

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.9

Развитие исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу в России в 2003 году

В. А. Иванов, М. Л. Нагаева

Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Россия

Даны обзор научных работ и анализ основных направлений исследований, представленных в докладах на ежегодной XXXI Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС), состоявшейся в г. Звенигороде с 16 по 20 февраля 2004 г.

Ежегодная XXXI Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу состоялась в г. Звенигороде с 16 по 20 февраля 2004 г. Конференция была посвящена 85-летию со дня рождения профессора М. С. Рабиновича (1919—1982 гг.) и 95-летию со дня рождения академика Л. А. Арцимовича (1909—1973 гг.)

При открытии конференции председатель Научного совета РАН по физике плазмы проф. Л. М. Коврижных отметил, что 20 февраля исполнилось бы 85 лет со дня рождения М. С. Рабиновича, который был инициатором этой конференции и 10 лет — ее председателем. Кроме того, он был создателем Совета по физике плазмы и основателем журнала “Физика плазмы”, и, как мы видим, это сейчас существует и работает. И все это благодаря плодотворной деятельности М. С. Рабиновича. А на 10 лет раньше, 5 февраля 1909 г., родился Л. А. Арцимович — замечательный человек, великий ученый, один из организаторов нашего термоядерного сообщества и по существу всей термоядерной программы СССР, но не России, потому что сейчас у нас такой программы фактически нет.

Памяти и выдающимся заслугам этих замечательных ученых были посвящены две первые лекции, которые были прочитаны на конференции ученым секретарем Научного совета по физике плазмы РАН, канд. физ.-мат. наук Д. К. Акулиной и проф. В. С. Стрелковым.

В докладе Д. К. Акулиной отмечалось, что Матвей Самсонович Рабинович — известный физик, крупный ученый в области ускорителей заряженных частиц, физики плазмы, УТС. Доктор физ. мат. наук, профессор. М. С. Рабинович родился в 1919 в г. Казани. Он учился в знаменитой 110-й московской школе, которую окончил с золотой медалью. Среди соучеников по школе Матвея Самсоновича были выдающиеся впоследствии люди, среди них лауреат Нобелев-

ской премии академик А. Д. Сахаров. После окончания школы М. С. Рабинович поступил на физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ). Это было бурное время развития новых направлений физики: квантовой механики, атомной физики, физики ускорителей. М. С. Рабинович прекрасно учился в университете и в то же время вел огромную общественную деятельность. Ему крупно повезло, потому что таким же активным общественным деятелем на физфаке был в то время Виталий Лазаревич Гинзбург, Нобелевский лауреат, академик, который, будучи на несколько лет старше его, обратил внимание на М. С. Рабиновича как на перспективного ученого, и в первые годы его научной деятельности покровительствовал ему, помогая молодому ученому в выборе актуальных научных проблем для научных исследований. Следует отметить, что дипломной работой М. С. Рабиновича в университете руководил выдающийся ученый академик М. А. Леонтович. В. Л. Гинзбург посоветовал М. С. Рабиновичу в 1945 г. поступать в аспирантуру Физического института им. П. Н. Лебедева (ФИАН), в его теоретический отдел. Теоретический отдел ФИАН возглавлял в то время академик И. Е. Тамм, будущий лауреат Нобелевской премии, блестящий физик, замечательный человек и хороший организатор науки. Научным руководителем молодого ученого М. С. Рабиновича был Е. Л. Фейнберг, ныне академик Российской академии наук.

М. С. Рабиновичем была защищена диссертация по теории ускорителей заряженных частиц — в то время бурно развивающееся направление физики, которое возглавлял выдающийся физик, академик В. И. Векслер. При участии М. С. Рабиновича и большой группы талантливых ученых в СССР создавались ускорители нового типа на основе открытого В. И. Векслером прин-

ципа автофазировки. Один из таких ускорителей (синхрофазотрон на 10 ГэВ) был запущен в Дубне в конце 50-х годов. За выдающиеся результаты в области ускорителей заряженных частиц группа ученых, в которую входил М. С. Рабинович, была награждена в 1951 г. Государственной премией и в 1958 г. — Ленинской премией.

В начале 60-х годов XX века интересы М. С. Рабиновича переместились в другую интенсивно развивающуюся область — физику плазмы и управляемый термоядерный синтез. Он предложил развивать стеллараторное направление программы УТС. Это было довольно смелое решение, потому что в то время стеллараторная программа во всем мире была на спаде. В частности, в Америке в Принстонской лаборатории на стеллараторе “С” были получены крайне низкие времена удержания плазмы. Несмотря на это Рабиновичу сама идея удержания плазмы в магнитном поле стеллараторного типа показалась интересной прежде всего потому, что стеллараторы, в отличие от установок типа токамак, могут работать без пропускания тока через плазму. В силу этого стеллараторы являются в принципе стационарными магнитными системами для удержания высокотемпературной плазмы. В лаборатории, возглавляемой М. С. Рабиновичем, было построено несколько стеллараторов, разработан новый метод определения структуры замкнутых магнитных поверхностей в тороидальных магнитных системах. Этот метод впоследствии получил мировое признание. Но главное достижение исследований, выполненных на стеллараторах в СССР, состояло в том, что были получены времена удержания плазмы, которые на два порядка превосходили результаты американских ученых.

Полученные результаты “реабилитировали” стеллараторы как системы для удержания горячей плазмы. Однако в то время научный мир уже подхватил идею токамаков, которая была предложена в СССР в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова (Курчатовском институте). Научные результаты, полученные на токамаках в то время, имели большой отрыв от результатов всех типов установок с горячей плазмой как по температуре плазмы, так и по времени ее удержания. В 1968 г. Л. А. Арцимович на Международной конференции в Новосибирске обнаружил блестящие результаты по удержанию горячей плазмы в токамаке, и весь научный мир ринулся заниматься токамаками. Несмотря на успехи токамаков руководитель программы СССР по проблеме УТС академик Л. А. Арцимович, будучи их приверженцем, поддерживал и стеллараторное направление, никогда не закрывал его финансирование, не отзывался отрицательно об этом направлении исследований.

М. С. Рабинович всегда интересовался новыми направлениями, которые появлялись в физи-

ке. В частности, при его поддержке в лаборатории физики плазмы ФИАН начали развиваться работы по многофотонной ионизации атомов, которые потом переросли в отдельную область знаний и нашли широкое применение в исследованиях взаимодействия лазерного излучения с веществом. М. С. Рабинович поддержал развитие экспериментальных исследований, ведущихся под руководством д-ра физ.-мат. наук А. Г. Франка по выдвинутой профессором С. И. Сыроватским идее, объясняющей механизм ускорения заряженных частиц в электрических полях, возникающих в результате “перезамыкания” силовых линий магнитного поля в плазме солнечной короны. Приоритет научных результатов этой группы российских ученых признан во всем мире и отмечен Государственной премией 1982 г.

М. С. Рабинович стоял у истоков мощной релятивистской СВЧ-электроники. Эти работы выполнялись в содружестве с Институтом прикладной физики РАН, возглавляемым академиком А. В. Гапоновым. Впервые в мире на релятивистском электронном пучке было получено импульсное СВЧ-излучение сантиметрового диапазона длины волны мощностью 1 ГВт. Впоследствии эти работы широко распространились по всему миру. В настоящее время в Институте общей физики РАН развивается новое направление — мощная плазменная СВЧ-электроника с использованием плазмы в качестве генерирующей и усиливающей СВЧ-излучение среды. Эти экспериментальные работы возглавляет профессор П. С. Стрелков, а теоретические исследования ведутся под руководством профессора А. А. Рухадзе.

Рабинович был членом программных и организационных комитетов многих международных научных конференций, своей работой в которых он способствовал созданию международного сотрудничества ученых, работающих в области физики плазмы и УТС. Большая заслуга его состоит еще и в том, что он совместно с академиком Л. А. Арцимовичем организовал Научный совет по комплексной проблеме “Физика плазмы” при Академии наук СССР. Созданный совет сыграл ключевую роль в формировании программы исследований по проблеме УТС в СССР. С 1973 г. М. С. Рабинович начал проводить ежегодные конференции по физике плазмы и УТС (в г. Звенигороде), которые впоследствии получили дополнительное определение “Звенигородские”. Он был бессменным председателем программного и организационного комитетов вплоть до своей кончины в 1982 г. В 1975 г. М. С. Рабинович основал журнал “Физика плазмы”, который быстро завоевал научный авторитет как среди отечественных, так и иностранных ученых.

Матвей Самсонович прожил довольно короткую, но яркую жизнь, создав научную школу и

оставив научное наследие, которое живет и развивается спустя 22 года после его ухода.

