{-3}$ и температурой $T \approx 5$ эВ создается при помощи дугового источника. Нагрев плазмы в центральной ловушке планируется осуществлять при помощи инжекции пучков нейтральных атомов водорода: два инжектора с энергией частиц 25 кэВ и мощностью каждого пучка 0.75 МВт.

Следует отметить работы, посвященные развитию технологий термоядерного топливного цикла в гибридных системах синтез–деление (ГССД). Программа развития ГССД, разрабатываемая в НИЦ “Курчатовский институт”, предусматривает создание стендовой базы для отработки технологий и их взаимной интеграции. Своевременное обеспечение специализированными стендами и квалифицированным персоналом позволит эффективно реализовать проект строительства гибридных реакторных установок (ГРУ) с тепловой мощностью до 500 МВт. Задачи текущего периода включают обоснование выбора технологий топливного цикла и гибридного blankets, а также техническое проектирование источника термоядерных нейтронов ТИН-К и ГРУ для тестирования технологий, материалов и компо-

нент ГССД. Работы координируются с федеральным проектом комплексной программы ГК Росатом “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года”.

По результатам работы секции, можно сделать вывод, что уровень экспериментальных работ, выполняемых на российских термоядерных установках, по-прежнему отстает от уровня работ, выполняемых в странах, технологически лидирующих в этой области. Тем не менее, в 2021 году в России завершено сооружение трех новых установок, которые уступают по размерам большим установкам, действующим в настоящее время в Европе, Японии, США и Германии. Это токамак Т-15МД, учебный токамак МИФИСТ-0 и линейная ловушка ГОЛ-NB. Кроме того, начата разработка концепции нового крупного токамака с реакторными технологиями (ТРТ), который предполагается построить в ТРИНИТИ. Российские ученые, работающие в области магнитного удержания высокотемпературной плазмы, возлагают большие надежды на уже созданные и создаваемые новые установки.

4. ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

По тематике секции “Инерциальный термоядерный синтез” (председатель секции Г.А. Вергунова) на конференции было представлено 19 устных докладов. Можно перечислить несколько основных направлений исследований в области инерциального термоядерного синтеза (ИТС). К ним относятся лазерный термоядерный синтез (ЛТС), мощные сильноточные импульсные разряды короткой длительности, физика высоких плотностей энергии в плазме, Z-пинчи, физические процессы в системах типа плазменный фокус, численное моделирование в указанных областях, а также смежные проблемы, на которых сосредоточены усилия российских научных коллективов, задействованных в данной области исследований.

На мощных электроразрядных установках в 2021 году проводились работы, направленные на увеличение выхода нейтронов, повышение мощности генерируемого мягкого рентгеновского излучения, расширение набора диагностических методов, используемых для исследований процессов в плазме, а также развитие физических моделей.

В экспериментах на мощной электрофизической установке Ангара-5-1 (АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”) при уровне разрядного тока до 4 МА была показана возможность двукратного увеличения пиковой мощности мягкого рентге-

новского излучения при сжатии вложенных проволочных сборок за счет оптимизации их конструкции, а также использования различных режимов магнитного сжатия возникающей плазмы. Последние эксперименты показали, что в экспериментах с вложенными сборками разработанной конструкции можно достигнуть прогнозируемого предела пиковой мощности мягкого рентгеновского излучения около 15 ТВт. На этой установке также были проведены эксперименты по исследованию спектральной прозрачности плазмы никеля, созданной при радиационной абляции тонких фольг под воздействием импульса рентгеновского излучения Z-пинча.

На установке плазменный фокус МОЛ (АО “ГНЦ РФ ТРИНИТИ”) проведены исследования динамики поступления примесей при разрядах в дейтерии при зарядных напряжениях до 12 кВ и разрядных токах до 700 кА с целью согласования источника питания и массовых характеристик токовой плазменной оболочки, образующейся при первичном пробое по поверхности межэлектродного изолятора. Установлено, что одним из факторов, препятствующих генерации термоядерных нейтронов в плазме установки, является присутствие в зоне сжатия плазмы ионов примесей углерода (С II – С IV), кислорода (О II), азота (N II), алюминия (Al II), и атомов меди (Cu I).

В МГТУ им. Н.Е. Баумана было проведено исследование механизмов ускорения ионов в Z пинчах. Исследование основывалось на численном решении уравнения Фоккера–Планка для дейтериевой плазмы, сжимаемой магнитным полем. Было показано, что в Z-пинче имеется механизм передачи энергии от магнитного поля напрямую к ионной компоненте, причем к ее высокоэнергетической составляющей. Основой этого механизма является наличие в Z-пинче МГД-неустойчивостей. Был проведен сравнительный анализ методов нагрева плазмы до термоядерных значений, который показал в некоторых режимах небольшое преимущество получения ядерных реакций синтеза в результате Z-пинчевого сжатия по сравнению с методами, используемыми в тороидальных установках.

В ФИАН было проведено исследование электрического взрыва тонких металлических проволочек в воздухе и в вакууме. Лазерное зондирование на двух длинах волн ($\lambda_1 = 1064$ нм и $\lambda_2 = 532$ нм) показало, что продукты взрыва состоят не только из пара вещества проволочек, как это полагалось ранее многими авторами. Они содержат значительное количество малых частиц с размерами менее ста нанометров, рассеяние на которых подчиняется рэлеевской зависимости от длины волны ($\sim \lambda^{-4}$).