*

В докладе профессора В. С. Стрелкова говорилось, что академик Лев Андреевич Арцимович был выдающимся физиком нашего времени. С середины 50-х годов XX века он руководил программой исследований по УТС в СССР. В то время в этих исследованиях СССР занимал лидирующие позиции в мире. Когда программа УТС в СССР вышла из стадии закрытости и перешла в открытую стадию, то фактически Л. А. Арцимович стал неформальным лидером международного научного сообщества, занимающегося исследованиями по этой проблеме. Последние 10—12 лет его лидерство в УТС признавалось всеми участниками "термоядерного клуба". Что же повлияло на то, что Лев Андреевич стал неформальным лидером международных исследований по УТС? В первую очередь он был интересен тем, что был мастером интуитивного анализа экспериментальных фактов. В своем понимании физики вообще и физики плазмы в частности он стремился к тому, чтобы наблюдаемые в эксперименте явления не противоречили простым принципам и качественным физическим соображениям. Его было очень трудно убедить в верности экспериментальных фактов, если они прекрасно согласовывались с какой-то "модной" теорией, но в чем-то противоречили более простым и понятным физическим принципам. Его известная позиция состояла в том, что часто в научных дискуссиях по актуальным проблемам и по интерпретациям экспериментальных результатов он шел против мнения большинства ученых. И часто оказывалось, что Лев Андреевич был прав. Примером этого его качества ученого является известная история с открытием в 1952 г. нейтронного излучения в сильнооточных разрядах в дейтерии. В г. Звенигороде в 1974 г. на конференции по физике плазмы и УТС, посвященной первой годовщине со дня смерти Л. А. Арцимовича, выступил академик М. А. Леонтович, который сказал: "Мне посчастливилось работать с Л. А. Арцимовичем больше 20 лет. За это время я ясно себе представил, в чем самые замечательные его качества как физика. Это — удивительное умение разбора экспериментального результата, критическая оценка этого результата и его значение для дальнейшего развития работы. Я припоминаю два очень ярких факта: 1952 год, когда было обнаружено излучение нейтронов на прямых электродных разрядах, и тогда у работников, интересовавшихся этим, возник очень большой оптимизм. Почти всем казалось, что эти нейтроны могут быть только теплового происхождения, следовательно, достигнута высокая

температура ионов плазмы, и путь к управляемому термоядерному синтезу открыт. Причем такой оптимизм был почти поголовно у всех. Я помню, что настроение у многих участников исследований было такое приподнятое, что в лаборатории появилось шампанское. Это отмечалось как победа в решении проблемы УТС. Практически все были уверены, что это тепловые нейтроны. Единственный человек, который серьезно и критически относился к результатам своей же работы, был Л. А. Арцимович. Он за тормозил рекламирование этого факта и заставлял проводить целый ряд контрольных экспериментов. В первую очередь обратил внимание на наличие рентгеновского излучения с энергиями квантов в десятки кэВ. И действительно, в результате подробных экспериментальных проверок оказалось, что хотя это и очень интересное явление, но оно прямо не связано с воздействием температуры плазмы разряда. Здесь в первую очередь играла роль самокритика".

Работы в 1952 г. по проблеме УТС курировал непосредственно Л. П. Берия, и такая ситуация, когда все говорят, что есть успех, а Л. А. Арцимович придумывает какие-то контрольные опыты, могла быть небезопасной для него. Поэтому положение, в котором находился Лев Андреевич, было далеко не простым. В конце концов оказался прав Лев Андреевич, и это еще раз показало всем, что для него как ученого истина была дороже всего.

Похожая история повторилась несколько позднее в известной научной дискуссии о механизме диффузии в тороидальных системах. В то время многие американские ученые утверждали, что время жизни в тороидальных магнитных системах описывается формулой Бома, из которой следовало, что время жизни частиц падает с ростом температуры. Это делало бесперспективным удержание горячей плазмы в тороидальных системах вообще. Несмотря на то, что в полученных на экспериментальных установках (в СССР) результатах уже были обнаружены расхождения с формулой Бома (экспериментальные результаты были в сотни раз лучше предсказаний по формуле Бома), все равно этим результатам международное сообщество не вполне доверяло, так как в то время эксперименты на токамаках велись только в СССР. В 1968 г. на Международной конференции по УТС в г. Новосибирске в наиболее полном виде были доложены новые результаты, полученные в Курчатовском институте, и тогда же Л. А. Арцимович предложил провести совместный советско-английский эксперимент по дополнительному измерению электронной температуры плазмы в токамаке. Надо понимать ситуацию, когда весь мир не верит, а Лев Андреевич говорит, что нужно публично проверить и убедиться, где есть истина. Истина в этом эксперименте была на стороне ученых Курчатовского института. И по-

сле этого эксперименты на токамаках пошли в разных странах. В то же время на токамаках были измерены концентрация плазмы, энергетический спектр ионов в плазме по спектру атомов перезарядки, выходящих из плазмы, и было показано, что этот спектр по характеру зависимости от энергии близок к максвелловскому. Была рассчитана температура ионов плазмы, она находилась в интервале значений 300—400 эВ. В этой ситуации возникло предложение провести эксперименты с использованием дейтерия. Выполненные расчеты показывали, что можно в реальном эксперименте из плазмы токамака зарегистрировать нейтронное излучение, и такая аппаратура была в распоряжении экспериментаторов. Поначалу Л. А. Арцимович отнесся довольно скептически к этим предложениям. Видимо, предыдущая история с нейтронами ему очень дорого обошлась, и поэтому предложение сделать такие измерения не вызывало у него энтузиазма. Однако обсуждения и расчеты продолжались, и один из разговоров кончился тем, что он сказал, что не запрещает проводить эти измерения. Но когда они были проведены, когда были сделаны все мыслимые контрольные опыты, когда нейтроны считались штуками, но, тем не менее, были сделаны абсолютные измерения интенсивности нейтронного потока, Лев Андреевич изменил свой взгляд. В результате этих исследований и глубоких дискуссий появилась статья, в которой отмечалось, что интенсивность измеренного потока нейтронов не противоречит предположению об их тепловом происхождении. Л. А. Арцимович эту фразу вычеркивает и записывает в конце этой статьи другую фразу: “Таким образом, наблюдается длительное термоядерное нейтронное излучение устойчивого плазменного витка”. Сравнение температуры плазмы, измеренной по нейтронам, с измерениями температуры по спектру атомов перезарядки в разные моменты времени удержания плазмы в токамаке показало их идентичность.

Л. А. Арцимович с 1946 г. являлся профессором Московского инженерно-физического института, с 1954 г. — профессором физического факультета МГУ, впоследствии — основатель и заведующий кафедрой физики плазмы. Ленинская премия была присуждена ему в 1958 г. за исследования мощных импульсов разрядов в газе для получения высокотемпературной плазмы. Эти работы опубликованы в 1956—1957 гг.

Каков главный итог деятельности Л. А. Арцимовича? Конечно, физических результатов, полученных им лично и совместно с сотрудниками, очень много, но главный итог его деятельности состоит в том, что первый международный экспериментальный реактор, работающий на основе реакции термоядерного синтеза дейтерия и трития (ИТЭР), будет создаваться на основе токамака — это абсолютная истина.

В настоящее время к международной кооперации (Россия, Евросоюз, Япония, США), разрабатывающей проект ИТЭР, подключились новые участники: Китай и Республика Корея. За последний год произошли крупные изменения в расстановке стран—претендентов на строительство ИТЭР. Остались только два участника-конкурента — это Франция и Япония. Ясно, что в сооружении ИТЭР и в будущих исследованиях будут участвовать ученые из многих стран, в том числе из России. Поэтому на первый взгляд Россия могла бы отдать предпочтение Франции, которая территориально довольно близка. Важное значение имеет стоимость проживания среднего человека в стране, в которой придется работать многим российским ученым. Эта стоимость проживания во Франции как раз находится на среднеевропейском уровне. В Японии уровень расходов для стандартной жизни ученого значительно выше среднеевропейского. В силу удаленности проезд в Японию значительно дороже по сравнению с проездом во Францию. Но не только эти обстоятельства являются важными в выборе страны, принимающей ИТЭР. Здесь уместно вспомнить дискуссию на 2-й Звенигородской конференции в 1975 г., на которой М. С. Рабинович в кулуарах, подводя итоги научных сообщений из многих стран мира, сказал (цитируем по памяти): “Допускаю, что термоядерный синтез будет реализован впервые в США, возможно, что это может сделать и Европа. СССР имеет хороший темп исследований, чтобы выйти на решение проблемы УТС к концу XX века. Но я почти уверен в том, что Япония уже не сможет догнать лидеров”. Это единственное предсказание М. С. Рабиновича, которое, по-видимому, не оправдывается. За прошедшие 30 лет Япония прошла гигантский путь в термоядерных исследованиях и в настоящий момент стала одним из лидеров этого направления. Важным является то, что Япония — технологический лидер, создавший мощную высокотехнологическую базу для строительства практически любых крупных экспериментальных установок, работающих с сильными стационарными магнитными полями на основе сверхпроводящих материалов с использованием криогенной техники. В Японии может быть изготовлена любая необходимая для исследований горячей плазмы диагностическая техника, она обладает мощными финансовыми средствами и, наконец, Япония — это единое государство (в отличие от Европейского Союза — ЕС), и принятие политического решения для строительства ИТЭР для правительства Японии значительно проще, чем принятие важного решения для большой группы стран, входящих в ЕС. В этих условиях для мирового научного “термоядерного клуба” стратегически выгодно, чтобы Япония получила право строить ИТЭР, и в этом случае можно быть

уверенным, что этот международный экспериментальный токамак-реактор будет построен и заработает. Тогда и путь к промышленному термоядерному реактору будет открыт.

*

На конференции было представлено 279 научных докладов из 65 российских и 28 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, УТС, плазменным и лучевым технологиям. Общая численность авторов докладов — более 700.

На конференции были представлены доклады сотрудниками из следующих российских научных организаций.