В ФИАН был предложен новый способ формирования компактных торов в индуктивных на-

копителях. Энергия магнитного поля накапливалась в двух индуктивностях в виде многозаходных намоток, типа спирали Архимеда, размещенных на фланцах вакуумной камеры. Перед моментом достижения максимума тока в индуктивном накопителе плазма инжектировалась в этот объем, и затем ток принудительно обрывался с помощью взрывающихся проволочек. При обрыве тока в накопителе в плазме возникает замкнутый ток-виток, захватывающий большую часть магнитного потока (более 70%) и сохраняющий запасенную в магнитном поле энергию. Два формирующихся витка с одинаковым направлением тока начинают притягиваться друг к другу. При их столкновении происходит нагрев плазмы и вспышка мягкого рентгеновского излучения.

На конференции были представлены работы, направленные на совершенствование методов диагностики плазмы в системах ИТС. Были представлены результаты разработки нового численного кода, который позволяет автоматизировать процесс определения параметров плазмы по относительным интенсивностям свечения характерных линий высоко ионизованного атома аргона (ArXVII), что позволяет на два порядка снизить время, которое было необходимо для этого ранее.

В ФИАН продолжают работы по улучшению технологии изготовления мишеней для различных областей исследования лазерной плазмы, в том числе пористых мишеней и мишеней, содержащих малоплотные нанометровые металлические слои с плотностью в несколько раз меньше плотности сплошных материалов того же состава. Также были представлены результаты новых исследований по бесконтактному ускорению высокотемпературного сверхпроводящего носителя мишени с помощью кольцевой системы ВТСП-МАГЛЕВ. Полученные уникальные результаты позволяют перейти от макетных экспериментов к созданию опытного образца кольцевого ускорителя, что позволит существенно снизить габариты системы бесконтактной доставки топливных мишеней с дейтерий-третиевой смесью в вакуумную камеру, в которой на мишень будет воздействовать лазерное излучение и будут инициироваться термоядерные реакции.

На конференции также были представлены результаты исследований по фундаментальным проблемам физики плазмы и физики высокой плотности энергии в веществе, в частности, экспериментальные результаты процессов торможения тяжелых заряженных частиц в плазме. На базе линейного ускорителя тяжелых ионов ТИПр-1 в ИТЭФ были проведены эксперименты по торможению двухзарядных ионов железа (Fe^{+2}) с энергией 100 кэВ/а.е.м. в водородной плазме.

Работа секции “Инерциальный термоядерный синтез” была успешной и прошла на высоком на-

учном уровне. По итогам работы секции можно отметить прогресс в исследованиях физики высоких плотностей энергии в экспериментах с использованием мощных коротких лазерных импульсов и в экспериментах на мощных электрофизических установках, а также в исследованиях, проводящихся в интересах будущих экспериментов на мощных лазерных установках, ход строительства которых обсуждался на предыдущей конференции.

5. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

На конференции в рамках работы секции “Физические процессы в низкотемпературной плазме” (председатели секции В.С. Воробьев и Ю.А. Лебедев) было заслушано 35 устных докладов.

На секции были представлены результаты исследований в следующих основных направлениях: элементарные процессы и кинетические свойства газоразрядной низкотемпературной плазмы различных типов электрических разрядов (ВЧ, СВЧ-разряды, разряды постоянного тока, дуги, разряды в жидкостях), различные применения низкотемпературной плазмы, исследование плазмы, возникающей в импульсных процессах, физика плазмы при атмосферных процессах, промышленные и биомедицинские приложения низкотемпературной плазмы. При этом следует отметить, что многие доклады, были связаны с технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Все доклады можно разделить на две большие группы. Первая группа докладов связана с экспериментальными исследованиями разрядов, включая разработку новых и усовершенствование существующих методов диагностики плазмы. Вторая группа докладов связана с моделированием процессов в плазме и моделированием работы сложных плазменных систем. Ряд работ первой группы описывают результаты по исследованию плазмы, полученной с помощью СВЧ-излучения гиротронов. В частности, в ИПФ РАН проведены исследования по объемной генерации отрицательно заряженных ионов водорода (H^-) на базе квазигазодинамической плазмы импульсного электронного циклотронного резонансного (ЭЦР) разряда, поддерживаемого СВЧ-излучением гиротрона (частота излучения 28 ГГц), которые показали перспективность данного подхода и возможность получения пучков отрицательных ионов водорода с плотностью тока до 44 мА/см² в непрерывном режиме.

Были представлены результаты работы над проектом компактного источника нейтронов DARIA (Dedicated to Academic Research and Indus-

trial Application). Источник построен на базе линейного ускорителя протонов. Разработан метод и экспериментально исследована функция распределения электронов, вылетающих из плазмы ионного источника, созданного на основе ЭЦР-разряда с высоким удельным энерговыделением, работающим в газодинамическом (столкновительном) режиме, в широком диапазоне мощности греющего СВЧ-излучения и давления нейтрального газа. Также была произведена диагностика выходящего из плазмы излучения в СВЧ- и рентгеновском диапазонах, создаваемого этими же энергичными электронами. Были найдены оптимальные режимы развития кинетических неустойчивостей в плазме ЭЦР-разряда.

Геликонный разряд используется для создания плазмы в различных областях техники и технологии, от производства микросхем до плазменных ракетных двигателей. В НИЦ “Курчатовский институт” создана установка для изучения геликонного разряда, и представлены результаты серии модельных экспериментов по изучению зависимости параметров создаваемой плазмы от величины и профиля магнитного поля в области ВЧ-антенны. Плазма исследовалась методами лазерно-индуцированной флуоресценции и оптической эмиссионной спектроскопии. Результаты исследований позволили определить оптимальную конфигурацию геликонного разряда.

В последнее время особое внимание в мировой научной литературе уделяется исследованию электрических разрядов в жидкости и над ее поверхностью. Так, впервые (ИНХС РАН) представлена визуализация начальных стадий СВЧ-разряда в жидких углеводородах, которая позволила установить нестационарную структуру разряда, зависимость длительности единичных разрядов от СВЧ-мощности. Показано также, что ударная волна, распространяющаяся при возникновении разряда, возбуждает акустические колебания в объеме и над поверхностью жидкости.

В импульсном подводном разряде в растворе поливинилового спирта между электродами из Mo и Ti получены наночастицы оксидов металлов и полимерные нанокомпозиты (ИХР РАН). Такие продукты могут использоваться при разработке солнечных элементов нового поколения.

Безэлектродный плазменный ракетный двигатель (БПРД) является одним из наиболее перспективных претендентов на замену химическим двигателям для межпланетных перелетов. В докладе, представленном НИЦ “Курчатовский институт”, при помощи зондов Ленгмюра получены пространственные распределения плотности и электронной температуры плазмы в истекающем в магнитном сопле плазменном потоке, а также зависимости этих величин от конфигурации магнитных полей, расхода рабочего газа, величины

вводимой ВЧ-мощности. Полученные зависимости были подтверждены параллельными измерениями при помощи диагностик – лазерно-индуцированной флуоресценции, оптической эмиссионной спектроскопии и интерферометрии. Полученные результаты позволяют дать рекомендации о способе подачи рабочего газа, о величине и конфигурации магнитного поля для создания мощных БПРД.

Среди расчетных работ можно выделить доклад, посвященный определению потенциалов ионизации многозарядных ионов группы железа. В результате анализа экспериментальных данных, проведенных в ИПМ РАН, было получено аналитическое описание для расчета энергии ионизации многих ионов с погрешностью порядка одного процента.

Уравнения состояния и электронные коэффициенты переноса необходимы для решения самых разных фундаментальных и прикладных задач физики плазмы, возникающих в процессе электрического взрыва проводников, а также при взаимодействии излучения или потоков частиц с веществом. В настоящий момент времени накоплено много информации о свойствах различных веществ, находящихся при температуре выше 5 кК, что для металлов и полупроводников включает область т.н. низкотемпературной плазмы. Однако параметры плазмы, получаемой при нагревании вещества до температуры 5-100 кК, таковы, что такая плазма является неидеальной. В ОИВТ РАН разработана модель расчета теплофизических свойств низкотемпературной частично ионизованной плазмы (с нейтральной компонентой) в указанной выше области. Она построена на химическом подходе и в приближении времени релаксации. В докладе, представленном на секции, описаны результаты использования модели для получения информации о висмуте, для которого экспериментальные данные о теплофизических свойствах в диапазоне температур $T \sim 10^3$ –100 кК и плотностях ρ ниже нескольких г/см³ практически отсутствуют. Эти данные важны как с точки зрения фундаментальной физики, так и для приложений, поскольку висмут при высоких температурах применяется в устройствах ядерной энергетики.

Ракетные эксперименты с инжекцией высокоскоростных плазменных струй в ионосферу Земли проводятся с целью исследования процессов взаимодействия плазменных потоков с окружающей ионосферой, погруженной в геомагнитное поле. В ИДГ РАН проведено моделирование процессов, позволившее провести интерпретацию данных экспериментов “Флакрус” (высота 140 км) и “Северная звезда” (выше 270 км) для инжекции алюминиевых струй. Алгоритм расчета включает в себя: восстановление газодинамиче-

ских параметров инжектируемой плазмы в выходном сечении сопла генератора с использованием результатов измерений этих параметров в ближней зоне в наземных экспериментах; численное моделирование динамики плазмы струи после ее вылета из сопла генератора с восстановленным сценарием инжекции; и расчет характеристик излучения горячей плазмы алюминия (спектров, плотностей потоков излучения). Проведено сравнение результатов расчетов с данными измерений в ракетных экспериментах на бортовом модуле, с аппаратурными данными наблюдений с Земли, а также с датчиков спутника MSX.