1. Институт ядерного синтеза Российского научного центра “Курчатовский институт”, Москва.
2. Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва.
3. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва.
4. Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.
5. Институт экстремальных состояний Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ИТЭС ОИВТ РАН), Москва.
6. Институт высоких температур Российской академии наук, Москва.
7. ФГУП «Государственный научный центр Российской Федерации “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ)”», г. Троицк, Московская обл.
8. Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва.
9. Институт математического моделирования Российской академии наук, Москва.
10. Государственный политехнический университет, Санкт-Петербург.
11. Московский физико-технический институт (Государственный университет), г. Долгопрудный, Московская обл.
12. Институт космических исследований Российской академии наук, Москва.
13. Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук, Москва.
14. Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород.
15. Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск.
16. Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва.
17. Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург.
18. ФГУП “Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова”, г. Металлострой, Ленинградская обл.
19. ООО “Прикладная физика” Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, Санкт-Петербург.
20. Санкт-Петербургский государственный технический университет, Санкт-Петербург.
21. Государственное предприятие “Красная звезда”, Москва.
22. Российский Федеральный ядерный центр “Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики”, г. Саров, Нижегородская обл.
23. Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Москва.
24. Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, п. Менделеево, Московская обл.
25. ФГУП НПО “Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики с заводом им. А. Г. Иосифьяна” (НПП ВНИИЭМ), Москва.
26. Российский федеральный ядерный центр “Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики” (РФЯЦ ВНИИТФ), г. Снежинск, Челябинская обл.
27. Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Томская обл.
28. Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва.
29. Санкт-Петербургский институт машиностроения (ВТУЗ-ЛМЗ), Санкт-Петербург.
30. Государственный научный центр Российской Федерации “Институт экспериментальной и теоретической физики им. А. И. Алиханова” (ГНЦ РФ ИТЭФ), Москва.
31. Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума Госстандарта России, Москва.
32. Казанский государственный технический университет, г. Казань.
33. Казанский государственный технологический университет, г. Казань.
34. Московский авиационный институт, Москва.
35. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук, Москва.
36. Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва.
37. Физико-технологический институт Российской академии наук, Москва.
38. Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва.
39. Институт химической физики Российской академии наук, Москва.
40. Иркутский государственный университет, г. Иркутск.

41. Научно-производственное предприятие "Все-российский научно-исследовательский институт электромеханики", Москва.

42. Московский энергетический институт (Технический университет), Москва.

43. Лаборатория "ПЕЛИН", Москва.

44. Полярный геофизический институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты.

45. Лицей №1511, Москва.

46. Институт химии твердого тела Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

47. Институт катализа Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

48. Иоффе Фьюжин Техноложи ЛТД, Санкт-Петербург.

49. Факультет вычислительной математики и кибернетики, МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва.

50. ТУАП Ltd., Государственный политехнический университет, Санкт-Петербург.

51. ВНИИТП, Москва.

52. Томский государственный университет, г. Томск.

53. Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск.

54. ГНУП РЭКОМ, Москва.

55. НИИ физики Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург.

56. Научно-исследовательский и конструкторский институт радиоэлектронной техники, г. Заречный, Пензенская обл.

57. Филиал Института энергетических проблем химической физики Российской академии наук, г. Черноголовка, Московская обл.

58. Московский государственный университет леса, Москва.

59. Институт химии твердого тела Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

60. Рязанский педагогический государственный университет, г. Рязань.

61. Институт прикладной механики МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва.

62. Московская медицинская академия им. И. М. Сеченова, Москва.

63. Дагестанский государственный университет, г. Махачкала.

64. Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск.

На конференции были представлены доклады сотрудниками из следующих иностранных научных организаций:

1. Max-Planck Institut fur Plasmaphysik, Sub-Institut Graifswald, EUROATOM Association, Graifswald, Germany.

2. Институт физики плазмы им. Макса Планка, ассоциация ЕВРОАТОМ, г. Гархинг, Германия.

3. University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA.

4. EUROATOM-CIEMAT, Madrid, Spain.

5. Политехнический институт, г. Турин, Италия.

6. Институт физики плазмы, г. Милан, Италия.

7. Джeneral Атомикс, г. Сан-Диего, Калифорния (CA), США.

8. Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина.

9. Институт физики плазмы Национального научного центра "Харьковский физико-технический институт", г. Харьков, Украина.

10. National Institute for Fusion Science, Toki, Japan.

11. Хельсинкский технологический университет, г. Хельсинки, Финляндия.

12. Институт физики плазмы и лазерного микросинтеза им. С. Калиского, г. Варшава, Польша.

13. Laboratoire des Plasmas Denses, Universite P.@M. Curie, Paris, France.

14. Korea Basic Science Institute, National Fusion R&D Center.

15. Университет Альберты, г. Эдмонтон, Канада.

16. Университет Милана Бикокка, г. Милан, Италия.

17. Институт фундаментальной физики, г. Бордо, Франция.

18. Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas Universite Paris XI, France.

19. Graduate University for Advanced Studies, Hayama, Japan.

20. Университет Нагоя, г. Нагоя, Япония.

21. Institute of Plasma Physics AS CR, Prague, Czech Republic.

22. Фонд им. Луи де Бройля, Париж, Франция.

23. Школа физики Университета Сиднея, г. Сидней, Австралия.

24. Инха университет, г. Инчен, Республика Корея.

25. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований "Сосны" Национальной академии наук Беларуси.

26. Университет им. Джона Хопкинса, лаборатория прикладной физики, США.

27. Научно-исследовательский институт прикладной физики при Национальном университете Узбекистана, г. Ташкент.

28. The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA.

На конференции были заслушаны доклады по четырем важнейшим направлениям физики плазмы:

- Магнитное удержание высокотемпературной плазмы и термоядерный синтез в стационарных и квазистационарных магнитных ловушках.
- Инерциальный термоядерный синтез.
- Физические процессы в низкотемпературной плазме.
- Физические основы плазменных и лучевых технологий.

Состоялись четыре пленарных заседания, на которых были заслушаны 17 обзорных докладов об отечественных и мировых результатах исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза, плазменным и лучевым технологиям. Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 72 устных и 190 стендовых докладов.

На конференции отмечалось, что за последний год наблюдается небольшой рост государственного финансирования науки в России, что уже привело к некоторому развитию научных исследований по физике плазмы. Россия стала более активно участвовать в крупных международных проектах, в том числе по физике плазмы и УТС.

С обзорным докладом *“Современные открытые магнитные системы”* выступил академик Э. П. Кругляков. В докладе отмечалось, что 50 лет назад были предложены так называемые открытые магнитные ловушки для удержания высокотемпературной плазмы. Предложили их независимо академик Г. И. Будкер в СССР и профессор Бост в США. Этот большой временной интервал исследований можно разделить примерно на два равных периода. В первый период развивались открытые ловушки классического типа, которые и были предложены этими двумя физиками. Во второй период появились и развивались открытые ловушки нового типа с более сложными магнитными конфигурациями по сравнению с первыми.

Можно отметить три важных события, которые оказали существенное влияние на развитие исследований в этом направлении. Первое — это опыты с отдельными частицами, которые показали, что заряженные частицы действительно эффективно удерживаются в открытых магнитных ловушках. Второе событие — это получение магнитогидродинамически (МГД) устойчивой плазмы с помощью достаточно простых средств — дополнительных проводников с током (знаменитые “палки Иоффе), которые были в Курчатовском институте предложены и реализованы в экспериментах. И, наконец, третье событие — получение и удержание высокотемпературной плазмы с температурой ионов выше 10 кэВ в Ливерморе (США) на установке 2X2В.

В Институте ядерной физики СО РАН в Новосибирске в течение уже длительного времени исследуются свойства и возможности трех типов открытых систем: многопробочная, амбиполярная и газодинамическая ловушки.

Современные открытые системы могут работать в стационарном режиме. Не существует проблем срывов, нет проблем с дивертором для таких систем. Они удобны для прямого преобразования энергии заряженных частиц. Это обстоятельство может оказаться весьма важным для схем термоядерных реакторов с малым нейтронным выходом, таких, например, как реакторы, основанные на синтезе дейтерия и гелия-3. Открытые системы чрезвычайно просты с инженерной точки зрения в том случае, если удастся реализовать осесимметричные магнитные системы. Магнитные системы открытых ловушек весьма эффективны, так как давление плазмы в них сопоставимо с давлением магнитного поля.

В настоящее время имеется значительное отставание открытых ловушек от приоритетного направления магнитного удержания высокотемпературной плазмы в тороидальных системах (прежде всего в токамаках, затем в стеллараторах), тем не менее открытые ловушки продолжают развиваться и могут найти применение в качестве источников нейтронов для различных приложений в научных исследованиях и технологиях.

В обзорном докладе заведующего теоретическим отделом Института ядерного синтеза *д-ра физ.-мат. наук В. И. Ильгисониса “Энергетический принцип в проблеме устойчивости плазмы”* говорилось о том, что энергетический принцип в физике плазмы применяется в термоядерных исследованиях более 50 лет. Энергетический принцип в проблеме МГД устойчивости плазмы относится к числу проблем, которые имеют фундаментальное значение. Этими вопросами занимались многие успешные математики. Например, известные работы академика В. И. Арнольда в этой области имеют один из самых высоких индексов цитируемости. Всем хорошо известно практическое значение, которое имеет энергетический принцип для отыскания условий устойчивости конкретных МГД мод в плазменных системах, в частности, для современных установок с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы и УТС, в которых экспериментально наблюдается вращение плазмы с довольно высокими скоростями.