Важной проблемой современной энергетики являются разработки подходов к решению комплекса задач водородной энергетики и, в частности, задачи получения водорода в низкотемпературной плазме. В ИНХС РАН разработана самоогласованная модель процесса получения водорода в плазме СВЧ-разряда в жидких растворах этилового спирта. Модель содержит балансные уравнения для нейтральных и заряженных газовых компонент плазмы, уравнение Больцмана для свободных электронов плазмы, уравнение для среднего СВЧ-поля в малом объеме, заполненном плазмой, и уравнение для температуры газовой смеси. Модель включает положительно и отрицательно заряженные ионы: H_2O^+ , H_3O^+ , H_5O_2^+ , $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})$, $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_2$, $\text{H}_3\text{O}^+(\text{H}_2\text{O})_3$, O_2^+ , CH_3O^+ , $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}^+$, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}^+$, CH_3^+ , C_2H_3^+ , H^- , O^- , OH^- , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}^-$, CO^- . Проведенные расчеты позволяют проанализировать роль различных реакций в процессах диссоциации молекул в смеси, процессы образования нейтральных продуктов, в частности водорода, а также явления образования и гибели отрицательно и положительно заряженных частиц.

В целом, работа секции “Физические процессы в низкотемпературной плазме” была успешной. Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России, которые в ряде случаев являются пионерскими.

6. 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 38 устных докладов. Обсуждались результаты исследований, проводимых в институтах РАН, вузах СНГ и других ведущих научных центрах России.

Были заслушаны доклады, представляющие широкий спектр направлений по развитию плазменных технологий. Наибольшее число докладов было посвящено развитию технологий создания новых веществ в твердом или газовом состоянии,

модификации поверхности материалов и созданию конкретных объектов для производства веществ при использовании плазмы. Как всегда, большое количество докладов было посвящено генерации СВЧ-волн в различных системах и воздействию на поверхность мощными (в том числе высокоэнергетичными) электронными и ионными пучками. Увеличилось число докладов, посвященных исследованию космического пространства, включая разработку различных вариантов электроразрядных двигателей для спутников и анализ свойств ионосферы. Уменьшилось число докладов, посвященных плазменной аэродинамике – воздействию разрядов на газовые потоки.

Большое число докладов было посвящено проблемам генерации СВЧ-излучения и создания сильноточных электронных пучков. Коллективами авторов из ТРИНИТИ и РУДН проводились исследования плазменного мазера на основе трубчатого релятивистского электронного пучка (РЭП) в режиме усиления шума. В режиме одиночных импульсов подобный мазер генерировал излучение мощностью до 400 МВт при КПД по отношению к энергии импульса РЭП до 26%. При импульсной работе с частотой 100 Гц и при длительности тока РЭП 2 нс от импульса к импульсу происходил сдвиг спектра излучения в сторону высоких частот, расширение полосы генерируемых частот, и одновременно наблюдалось уменьшение выходной СВЧ-мощности. В ИОФ РАН традиционно проводятся исследования плазменных релятивистских СВЧ-генераторов на основе РЭП. В этом году был представлен доклад, посвященный широкополосному излучению плазменного релятивистского генератора на основе РЭП с длительностью микроволнового импульса 300–500 нс для области частот 1–5 ГГц. Такой источник сверхширокополосного излучения является генератором шума. Энергия шумового импульса такого источника достигает 15–20 Дж. В другом докладе группы исследователей этой же лаборатории были представлены исследования, выполненные на этой же установке, работающей уже в режиме плазменного усилителя импульсного СВЧ-излучения. Проводились исследования подавления обратной связи (отраженной от выходного устройства СВЧ-волны) путем подбора оптимальных поглотителей и величины внешнего магнитного поля, что необходимо для получения оптимального режима усиления СВЧ-импульса. В результате исследований удалось получить стабильный уровень энергии выходного СВЧ-излучения в каждом импульсе с эффективностью около 10% в широком диапазоне значений плотности плазмы в $\Delta n_p/n_p = 0.5$ (n_p – значение оптимальной плотности плазмы, при которой достигается максимальная эффективность трансформации энергии РЭП в энергию СВЧ-импульса). В этом диапазоне значений

плотности плазмы частота усиленного сигнала совпадает с частотой входного СВЧ-сигнала на частоте $f_0 = 2.715$ ГГц с точностью 1 МГц, а ширина спектра усиленного СВЧ-сигнала, определенная по ширине на полувысоте спектральной линии, составила 4–6 МГц, что близко к естественной ширине линии 4 МГц.

Коллективом авторов ИЯФ СО РАН и НГУ представлены результаты экспериментальных исследований механизмов генерации субмиллиметрового СВЧ-излучения (0.1–0.5 ТГц) при коллективной релаксации РЭП (энергия электронов 0.6 МэВ, ток 15 кА, длительность импульса 3 мкс) на специализированной установке ГОЛ-ПЭТ. В новых экспериментах импульс СВЧ-излучения был удлинён до 4-х мкс, и плотность тока пучка составляла (1–2) кА/см². В результате в плазме удалось создать радиальные градиенты плотности, способствующие прямой накачке пучком электромагнитных волн в плазме. Кроме того, была сформирована область с низкой плотностью плазмы на участке плазменного столба со спадающим вдоль оси магнитным полем в окрестности графитового коллектора, поглощающего прошедший через плазму пучок. В этих экспериментах удалось достигнуть прогресса по энергии в импульсах СВЧ-излучения с длиной волны 1 мм.