Классический энергетический принцип формулируется очень просто. Если есть некий гамильтониан, состоящий из кинетической и потенциальной энергий, то берем первую вариацию, приравняем ее к нулю, получаем условие равновесия с нулевым импульсом и с экстремумом потенциала, а вторая вариация в случае ее положительности дает устойчивость.

Идея применения энергетического принципа для описания МГД устойчивости плазмы была изложена в работе Шлюттера в 1951 г., в которой на отдельных примерах был получен ряд результатов, которые уже в 1958 г. в работе Берштейна были доведены до уровня энергетического принципа устойчивости статических равновесий. В литературе по этой тематике мы знакомы с обзором академика Б. Б. Кадомцева. Начиная с 60-го года с помощью энергетического принципа решаются конкретные задачи устойчивости и показана эквивалентность его спектральным методам анализа. Многие неустойчивости, найденные из энергетического принципа, были впоследствии переоткрыты с помощью теории малых колебаний, так что и в этом смысле эквивалентность энергетического принципа другим теоретическим подходам существует. Следующий важный цикл работ, начатый Петвиашвили, — это прямая постановка задачи о нелинейной устойчивости МГД системы. Авторы этих работ осознали, что в МГД теории всегда существует нейтральное возмущение и нужен уже нелинейный анализ. Берутся вариации давления, подставляются вариации потенциальной энергии. Вторая вариация в случае ее положительности гарантирует устойчивость, а в случае отрицательности — неустойчивость. Однако если в системе существует нейтральное возмущение, то функционал потенциальной энергии никогда не может быть строго положительно определен. Это тот самый случай, когда систему можно рассматривать относительно некоего нейтрального направления, а что будет дальше в рамках развиваемой теории, сказать нельзя, т. е. линейного анализа для МГД системы по определению недостаточно.

Энергетический принцип стал не только полезным средством проверки устойчивости конкретных плазменных систем, но и мощным инструментом для исследования структуры наиболее опасных возмущений плазмы в существующих и будущих термоядерных установках.

В докладе д-ра физ.-мат. наук М. И. Михайлова "Инновационные стеллараторные системы" представлены новые направления в создании современных стеллараторов. В настоящее время во многих научных центрах России и за рубежом ((Курчатовский институт, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша, Институт физики плазмы (ФРГ), Институт физики плазмы (Лозанна, Швейцария), Харьковский ФТИ (Украина)) активно исследуются различные возможности улучшения стеллараторных систем. Новый подход заключается в том, что оптимизируется форма граничной магнитной поверхности. При этом число параметров многократно возрастает. Новые стеллараторные системы, которые таким образом появляются, обладают комбинацией двух важных свойств: у них и про-

странственная ось, и вращающиеся сечения сильно изменяются вдоль магнитной оси. Образуя, говоря, мы накладываем на плазменный шнур гофрировку тороидального магнитного поля. Система становится похожа на пробкотрон, но остается тороидальной. Сосуществование пространственной магнитной оси и специально подобранного сечения магнитных поверхностей и их сочетание с гофрировкой продольного магнитного поля позволяют существенно уменьшить вторичные токи равновесия, т. е. ослабить тороидальный эффект. Получаем существенное повышение предела давления плазмы по равновесию. Если при выборе граничной магнитной поверхности стелларатора использовать все степени свободы, допустимые для несимметричных конфигураций, то, как показали аналитические и численные расчеты, оказывается возможным в определенной степени "восстановить" симметрию с точки зрения дрейфового движения заряженных частиц. Основное внимание в докладе уделено стеллараторам с полоидальным направлением линий с одинаковым значением модуля магнитного поля на магнитных поверхностях. Показано, что для таких систем возможно выполнение условий квазиизодинамичности (омнигенности) для всех запертых заряженных частиц. Для таких стеллараторных систем физически обоснована возможность существенного улучшения удержания α -частиц, уменьшения вторичного и бутстрэп-токов.

В докладе д-ра физ.-мат. наук В. А. Вершкова "Современное состояние исследований мелкомасштабной турбулентности на токамаках" дается обзор экспериментальных результатов по исследованию природы мелкомасштабной турбулентности плазмы в токамаках. Начиная с исследований на американской установке TFTR и на многих других крупных токамаках была показана значительная разница между характером турбулентности в периферийной и центральной областях плазменного шнура. Уровень турбулентности в центральной части плазменного шнура токамака сильно влияет на удержание плазмы, в то время как периферийная турбулентность влияет в основном на характер взаимодействия плазмы со стенками установки. В последнее время периферийная турбулентность привлекла внимание исследователей в связи с проблемой критической плотности и возможным выносом значительной доли энергии плазмы на стенки вакуумной камеры, минуя дивертор, в будущем международном экспериментальном исследовательском токамаке-реакторе ИТЭР. Был достигнут значительный прогресс в понимании природы турбулентности, возможности теоретических предсказаний развития турбулентности и ее влияния на процессы в высокотемпературной плазме, удерживаемой в тороидальных магнитных системах.

В докладе Б. А. Брюнеткина "Ядерная физика в лазерной плазме" делается попытка обзора экспериментальных исследований ядерных реакций в плотной плазме, создаваемой излучением мощных лазеров с энергией в импульсе выше 100 Дж при фемтосекундной длительности импульсов. Для инициирования ядерных реакций в лазерной плазме необходимы высокие интенсивности лазерного излучения — масштаба 10^{19} Вт/см² и выше. При таких интенсивностях излучения в плазме генерируются высокоэнергичные электроны, фотоны (γ -кванты) и ионы. Пороговые энергии частиц, иницирующих ядерные реакции, лежат в области энергий выше 5 МэВ. При таких энергиях γ -квантов, например, возможен процесс "фотоотщепления" нейтронов от ядер некоторых элементов. При более высоких энергиях частиц в плазме спектр возможных ядерных реакций существенно расширяется.

Следует отметить, что для практических применений лазерной плазмы важно иметь большую интегральную дозу потока γ -квантов в одном импульсе, что как раз и может быть достигнуто в современных высокоинтенсивных лазерных установках. Генерация пучков тяжелых заряженных частиц, т. е. протонов и многозарядных ионов, — вторая важная задача лазерной физики для реализации ядерных реакций в лазерной плазме. В современных лазерных установках (например, в установке "Вулкан", Англия) достигнуты энергии протонов около 50 МэВ. Для практического применения нужны также и большие токи ионов — порядка сотен килоампер, которые также уже зарегистрированы в некоторых экспериментах.

Таким образом, можно утверждать, что основа для ядерной физики в лазерной плазме существует, и ведутся активные теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении в России и за рубежом.

В докладе д-ра физ.-мат. наук, профессора А. С. Кингсена "Исследования по импульсному УТС в Курчатовском институте" дается обзор научно-исследовательских работ по быстрому сжатию плазмы сильноточных Z-пинчей. Исследования рассматриваются как перспективный путь к преобразованию электрической энергии в мощный рентгеновский импульс на уровне энергий в десятки мегаджоулей в импульсе. Такие рентгеновские источники могут быть использованы для целей УТС, а также фундаментальных исследований экстремальных состояний вещества. Работы ведутся в тесном сотрудничестве с ТРИНИТИ и ФТИ. На российской установке С-300 в специальных сверхнапряженных режимах получены рекордные скорости переключения тока (около 10^{15} А/с) на миниатюрную нагрузку, а именно ток в 2,5 МА переключался за 2,5 нс. Получен устойчивый режим переключения тока 750 кА за 5 нс. Затухание тока в на-

грузке происходит с характерным временем для всей установки — около 150 нс. Определена излучательная температура рентгеновского излучения специальной внутренней полости типа "Хольраум", которая достигает значения около 50 эВ. В экспериментах с вложенными лайнерами (внешний из алюминия, внутренний — из вольфрама) впервые наблюдался эффект провала внешнего лайнера сквозь внутренний лайнер в процессе магнитного сжатия. Ведутся экспериментальные работы по отработке плазменных прерывателей тока в качестве оконечного каскада обострения для мегаджоульных генераторов тока с величинами около 50—60 МА для будущей мощной установки "Байкал".

В докладе д-ра физ.-мат. наук К. В. Лотова "Кильватерное ускорение частиц в плазме с раскачкой волны электронными сгустками" рассматривается процесс ускорения коротких электронных сгустков в электрическом поле, возникающем в плазме при прохождении драйвера. Драйвер — это короткий и плотный электронный сгусток, который при движении сквозь плазму оставляет в своем следе кильватерную волну, т. е. возмущение плазмы, которое движется за драйвером подобно кильватерному следу за кораблем при его движении в море. Величина электрического поля в кильватерной волне в плазме может на несколько порядков превосходить типичные значения полей в традиционных металлических ускоряющих структурах. Этим объясняется интерес к кильватерному ускорению электронов. Такого рода плазменные структуры могут служить основой для будущих компактных ускорителей заряженных частиц сверхвысокой энергии. За последние годы была экспериментально показана состоятельность метода кильватерного ускорения, разработана теория, осознаны проблемы, стоящие на пути к созданию коллайдера на основе плазмы. Среди стоящих проблем можно выделить следующие: невысокий коэффициент трансформации передачи энергии от драйвера к ускоряемому сгустку электронов (витнессу); большой энергетический разброс ускоряемых частиц; малое их количество; потери электронов сгустка при столкновении с ионами плазмы; необходимость контроля формы витнесса с субмиллиметровой точностью для реализации эффективного режима ускорения. Эти проблемы могут быть сняты при переходе к сильно нелинейному режиму ускорения (blow-out regime), в котором значительная часть драйвера и весь витнесс движутся в свободной от плазменных электронов области. Этот эффективный режим кильватерного ускорения планируется исследовать на установках Института ядерной физики СО РАН.