В НИЦ “Курчатовский институт” в экспериментах на сильноточном генераторе РЭП “Катран” (напряжение в импульсе ~250 кВ, ток пучка 50–150 кА, длительность импульса ~60 нс) наблюдалось формирование сверхэнергетичных электронов. Ранее в этом же генераторе было обнаружено, что энергия отдельных ступок ионов может в несколько раз превышать приложенное напряжение импульсного генератора, умноженное на ионный заряд. Авторы считают наиболее вероятным, что ускорение ионов до энергии 850 кэВ/нуклон в зазоре катод-анод генератора связано с развитием перетяжки в плазме или происходит в результате разрыва токового канала, приводящего к появлению сильного вихревого электрического поля. Электроны в таком поле могут приобретать энергию, существенно превосходящую разность потенциалов в высоковольтном диоде, умноженную на электрический заряд иона. Экспериментальное измерение энергии электронов по тормозному гамма-излучению показало наличие небольшой доли сверхэнергетичных электронов.

Вызвал интерес цикл докладов из ИОФ РАН, посвященный экспериментам на плазмохимическом реакторе ГР-1. В экспериментах исследовалось взаимодействие мощных импульсов СВЧ-гиротрона с плазмой в присутствии смеси диэлектрического порошка окиси алюминия (Al₂O₃) и порошка платины. Были измерены коэффициенты поглощения СВЧ-излучения в сме-

си порошка металл-диэлектрик, что может служить качественной характеристикой при анализе процессов, протекающих в плазмохимическом реакторе. С использованием высокоскоростных камер исследовались параметры разлета частиц при плазмохимическом синтезе материалов, которые являются основой для проведения модельных расчетов. Важной характеристикой протекающих процессов также являются размеры частиц и светящихся областей. Имеющиеся диагностики позволили получить проекцию движения микрочастиц в одной плоскости. Скорость движения частиц определялась по смещению светящихся точек в кадре по предполагаемой траектории. Для разных режимов работы реактора величина скорости составляла от 1 до 45 м/с. В ходе экспериментов некоторые реакционные частицы в начальный момент времени были окружены светящимся ореолом с характерными размерами 1–2 мм. Данные образования (микрочастица-ядро и ореол) движутся совместно с ядром и распадаются за время от 1 до 20 мс. В то же время светящиеся частицы движутся по сложным траекториям и светятся на протяжении долгого времени. В зависимости от состава реакционной смеси время послесвечения микрочастиц может составлять до 0.5 сек.

Большим коллективом авторов из ИОФ РАН, ИПФ РАН, ИММ им. А.А. Байкова РАН, и РТУ МИРЭА был представлен доклад, где обсуждались микроволновые имитационные эксперименты по осаждению на металлические пластины заряженных частиц, имитирующих “левитирующую” пыль на Луне (реголит). Ансамбли заряженных частиц создавались над поверхностью смеси порошков реголита при воздействии СВЧ-излучения импульсного гиротрона на порошок. При этом в слое реголита и над ним развивались такие нелинейные физико-химические процессы, как микроволновой пробой, цепные плазмохимические реакции, разлет частиц по кулоновскому механизму. В результате над поверхностью порошка возникало левитирующее облако заряженных частиц, повторяющих лунную пыль по составу и распределению по размерам.

Еще один доклад с реактора ГР-1 (ИОФ РАН, ИММ им. А.А. Байкова РАН, ИБХ им. академик М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН, РТУ МИРЭА) был посвящен возможности синтеза платиновых катализаторов в микроволновом подпороговом разряде. Взаимодействие частиц порошка с плазмой подпорогового СВЧ-разряда приводит к испарению вещества, модификации поверхности частиц и протеканию плазмохимических реакций. Существует порог интенсивности СВЧ-излучения, ниже которого не удается инициировать разряд в атмосферном воздухе. В данных экспериментах сфокусированное СВЧ-излучение направляется на специальный инициатор разряда, и, далее начинает развиваться

СВЧ- разряд, распространяющийся по пучку в сторону источника излучения. Температура газа в разряде достигает 6000 К, а плотность плазмы 10^{17} см⁻³. Результаты первых экспериментов со смесью порошков окиси алюминия Al_2O_3 и платины Pt показали, что взаимодействие частиц порошка с плазмой подпорогового микроволнового газового разряда приводит к покрытию микрочастицы носителя (Al_2O_3) наночастицами платины.

Работы по исследованию электроразрядных двигателей для космических аппаратов проводились в МГУ. В работе рассмотрена организация полетов космических аппаратов на низких околоземных орбитах (180–200 км), открывающих перспективы для развития телекоммуникаций, транспортных операций и широкого круга научных исследований. В качестве модели ВЧ ионных источников использовался индуктивный источник диаметром 5 см. На индуктивный ВЧ-разряд накладывалось внешнее магнитное поле, величина которого выбиралась из условия получения максимального ионного тока. Предварительные измерения показали, что замена ксенона на аргон и воздух сопровождается понижением величины ионного тока, получаемого при заданной мощности ВЧ-генератора, и повышением “энергетической цены” ускоренного иона. Тем не менее, из полученных экспериментальных результатов следует возможность использования атмосферных газов в качестве рабочего тела двигателя космического аппарата. Результаты экспериментов сопоставлены с расчетами.