В обзоре д-ра физ.-мат. наук В. Д. Левченко "Кинетическое моделирование турбулентных процессов и явлений самоорганизации в высокотем-

пературной плазме” отмечалось, что процесс поглощения вводимой в плазму энергии, сопровождается мелкомасштабной плазменной турбулентностью, при развитии которой возникают структурные самосогласованные образования электромагнитных полей, плотностей зарядов и токов.

Такие явления возникают вследствие нелинейности происходящих процессов, неравновесности и открытости диссипативных явлений плазменной системы. При этом сценарий развития турбулентности на малых пространственно-временных масштабах в конечном счете определяет поведение системы в целом. При математическом описании реальных термоядерных систем необходимо учитывать геометрию установок (их трехмерность), сложные границы и состав плазмы (многокомпонентность). В пристеночных областях требуется принимать во внимание и наличие пылевых микрочастиц в плазме. В этих сложных для расчета условиях кинетическая теория высокотемпературной плазмы позволяет найти эффективный компромисс между классической дилеммой теоретической физики: нахождением точного решения приближенных уравнений или получением приближенных решений точных уравнений.

В последние десятилетия математическое моделирование на основе кинетической теории плазмы стало мощным инструментом, применяемым как для проверки аналитической теории, так и для поддержки и планирования реального эксперимента. Прогресс и успехи кинетического моделирования связаны с несколькими важными вещами. Во-первых, этот прогресс базируется на очень хорошем математическом аппарате кинетической теории, которая позволяет с математической точки зрения глобально упростить постановку многих задач. К этому аппарату следует отнести прежде всего возможность описания движения частиц на основе гамильтониана и сведение задачи к решению кинетического уравнения для функции распределения частиц по скоростям. Важным является также использование уравнения Власова для бесстолкновительной плазмы с самосогласованным полем. Этот переход, математически являющийся громадным упрощением физических задач, обоснован достаточно четко в случае плазмы, где в большинстве случаев описание многих процессов можно свести к уравнениям Власова, которые содержат основные эффекты, связанные с нелинейным самосогласованным поведением турбулентной плазмы. Во-вторых, этот прогресс в математическом моделировании плазмы на основе кинетической теории связан с развитием компьютеров. За последние 50 лет производительность их увеличилась от 10^3 до 10^{10} операций в секунду. Это соответствует удвоению производительности каждые 2,5 года. Если этот темп

сохранится в будущем, то через 50 лет производительность может составить 10^{23} операций в секунду. При этом откроются возможности компьютерного моделирования плазмы с реальным числом частиц в обозримом интервале времени. Тогда только можно будет забыть о кинетической теории и переходить к непосредственному моделированию системы, состоящей из огромного числа частиц. Однако в течение ближайших 50 лет реальной альтернативы кинетическому подходу в теоретической физике плазмы не будет.

На современном этапе развития вычислительной техники эффективные расчеты и моделирование процессов в плазме связаны с переходом на многопроцессорные вычисления, с развитием методов распараллеливания при решении кинетических уравнений Власова и Фоккера-Планка самосогласованно с уравнениями Максвелла. Для решения актуальных задач физики плазмы в Институте прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН развиваются параллельные компьютерные коды семейства SUR. Главными целями этих разработок являются создание математического обеспечения для решения проблемы УТС; проверка методами численного эксперимента перспективных схем осуществления УТС; исследование фундаментальных свойств плазменной турбулентности. Уже сейчас разрабатываемые методы кинетического моделирования плазмы на базовых принципах позволяют эффективно изучать нелинейные самосогласованные процессы турбулентной диссипации энергии, подводимой к плазме пучками заряженных частиц и импульсами лазерного излучения. При этом используются оригинальные асинхронные методы распараллеливания, основанные на применении метода локальной пространственно-временной декомпозиции. На этих же принципах успешно развивается моделирование пристеночной пылевой плазмы в установках с магнитным удержанием высокотемпературной плазмы, а также в экспериментах по взаимодействию мощных коротких лазерных импульсов с плазменными мишенями для решения проблемы инерциального управляемого термоядерного синтеза.

В обзорном докладе д-ра физ.-мат. наук В. С. Филинова “Расчеты термодинамических свойств плотной водородной плазмы квантовым методом Монте-Карло” рассмотрено современное состояние исследований термодинамических свойств и процессов переноса в плотной водородной плазме, необходимых для понимания фундаментальных процессов, происходящих в веществе в условиях сильного взаимодействия. Для расчета термодинамических свойств водородной плазмы использовался квантовый метод Монте-Карло, позволяющий с заданной точностью и без привлечения дополнительных предположений проводить вычисления различных свойств многочастичных квантовых систем при

ненулевой температуре. Моделирование идеальной вырожденной плазмы показало хорошее согласие с результатами аналитических вычислений. Аналогичное моделирование неидеальной плазмы водорода в широкой области концентраций при температуре от $T = 10^4$ до 10^6 К позволило изучить эффекты ионизации, спаривания электронов и упорядочения протонов. Полученные в расчетах термодинамические свойства были использованы для вычисления ударной адиабаты дейтерия при давлениях выше 1 Мбар. При расчете изотермы $T = 10$ кК обнаружен диапазон плотностей $\rho = 0,1 - 1,5$ г/см³, в котором давление плазмы становится отрицательным. При повышении температуры до $T = 50$ кК аномалии исчезают. Такое поведение термодинамических функций в методе Монте-Карло обычно имеет место при фазовом переходе.

Обзорный доклад профессора Б. М. Смирнова "Процессы в кластерной плазме" был посвящен явлениям, происходящим в кластерной плазме. Последняя представляет собой плотный слабоионизованный газ с примесью пересыщенного пара, кластеры которого растут и распадаются в буферном газе. Типичной кластерной плазмой является, например, ионизованный инертный газ, в котором находится примесь жаропрочного металла. Эта плазма отличается от пылевой плазмы размером частичек и их нестабильностью. К физическим процессам, протекающим в рассматриваемой плазме, относятся в первую очередь процессы зарядки кластеров в плазме и последующие процессы роста и испарения заряженных кластеров в плазме. В результате устанавливается определенное равновесие в плазме между кластерами и их атомным паром. В однородной плазме такое состояние неустойчиво и приводит либо к полному испарению кластеров, либо к их объединению в компактную конденсированную систему. В результате весь металл собирается в малой области пространства в виде растущих кластеров. Кластерная плазма может быть использована как эффективный источник излучения, а также для генерации интенсивных пучков металлических кластеров с последующим использованием этого пучка для напыления пленок, изготовления специальных материалов и для других применений.

Обзорный доклад профессора А. П. Напартовича "Неравновесная плазма в воздухе при атмосферном давлении: проблемы создания и поддержания" был посвящен изучению разрядов, генерирующих неравновесную плазму в воздухе атмосферного давления. Такие разряды, например коронный и барьерный, известны более 100 лет.

Коронный разряд реализуется как в лабораториях, так и в природных условиях, например, "огни святого Эльма". Барьерный разряд (БР) в 1857 г. был реализован Сименсом для озони-

рования воздуха. В последние годы интерес к неравновесным разрядам в воздухе при атмосферном давлении резко возрос, а область их применения расширяется непрерывно. Привлекательные особенности работы с плазмой при атмосферном давлении состоят в том, что имеется возможность избавиться от вакуумной техники, ввод и вывод обрабатываемого материала существенно упрощены, требования к источникам энергопитания технически просто реализуемы, ожидаемые эксплуатационные расходы установок невысоки.

Для многих применений разрядов требуется поддержание плазмы, протяженной хотя бы в одном направлении. Главная проблема при развитии плазменных технологий — сложность контроля локальных параметров плазмы. Эта проблема тесно связана со способом получения плазмы. Как правило, ее неоднородности возникают на стадии развития пробоя газа. Без принятия специальных мер эти неоднородности эволюционируют в дугу (шнурование плазмы), при этом плазма дуги близка к равновесию. Поскольку разнообразные применения плазмы разрядов при атмосферном давлении связаны с ее неравновесностью, то процесс шнурования плазмы сопровождается резким снижением эффективности технологического процесса. Специальные меры по предотвращению шнурования плазмы сводятся к двум приемам: ограничению длительности поддержания плазмы и введению распределенной отрицательной обратной связи между локальным током и напряжением.

Доклад д-ра физ.-мат. наук А. Ю. Стариковского "Импульсные наносекундные разряды и их приложения" был посвящен исследованию короткоимпульсных электрических газовых разрядов, представляющих особый интерес для технологических приложений. Значимая часть энергии таких разрядов идет в плазмохимические процессы с высокими энергетическими порогами, при этом термический нагрев газа оказывается минимальным.