Доклады, заслушанные на секции, были выполнены на высоком уровне и вызвали интерес слушателей. По сравнению с предыдущим годом, число докладов заметно возросло. Работа секции в целом показала, что в области плазменных и пучковых технологий ведется активная исследовательская работа, продолжается рост числа работ, имеющих технологическую направленность. По сравнению с конференциями, которые проходили несколько лет назад, произошло дальнейшее увеличение числа экспериментальных докладов (29 из 38). Такое соотношение обусловлено тем, что начались исследования новых технологических процессов, для которых нужно построение новых теоретических моделей, или модификация уже существующих. Разработка таких моделей требует времени.

7. ПРОЕКТ ИТЭР. ШАГ В ЭНЕРГЕТИКУ БУДУЩЕГО

На сессию “Проект ИТЭР. Шаг в энергетику будущего” (председатель секции А.В. Красильников) в этом году было представлено 16 докладов. Запуск самой большой в мире экспериментальной термоядерной установки ИТЭР должен состояться в 2025 году. Доклады были посвящены

состоянию работ по созданию систем ИТЭР, разрабатываемых и изготавливаемых в России.

В ИЯФ СО РАН с 2013 года ведутся проектные работы по изготовлению диагностического оборудования для установки ИТЭР. В перечень разрабатываемого оборудования входят: проектирование и интеграция верхних диагностических портов №№ 02, 07, 08, и экваториального диагностического порта № 11. В качестве основного разработчика, изготовителя и поставщика ИЯФ СО РАН участвует в создании двух вертикальных нейтронных камер (верхняя и нижняя), диверторного монитора нейтронного потока, анализатора атомов перезарядки. За прошедший год были успешно проведены защиты финального проекта для интеграции экваториального порта № 11, диверторного монитора нейтронного потока и вакуумной части анализатора атомов перезарядки. По всем перечисленным выше объектам ведется активная работа. Часть проектов уже находится в стадии производства.

В ИЯФ СО РАН также проводились исследования прототипа инжектора высокоэнергетичных нейтралов с первичным ускорением отрицательных ионов водорода. В созданном прототипе пучок отрицательных ионов от высокочастотного поверхностно-плазменного источника ионов сначала ускоряется в источнике до энергии 120 кэВ, затем транспортируется через секцию с отклоняющими магнитами, где очищается от сопутствующих частиц и фокусируется на вход ускорителя, который осуществляет дальнейшее ускорение пучка до полной энергии 0.4–1 МэВ. Далее ускоренный пучок отрицательных ионов конвертируется в пучок высокоэнергетичных атомов в камере нейтрализатора, и, далее, сепарирующим магнитом отделяется от сопутствующих положительных и отрицательных ионов. На данном этапе планируется получение пучка отрицательных ионов с током около 1 А и ускорение ионов до энергии 0.34 МэВ.

В ИЯФ СО РАН были исследованы механические, тепловые и вакуумные свойства поставочной партии керамики карбида бора для защиты диагностических портов ИТЭР. Первая партия спеченной керамики карбида бора была изготовлена ООО “Вириал”. Керамика будет собрана в защитные кассеты, и затем эти кассеты будут установлены в экваториальном порту № 11 ИТЭР.

В Проектном центре ИТЭР в 2021 году проводились работы по развитию аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства (АИП ИКП) как инструмента интеграции исследований в области УТС. Эта платформа обеспечивает для исследователей возможность участия в дистанционных экспериментах в области УТС-исследований: получение и отображение научной информации, в

том числе экспериментальных данных, тематических публикаций, справочной информации, проведение дистанционных совместных исследований и предоставление иных научных и телекоммуникационных сервисов для участников отечественного УТС-сообщества. В докладе были продемонстрированы возможности развития АИП ИКП как инструмента интеграции отечественных и мировых УТС-исследований с учетом стандартов и подходов, принятых в мировой практике, в том числе в Международной Организации ИТЭР (МО ИТЭР).

В Проектном центре ИТЭР создан Российский центр удаленного участия в экспериментах на установке ИТЭР. На его основе проводились совместные с МО ИТЭР работы по отработке технологий и принципов дистанционного участия в эксперименте для других участников проекта. Проведены исследование протоколов, методов и каналов передачи данных через существующие общедоступные сети с целью выработки стратегии подключения к системе сбора данных ИТЭР и тестирование различных интерфейсов удаленного доступа к данным ИТЭР. Были созданы элементы доступа к системе сбора данных ИТЭР в режиме реального времени и создания эффекта присутствия на установке через шлюз EPICS. Кроме того, протестированы различные инструменты для удаленного участия, которые планируются к использованию в рамках проекта ИТЭР, — такие как совместное использование экрана, просмотр данных из Российского центра удаленного участия в МО ИТЭР при расстоянии около 3000 километров. В результате выполнения этих работ российской организацией ЧУ “Проектный центр ИТЭР” со стороны МО ИТЭР сформулированы требования к подобным подключениям для всех партнеров международного проекта. Благодаря этой работе Российская Федерация стала одной из первых стран участниц проекта ИТЭР, обеспечивших прямое подключение к технологическим данным ИТЭР.

В НИУ МЭИ на квазистационарном плазменном ускорителе КСПУ-Т проводились испытания опытных образцов теплозащитной облицовки купола дивертора ИТЭР плазменными потоками. Установка КСПУ-Т позволяет создавать плазменные потоки с длительностью импульса около 1 мс и с тепловой нагрузкой на облучаемые образцы $0.2\text{--}5\text{ МДж/м}^2$, что сопоставимо с условиями переходных процессов в ИТЭР. В связи с этим КСПУ-Т используется для ресурсных испытаний защитных покрытий и исследования механизмов эрозии. Было проведено две серии экспериментов по облучению плоских вольфрамовых образцов как без магнитного поля, так и с магнитным полем величиной около 0.6 Тесла. Измерены профили и оптические изображения поверхности облученных образцов, проведен анализ результа-

тов экспериментов, и выполнена экстраполяция данных на условия ИТЭР.

В другом докладе с КСПУ-Т были представлены результаты экспериментального исследования поведения алюминия и коррозионно-стойкой стали под действием мощных потоков излучения плазмы с параметрами, характерными для ослабленного плазменного срыва установки ИТЭР. В работе было показано, что такое облучение коррозионно-стойкой стали марки 316L(N)-IG (предполагаемой для использования в качестве обращенного к плазме материала диагностических патрубков ИТЭР) приводит к образованию на поверхности образца регулярной волнообразной структуры с горбами и впадинами с характерным масштабом вдоль поверхности 1–3 мм.

В ФТИ РАН в настоящее время идет разработка комплекса атомных анализаторов, включенных в перечень приоритетных диагностик для международного термоядерного реактора ИТЭР. Анализ потоков атомов является одним из основных методов диагностики ионной компоненты высокотемпературной плазмы. Этот метод обеспечивает возможность изучения как ионной функции распределения, так и соотношения концентраций изотопов водорода в плазме. На конференции был представлен доклад, посвященный изучению возможностей использования этой диагностики потоков атомов из плазмы для исследования параметров плазмы и дополнительных методов нагрева на проектируемой новой российской плазменной установке “Токамак с реакторными технологиями” (ТРТ). Выполнено численное моделирование проникновения нейтральных пучков атомов в плазму ТРТ, и на основе этого расчета получена функция источника быстрых дейтронов. Также произведены расчеты пространственной, энергетической и угловой зависимости функции распределения по скоростям дейтронов в плазме с учетом эффектов замедления и диффузии в пространстве скоростей в результате кулоновских столкновений с электронами и ионами фоновой плазмы. Сделаны оценки популяции быстрых ионов, возникающих при введении в плазму ВЧ-мощности на частоте ионно-циклотронного резонанса. На основе полученных результатов и данных о пространственном распределении плотностей мишеней нейтрализации проведены расчеты энергетических распределений и интенсивности потоков вылетающих атомов перезарядки вдоль линий наблюдения анализаторов. Получены соответствующие скорости счета атомов в различных диапазонах их энергий.

В ФТИ РАН также ведутся работы по созданию диагностики томсоновского рассеяния в диверторе реактора ИТЭР. Дивертор ИТЭР — наиболее энергонапряженный и потому самый критический элемент любого токамака-реактора.

Именно поэтому необходимо уделять внимание изучению пристеночной плазмы, взаимодействию плазма-стенка, исследованию и контролю рециклинга водорода, контролю режима с полным или частичным отрывом плазмы, характеризующегося существенным снижением тепловой нагрузки на пластины дивертора. Всю совокупность плазменных параметров в районе X-точки, их изменения от X-точки вдоль сепаратрисы до наружной диверторной мишени и вдоль поверхности наружной диверторной пластины было предложено измерять с помощью совмещенной лазерной диагностики томсоновского рассеяния и лазерно-индуцированной флуоресценции. Важная функция этих диагностик заключается в проверке модельных расчетов поведения плазмы в диверторе ИТЭР и ее отрыва от диверторных пластин.

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

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. XLIX 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 49-й раз и собрала на свои заседания более 600 участников из научных центров России и других стран. Число российских (56) организаций, представивших доклады на конференцию, стабильно остается на высоком уровне. Были представлены доклады из 6 иностранных научных центров. Заметно снизилось число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными совместно с учеными ведущих иностранных научных центров, что обусловлено известными событиями в мире.

2. На конференции были представлены 16 приглашенных докладов (8% от общего числа докладов), которые были посвящены актуальным проблемам физики плазмы и УТС.

3. Конференция способствовала решению научных проблем по направлениям: магнитное удержание высокотемпературной плазмы, инерциальный термоядерный синтез, физические процессы в низкотемпературной плазме, физические основы плазменных и лучевых технологий, реализация международного проекта ИТЭР. Ежегодно происходящий обмен информацией и опытом между учеными России, стран дальнего и ближнего зарубежья способствует установлению и поддержанию научных контактов между науч-

ными центрами, занимающимися близкими проблемами.