Эти свойства импульсных газовых разрядов позволяют эффективно использовать их в таких областях, как источники света, реакторы для модификации состава газов и жидкостей, а также для модификации поверхностных свойств твердых тел. В докладе обсуждались результаты экспериментальных и теоретических исследований пространственно-временной динамики развития импульсных наносекундных разрядов, включая образование активных частиц, релаксацию и перераспределение энергии по внутренним степеням свободы молекул в сильнонеравновесной низкотемпературной плазме, и применение таких разрядов в задачах плазмохимии и аэродинамики.

В обзоре д-ра физ.-мат. наук М. Д. Токмана "Параметрические эффекты в условиях резонанс-

ного взаимодействия волн с частицами в плазме и электронных потоках: стимулированное излучение в отсутствие инверсии и электромагнитно-индуцированная прозрачность” отмечалось, что первоначально эффекты стимулированного излучения без инверсии (СБИ) и электромагнитно-индуцированной прозрачности (ЭИП) были предсказаны и реализованы для случая взаимодействия бихроматического оптического излучения с трехуровневыми квантовыми системами. Исследования возможностей реализации этих явлений в ансамблях классических электронов в условиях циклотронного резонанса продемонстрировали, что эффекты СБИ и ЭИП являются общезначимыми феноменами, подобно обычному стимулированному излучению, возможному как для квантовых, так и для классических систем. Эти резонансные параметрические эффекты могут проявляться как в процессе циклотронного взаимодействия бихроматического излучения с предварительно промодулированным ансамблем электронов, так и при “автоматическом” формировании модуляции функции распределения электронов в процессе взаимодействия пробной волны с мощной накачкой.

В последние годы исследования в данном направлении дали новые важные результаты. Во-первых, было показано, что в классических системах (в отличие от квантовых) эффект СБИ определяется модуляцией компоненты не только “активной”, но и “реактивной” электродинамической восприимчивости среды. При этом в оптимальных вариантах СБИ-мазер способен в процессе электромагнитной генерации излучения отобрать до 10 % энергии промодулированного электронного пучка за время, существенно меньшее времени развития линейной циклотронной неустойчивости. Во-вторых, было установлено теоретически, что особенностью эффекта ЭИП в плазме является определяющее влияние закона дисперсии квазиэлектростатических волн, возбуждаемых биениями между пробной волной и волной накачки, на распространение пробной волны. При этом в плазме (в отличие от квантовых систем) возможна реализация нулевого значения групповой скорости пробной волны в условиях ЭИП. Этот эффект может быть использован для “просветления” зоны отсечки в окрестности циклотронного или верхнего гибридного резонансов. В-третьих, расчеты показали, что в магнитостатическом ондуляторе при использовании в качестве накачки эффекта ЭИП в плазме возможно реализовать ускоритель *beat-wave* со 100%-ной конверсией электромагнитного излучения в электростатическую моду. Полученные результаты могут быть использованы для различных версий УТС и создания новых систем ускорения заряженных частиц.

В докладе профессора О. В. Вайсберга “Новое в методах диагностики космической плазмы” пред-

ставлен обширный материал о новых приборах, предназначенных для исследования корпускулярных потоков космической плазмы. Космический эксперимент проходит в специфических условиях на космическом аппарате, поэтому к приборам предъявляются особые требования: это и ограничения по массе, объему, габаритным размерам, так же как и невозможность ремонта космической аппаратуры. Работа таких приборов происходит в условиях сильного ультрафиолетового излучения, имеется и ряд других осложняющих измерения проблем, которые нужно преодолевать при подготовке и проведении космического эксперимента.

Объекты, с которыми приходится иметь дело, — это прежде всего плазма солнечного ветра, который вытекает из солнечной короны и заполняет собой всю солнечную систему. При взаимодействии солнечного ветра с собственными магнитными полями планет возникают различного типа магнитосферы. Солнечный ветер является основным фактором, который определяет характеристики и структуру околопланетных оболочек. Классическим примером является магнитосфера Земли, при обтекании которой солнечным ветром образуется большая магнитная полость в межпланетной среде, и вследствие сверхзвукового характера солнечного ветра образуется характерная ударная волна.

Основное требование, предъявляемое к космической плазменной аппаратуре, — обеспечение возможности надежного измерения трехмерной функции распределения частиц по скоростям. Это связано с тем, что, попадая в разные области космического пространства, заранее невозможно предсказать, с какого направления придут частицы. Необходимо обеспечить измерение других плазменных характеристик, наиболее простыми из которых являются динамические параметры течения плазмы, требующие фактического обзора всех направлений. При этом функции распределения заряженных частиц по скоростям или энергиям являются наиболее информативным продуктом плазменных анализаторов, с помощью которых исследуются характерные физические процессы в космической плазме. Важен также и массовый состав этой плазмы, по которому можно определить источники ионов, характер их нагрева и ускорения.

Особый интерес вызывают исследования пространственных и волновых структур в космической плазме. Поскольку движение последней в космическом пространстве происходит с очень большой скоростью (порядка сотен километров в секунду), то для получения характеристик этих структур необходимо высокое временное разрешение аппаратуры. Чувствительность приборов и их широкий динамический диапазон измеряемых параметров являются важным фактором в процессе изучения космической плазмы. Боль-

шинство измерений в космосе ведется на космических аппаратах, которые стабилизированы вращением. Это иногда удобно, так как, имея возможности обзора всех направлений, можно использовать вращение космического аппарата для измерений пространства скоростей заряженных частиц плазмы. Часто применяются простые электростатические анализаторы, которые различным образом ориентируются относительно оси вращения космического аппарата, и, таким образом, эти анализаторы осматривают специфические конусы в пространстве скоростей. Происходит сканирование потока частиц по энергии за время вращения космического аппарата вокруг оси (несколько секунд). Проблема в том, что необходимо постоянно сопоставлять чувствительность и производить взаимную калибровку этих электростатических анализаторов, так как характеристики детекторов во время полета могут меняться. Решение проблемы неравномерной чувствительности в угле зрения было найдено в 80-х годах, когда изобрели анализатор нового типа с равномерной характеристикой по углам в 360°. На спутнике "Винт" перед входным окном был поставлен электростатический сканер, который позволял изменять диаграмму направленности этого прибора. Он стал "рабочей лошадью" для современных космических исследований и применяется во многих космических аппаратах. В ИКИ РАН был разработан сложный прибор для измерения энергетического и массового составов ионов. Прибор имеет тороидальную конструкцию, в которую вмонтированы два электростатических анализатора, обеспечивающих двойную фокусировку, а также магнитный селектор, позволяющий разделять ионы по массам. Важным шагом в развитии аппаратуры стало использование электронных пучков на космическом аппарате для измерения электрического поля, поскольку за гиропериод электрическое поле смещает траекторию электронов.

Таким образом, измеряя смещение траектории пучка электронов, можно рассчитать действующее электрическое поле. Это один из самых сложных приборов, применяемых для изучения характеристик космической плазмы. Он состоит из электронной пушки, детектора, тороидального анализатора и системы изменения угла смещения. Управление таким прибором происходит с помощью компьютера, и понадобился не один месяц, чтобы научиться эффективно работать с ним.

Во Франции также был разработан прибор для изучения потоков ионов в космической плазме. В его состав также входит тороидальный электростатический анализатор, на выходе которого имеется анализирующий магнит. Он позволяет получать массовый спектр ионов. Прибор может использоваться также для измерения по-

тока нейтральных частиц, которые после ионизации анализируются по энергиям и массам.

Требования к космическим приборам усиливаются. Нужны плазменные детекторы с массой менее 1 кг. Такой легкий прибор требуется, например, для использования на спутнике Меркурия. Важно также повышать быстродействие приборов, особенно в тех областях плазмы, где происходит быстрое пересоединение магнитных силовых линий. Поставлена задача изучения процессов диффузии в области пересоединения, которая требует временного разрешения порядка 0,1 с, т. е. необходимо резко повысить быстродействие при измерении трехмерной функции распределения частиц по скоростям. Современные приборы позволяют это делать. В этих условиях качественная калибровка детекторов и стабильность работы прибора в целом являются серьезными, но преодолимыми проблемами. Приборостроение для исследования космической плазмы активно развивается, и в то же время оно является перспективным инновационным научным направлением.

В обзоре профессора Е. З. Гусакова "Развитие диагностики коротковолновых колебаний магнитоактивной плазмы методом усиленного рассеяния" были представлены данные о новом для УТС методе исследований замагниченной плазмы. Традиционная постановка эксперимента по коллективному рассеянию электромагнитных волн на плазменных флуктуациях состоит в том, что используется зондирующее излучение с частотой колебаний, во много раз превышающей все характерные частоты плазмы. В результате рассеяния на флуктуациях рассеянная волна распространяется под углом к падающей волне. Из диаграммы волновых векторов находится волновое число флуктуаций, приведших к рассеянию. Из частотного спектра рассеяния определяется частота этих флуктуаций, и далее довольно просто можно оценить амплитуду рассеянного сигнала, которая связана с плотностью электронов в плазме. В реальных условиях эксперимента рассеянный сигнал пропорционален объему, из которого приходит рассеянный сигнал, и этот сигнал оказывается обратно пропорционален модулю волнового вектора рассеянной волны.

Таким образом, чем больше волновой вектор, тем меньше сигнал. Если этот волновой вектор будет небольшим, то объем плазмы, в котором рассеивается волна, станет большим, тогда теряется локальность измерений, потому что зондирующий и рассеянный в плазме пучки будут сильно перекрываться. Локальность диагностики в этом случае невысока. Это один из недостатков этой диагностики. Другой недостаток состоит в том, что рассеянный сигнал, как правило, бывает очень мал. Эти недостатки заставляют экспериментаторов искать другие неклассические схемы для диагностики, основанной на

коллективном рассеянии. Неклассические схемы основаны на том, чтобы, наоборот, взять частоту излучения, близкую к характерным плазменным частотам. Существуют две схемы такой неклассической диагностики: первая — это флукуационная интерферометрия, которая работает в присутствии отсечки для зондирующей и рассеянной волн; вторая — это усиленное рассеяние, предложенное еще в 60-е годы применительно к плазме без магнитного поля.

При использовании схемы усиленного рассеяния в замагниченной плазме частота берется близкой к верхней гибридной частоте. Применительно к эксперименту для плазмы токамака для реализации этой схемы надо разместить зондирующие приемные антенны со стороны сильного поля (в неудобной области), возбудить необыкновенную волну и выбрать частоту такой, чтобы слой резонанса находился в камере. При этом зондирующая волна, распространяясь поперек магнитного поля, не будет испытывать сильного поглощения, если это не такая большая установка типа ИТЕР, и плазма не является термоядерной по плотности и температуре. Поглощение будет не сильное, и волна достигнет гибридного резонанса. Там излучение может рассеяться, и рассеянная волна придет назад. В рассеянной волне можно измерять частотные спектры. Если резонанс не в камере, то область верхнего гибридного резонанса оказывается закрыта "отсечкой". В больших установках типа токамак это делает применение диагностики проблематичным, потому что имеется слой плазмы, через который энергия излучения не может пройти. Но если это установка не токамак, а довольно маленькая трубочка с плазмой размером, существенно меньшим плазменной длины волны для частоты зондирующего излучения, то эта область оказывается прозрачной. В этом случае потери в области непрозрачности будут небольшими, и можно применять диагностику эффективно.

Начало применения диагностики — 80-е годы. Были получены интересные результаты, один из которых — зондирование ионно-звуковых волн, возбуждающихся в плазме в результате параметрической неустойчивости: волна СВЧ-накачки отражается от области резонанса и возбуждает ионно-звуковую плазменную волну, которая распространяется в сторону, противоположную градиенту плотности плазмы. Если в плазму вводятся еще и зондирующие СВЧ-волны на частотах, близких к частоте накачки, то они могут рассеиваться на ионно-звуковой волне. При этом, если измеряется зависимость амплитуды рассеянного сигнала от частоты зондирующей волны и от частоты волны накачки, то на основании этих измерений можно рассчитать флукуационные характеристики локальной области плазмы. У такой неклассической диагностики имеются достоинства и недостатки.

Достоинства — большое значение сечения рассеяния, кубически растущее с ростом волнового вектора; хорошая пространственная локализация, которая в условиях токамака незаменима; возможность широкого пространственного сканирования положения гибридного резонанса и тем самым проведения пространственных измерений флукуационных характеристик плазмы. И еще одно достоинство — измеряемый сигнал довольно большой, так как он интегрирован по волновым числам, при этом нет необходимости хорошо настраивать по углам аппаратуру, чтобы увидеть рассеянные волны. Они приходят в исследовательскую аппаратуру автоматически. Еще одно достоинство применения этой диагностики в стелларатор и токамак — это доступ к плазме через один вакуумный ввод, не нужно обеспечивать два доступа, так как принимающая и зондирующая антенны находятся в одном патрубке вакуумной камеры.

Недостаток диагностики — плохое разрешение по волновым векторам вследствие интегральности метода. Как можно "научить" эту диагностику видеть с разрешением по волновым векторам? Для этого можно использовать то, что зондирующая волна очень сильно замедляется при приближении к резонансу: чем она ближе к резонансу, тем медленнее групповая скорость. Поэтому для достижения точки обратного рассеяния на коротковолновых флукуациях надо время. Чем меньше длина волны флукуации, тем больше требуется времени. Если интеграл сосчитать в окрестности гибридного резонанса, оказывается, что время задержки сигнала, рассеянного на флукуациях с данным волновым вектором, пропорционально модулю этого волнового вектора. При этом получаем, что измеряемые временные задержки как для токамака, так и для линейных установок — это единицы или десятки наносекунд. Для эффективного применения такой макроскопической схемы нужно зондировать плазму короткими импульсами и открывать анализирующую аппаратуру для приема рассеянного сигнала тоже на короткое время. Разные времена задержки будут отвечать сигналам, связанным с разными волновыми числами. Зондируя последовательностью импульсов и принимая последовательность рассеянных сигналов, а также выполняя одновременно и частотный анализ рассеянного сигнала, можно для каждой частоты рассеивающего сигнала найти волновой вектор. Эта идея была проверена и реализована вместе с коллегами на экспериментальной установке в г. Минске. В плазме возбуждались ионно-звуковые волны в результате параметрической неустойчивости, и наблюдалось рассеяние с помощью схемы, в которой использовалась последовательность микроволновых импульсов наносекундной длительности с разрешением по временам задержки рассеянных сигналов. В ре-

зультате этих исследований получено подтверждение развитых теоретических представлений, что позволило ставить подобные эксперименты на токамаках ФТ-1 и ФТ-2.

Таким образом, на основе эффекта усиленно-го рассеяния верхнего гибридного резонанса создана диагностика мелкомасштабных плазменных колебаний, которая в простой геометрии эксперимента позволяет производить измерения с разрешением по частотам и волновым векторам. Предсказан и обнаружен экспериментально эффект задержки сигнала рассеяния назад в области верхнего гибридного резонанса. С помощью диагностики времяпролетного усиленного рассеяния выполнены первые наблюдения высоких ионных бернштейновских гармоник, которые возбуждались в плазме в результате эффекта линейной трансформации в области нижнего гибридного резонанса. С помощью диагностики корреляционного усиленного рассеяния в разряде низкого давления обнаружено возбуждение ионно-звуковой турбулентности, приводящей к аномальному поглощению для геликоновых волн. В экспериментах по рассеянию назад на токамаке ФТ-2 в верхнем гибридном резонансе обнаружен усиленный эффект Доплера, на основе которого предложен высокоточный метод измерения скорости вращения плазмы, отличающийся хорошим временным и пространственным разрешением.

В докладе профессора А. И. Кислякова "Диагностика горячей плазмы по потокам нейтральных атомов" дан обзор работ по состоянию и перспективам развития корпускулярной диагностики применительно к решению проблемы измерения температуры ионов в современных установках с горячей плазмой и в перспективной установке ИТЭР. Диагностика по нейтральным частицам — основной инструмент для изучения поведения ионов в плазме в токамаках и стеллараторах. Она позволяет измерять энергетические спектры атомов, испускаемых плазмой. Путем анализа этих спектров можно определять ионную температуру, изучать процессы ускорения ионов при СВЧ-нагреве плазмы, а также торможение быстрых ионов при пучковом нагреве плазмы. Одно из основных достоинств диагностики заключается в том, что она позволяет определять изотопный состав ионной компоненты плазмы. Корпускулярная диагностика включена в пусковой набор важнейших диагностик для ИТЭР. Физикотехнический институт им. А. Ф. Иоффе РАН традиционно занимается разработкой аппаратуры корпускулярной диагностики и проводит исследования с ее применением на разных токамаках и стеллараторах. Участие в исследованиях позволяет определять задачи для дальнейшего развития аппаратуры.

Какие анализаторы на данный момент разработаны и достаточно широко применяются?

Анализаторы типа "Аккорд-12" и "Аккорд-24" — это результат многолетней работы по их развитию. Прототип таких анализаторов используется уже 30 лет. Он позволяет измерять параллельно потоки атомов водорода и дейтерия в достаточно широком диапазоне энергий. Анализатор позволяет измерять потоки атомов, начиная с энергий 200 эВ, количество каналов 12 или 24, соответственно. Новой разработкой является компактный анализатор, который позволяет тоже одновременно измерять потоки атомов водорода и дейтерия, но в отличие от "Аккорда" он использует обдирку в тонких пленках, и поэтому минимальная энергия, с которой он может реально измерять потоки атомов, составляет ~800 эВ. Последняя версия такого анализатора изготавливается для японского LHD-стелларатора. Японцы собираются более подробно изучать торможение пучка тяжелых ионов, поэтому диапазон анализируемой энергии увеличен со 110 до 160 кэВ. Анализаторы работают в обычной горячей плазме с небольшим потоком нейтронов — до 10^7 нейтронов/см²·с. Если переходить к специальной аппаратуре для исследования на крупных токамаках типа JET или в будущем на установке типа ИТЭР, то при работе с тритиевой плазмой возникают достаточно интенсивные нейтронные потоки — на уровне 10^9 нейтронов/см²·с и выше. Для этих условий разработан новый анализатор, называемый сепаратором изотопов. Он одновременно дает возможность измерять потоки атомов водорода, дейтерия и трития. Минимальная энергия регистрируемых атомов составляет 5 кэВ, максимальная энергия для атомов водорода — 700 кэВ. Последний тип анализатора, который предназначен для использования в области высоких энергий, вплоть до 4 МэВ, предназначен для исследования потоков атомов гелия, которые возникают в плазме при торможении α -частиц.