4. Доля представленных на конференции работ, связанных с научными задачами управляемого термоядерного синтеза на основе магнитного удержания высокотемпературной плазмы, составила около 33%. Уровень экспериментальных исследований российских ученых на российских установках в области магнитного удержания горячей плазмы несколько отстает от работ, выполняемых в лидирующих мировых центрах. Это обусловлено физическим и концептуальным старением имеющегося 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, сопоставимыми с параметрами термоядерного реактора, например, крупный токамак или крупный стелларатор с магнитными полями на основе сверхпроводящих материалов. Проекты таких установок имеются, но их реализация задержалась по крайней мере на 20 лет. Важным является также создание ряда установок с магнитным удержанием плазмы среднего масштаба в университетах для начального обучения студентов и аспирантов, а также для наработки экспериментального опыта и подготовки высококвалифицированных научных сотрудников для работы с высокотемпературной плазмой на технически современных установках УТС в России и МО ИТЭР. Отсутствие такой национальной программы уже привело к отставанию ряда российских научных центров, работающих в области управляемого термоядерного синтеза, от исследований, ведущихся в технологически лидирующих странах.

5. С 2021 года в России реализуется «Комплексная программа развития техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии на период до 2024 года». Эта программа, разработанная в ГК РОСАТОМ при участии ведущих российских научных центров, финансируется как государственной корпорацией, так и государственным бюджетом РФ. Программа в своей значительной части стимулирует развитие ядерной энергетики, ядерных технологий и их широкое применение в экономике России. В Комплексную программу входит подпрограмма «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий». Эта подпрограмма является первым и важным шагом, направленным на сокращение отставания и последующее развитие технологий, определяющих развитие работ по управляемому термоядерному синтезу. Необходимо, чтобы за этим шагом последовали следующие шаги, которые привели бы к формированию национальной

программы исследований по управляемому термоядерному синтезу, а также по фундаментальным и прикладным направлениям физики плазмы. Важно иметь в виду, что в результате реализации с участием России международного проекта ИТЭР разработанные новые технологии и результаты исследований должны быть освоены российскими учеными и инженерами для применения в российских промышленных термоядерных реакторах, что невозможно в отсутствие национальной программы по физике плазмы и УТС.

6. Доля представленных на конференции докладов, посвященных проблемам инерциального термоядерного синтеза (ИТС), включая лазерный термоядерный синтез (ЛТС), составила около 10%. В течение ряда лет на ежегодных конференциях снижается доля докладов, в которых представляются результаты экспериментальных исследований в этой области физики плазмы, в том числе и работы по лазерному термоядерному синтезу. России целесообразно было бы присоединиться к крупным международным программам, которые успешно развиваются, прежде всего, в Европейском союзе, что позволило бы участвовать российским ученым в исследованиях на современных научных установках с участием коллектива ведущих мировых ученых, и достаточно быстро преодолеть технический и научный отрыв от ведущих стран. Но в виду осложнившихся связей международных научных центров с Россией, такие исследования пока невозможны, и это приведет к дальнейшему отставанию наших научных исследований по ЛТС от уже достигнутого мирового уровня. Для преодоления отставания в России необходима также национальная программа строительства сети лазерных установок. Для организации современных лазерно-плазменных исследований мирового уровня требуется создание в крупных научных центрах России, по крайней мере, двух сопоставимых мультитераваттных лазерных систем с рекордными параметрами по мощности и энергии импульса лазерного излучения. Эти исследования должны иметь конечную цель – решение проблемы лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) и смежных задач. Также целесообразно создать в ведущих университетах и научных центрах России несколько лазерных установок с энергетикой на порядок ниже рекордной, но с возможностями гибко варьировать параметры лазерного излучения. На этих установках было бы возможно проверять новые идеи и экспериментальные схемы взаимодействия лазерного излучения с веществом и плазмой, а также проводить отработку новых диагностик, которые будут необходимы для успешной работы крупных установок ЛТС. Именно так весьма эффективно работают научные программы по ЛТС в технологически развитых странах Европы, Японии, США и Китая.

7. На конференции доля научных докладов, посвященных фундаментальным и прикладным исследованиям в области физики низкотемпературной плазмы, технике плазменных исследований и физическим основам плазменных технологий составила около 40%. За последние несколько лет увеличился интерес к этим научным исследованиям среди молодежи, принявшей участие в работе конференции. Это связано с тем, что эти работы, часто выполняемые на небольших низкобюджетных установках в университетах и научных институтах, позволяют студентам, аспирантам и молодым научным сотрудникам проявлять инициативу и выполнять в короткий срок самостоятельные исследования по физике и технике плазмы. Такие работы, как правило, поддерживались с 1994 года в течение 26 лет Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), статус которого и тематика поддерживаемых научных исследований были кардинально изменены в 2020 году. Созданный в 2013 году Российский научный фонд (РНФ) с другой структурой финансирования проектов пока не в состоянии широко поддерживать исследования по физике плазмы.

8. Доклады по работам, успешно выполняемым российскими учеными и инженерами по проектированию и изготовлению оборудования, а также по реализации диагностических комплексов для международного проекта ИТЭР в рамках ответственности России, составили около 9% от общего числа представленных на конференции докладов.

Оргкомитетом конференции издана книга “XLIX Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу” Сборник тезисов докладов. М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. 230 с. ISBN 978-5-6042115-6-4. Материалы конференции также размещены на сайте конференции http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIX/Zven_XLIX.html.

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. “XLIX Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу” 14–18 марта 2022 г., Москва. Сб. тез. доклад. М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН. – 230 с. ISBN 978-5-6042115-6-4.
2. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLIX/Zven_XLIX.html