Основные физические процессы, используемые в анализаторах быстрых атомов, состоят в следующем. Сначала атомы должны быть ионизованы, для чего используется "обдирка" (ионизация) либо в газе, либо в тонкой углеродной пленке. Следующий важный процесс — это ускорение образовавшихся вторичных ионов после обдирки атомов. В стандартном анализаторе ускорение может производиться вплоть до энергий ~100 кэВ. Это ускорение используется для того, чтобы производить выделение полезных сигналов на сильном нейтронном фоне, а само выделение сигналов осуществляется с помощью амплитудного анализа импульсов, генерируемых в детекторе, в котором поток ускоренных вторичных ионов преобразуется в электрические импульсы. До попадания в детектор поток вторичных ионов анализируется в магнитных и электрических полях специальной конфигурации. Особенность последних версий анализаторов состоит в том, что применяется постоянный

магнит. В качестве детекторов в анализаторах, работающих в обычной плазме с нормальным потоком нейтронов, используются микроканальные умножители российского производства типа ВУ-6 или микроканальные умножители, разработанные в Германии, или керамические фотоумножители. Требования к этим детекторам повышенные — им приходится работать в условиях интенсивных нейтронных потоков. Первое требование, предъявляемое к таким детекторам, состоит в том, чтобы были обеспечены их радиационная стойкость и долговечность при нейтронном облучении. Второе требование — должна быть обеспечена их низкая чувствительность к нейтронам и гамма-квантам. Наиболее перспективными детекторами являются фотоумножители с тонким сцинтиллятором. Это связано с тем, что фотоумножители обладают наиболее высокой радиационной устойчивостью по сравнению с другими типами детекторов. Однако очень мало данных о том, как фотоумножители переносят сильные нейтронные потоки. Поэтому надо производить отбор специальных фотоумножителей, обладающих низкой чувствительностью к нейтронам. Чувствительность их к нейтронам может зависеть от самых случайных величин: от состава материала, который используется при его производстве, от каких-то примесей, которые там имеются. Перед входным окном фотоумножителя устанавливается тонкий сцинтиллятор толщиной от 1 до 25 мкм. Выбор толщины определяется так, чтобы пробег детектируемой частицы полностью укладывался в этом тонком слое сцинтиллятора. Дальнейшее увеличение толщины сцинтиллятора приводит к повышению его чувствительности к нейтронам. В качестве сцинтиллятора в современных анализаторах используется цезий—йод, который напыляется на тонкое стекло, а само стекло приклеивается к входному окну фотоумножителя. На выходе фотоумножителя обязательно используется амплитудный анализ выходных импульсов, т. е. фотоумножители должны быть спектрометрического типа. Эффективность анализаторов для потоков атомов водорода в диапазоне энергий 1—10 кэВ достигает максимума и составляет величину $\sim 10^{-2}$. Компактный анализатор, у которого обдирка атомов производится в тонкой пленке, имеет характеристики эффективности лишь немного хуже, а в области энергии 600 кэВ она существенно выше. В современных анализаторах хорошо организована система анализа и пространственной фокусировки, поэтому их максимальная эффективность приближается к 1 в области высоких энергий.

Остановимся на результатах, которые были получены в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН на токамаке "Глобус". Основные параметры установки "Глобус" следующие: длительность импульса тока в плазме

составляет нескольких сотен миллисекунд, плотность плазмы достигает значения $6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; электронная температура около 600 эВ, максимальное значение ионной температуры — 300 эВ. Для обработки поверхности вакуумной камеры в целях улучшения качества удерживаемой плазмы использовалась технология боронизации, после которой содержание водорода в дейтериевой плазме резко возрастает (с 10 % оно увеличивается до 70—80 %).

Таким образом, корпускулярная диагностика позволяет измерять и изотопные соотношения в плазме. Она эффективно применяется также и для измерений ионной температуры плазмы при ее нагреве с помощью нейтральной инжекции.

Корпускулярная диагностика, разработанная в ФТИ РАН, эффективно применяется на крупнейших установках по всему миру. Так, измерения, сделанные на токамаке JET (Англия—ЕС) в конце прошлого года, показали, что в дейтериевой плазме с напуском трития в процессе разряда атомы трития разной энергии выходят из разных участков плазменного шнура. Таким образом, измеряя потоки атомов разных энергий, можно построить пространственное распределение ионов трития в плазменном шнуре токамака. Нагрев плазмы в токамаке JET происходил за счет нейтральной инжекции и ввода в плазму высокочастотного излучения на частоте ионного циклотронного резонанса. После того как происходит напуск трития, резко увеличивается из плазмы токамака поток термоядерных нейтронов с энергией 14 МэВ, который со временем спадает. Каналы анализатора, регистрирующие поток атомов трития, хорошо реагируют на напуск газообразного трития. Установлено также хорошее разделение между фоновыми нейтронными сигналами и полезными сигналами атомов дейтерия и трития.

Важные и ответственные задачи стоят перед научным коллективом, разрабатывающем анализаторы для корпускулярной диагностики горячей термоядерной плазмы в связи с проектированием установки ИТЭР. Во-первых, это измерение в плазме ИТЭР изотопного состава с целью его контроля для оптимизации процесса горения. Во-вторых, это измерение функции распределения высокоэнергичных частиц, которые образуются в результате горения тритиево-дейтериевой плазмы. Важные дополнительные требования к анализаторам для применения их на установке ИТЭР — временное разрешение должно быть не хуже 100 мс, а погрешность измерений не хуже 10 %. Диагностический комплекс, который предполагается разместить на ИТЭР, состоит из двух анализаторов, которые смотрят на плазму через один патрубок, при этом их линии обзора практически параллельны друг другу. Первый анализатор предназначен для анализа потока атомов гелия, выходящих из плазмы с энергиями

выше 1 МэВ, второй — для регистрации низкоэнергетичных атомов с энергиями ниже 1 МэВ. Характерные размеры анализаторов — около 2 м. Прототипы таких анализаторов уже испытаны на установке JET. Функции светимости на JET для профилей плазмы схожи с теми, которые ожидаются на установке ИТЭР. Низкоэнергетичный анализатор, который предполагается использовать для контроля изотопного отношения в плазме, будет работать при энергии атомов около 150 кэВ. Ожидаемые скорости счета атомов составят около 10^3 импульсов/с, чего достаточно для обеспечения нужного временного разрешения и точности не хуже 10 %. Однако в будущих исследованиях плазмы на установке ИТЭР имеется проблема, решение которой еще предстоит найти с помощью корпускулярной диагностики. Эта проблема состоит в том, что в некоторых сценариях работы ИТЭР должен использоваться пучковый нагрев плазмы с инжекцией потока атомов дейтерия с энергией тоже около 1 МэВ. В этом случае, к сожалению, спектр выходящих из нагреваемой плазмы дейтериевых атомов термического происхождения будет искажен тормозящимися в плазме атомами нагревающего пучка. Сейчас проводятся расчеты этих процессов для выяснения влияния рассеяния на ионах плазмы при торможении нейтрального греющего пучка на поток термализованных атомов из плазменного шнура ИТЭР. Выполнены также расчеты радиальных распределений α -частиц в плазме ИТЭР, которые ожидаются в процессе термоядерного горения в тритии.

Получены ожидаемые энергетическое и радиальное распределения температуры в плазме ИТЭР, которые позволяют оценить потоки атомов гелия, генерируемые в процессе горения. В случае ИТЭР образование этих потоков возможно за счет перезарядки гелиеподобных ионов бериллия или углерода. В результате рассчитаны зависимость скорости счета атомов гелия от их энергии и концентрация атомов гелия при условии обеспечения эффективного среднего значения заряда ионов термоядерной плазмы по отношению к заряду ионов водорода около 1,7.

Подводя итоги работ по развитию корпускулярной диагностики термоядерной плазмы, можно утверждать, что в России разработаны анализаторы потоков нейтральных атомов из горячей плазмы для широкого энергетического интервала от 0,1 до 4 МэВ. Эти анализаторы способны работать в нейтронных полях с высокой интенсивностью вплоть до 10^9 нейтронов/см²·с. Анализаторы успешно испытаны в экспериментах на ряде плазменных установок с горячей плазмой, включая крупнейшие в мире. Они имеют хорошие перспективы для применения на будущем международном экспериментальном реакторе-токамаке ИТЭР.

*

На секции “Магнитное удержание высокотемпературной плазмы” (председатель секции — А. И. Мещеряков) были представлены 99 докладов, из них 18 докладов заслушаны на устных и 81 — на стендовых заседаниях. Работы были выполнены сотрудниками 15 российских научных организаций; 10 докладов выполнены совместно с сотрудниками зарубежных научных центров из Германии, Японии, США, Испании, Финляндии, Южной Кореи и Украины.

На конференции были представлены результаты экспериментов, выполненных на действующих российских термоядерных установках: токамаках Т-10 (ИЯС РНЦ “Курчатовский институт”), Т-11М (ТРИНИТИ), “Туман-3М”, ФТ-2, “Глобус-М” (ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН); стеллараторе Л-2М (ИОФ им. А. М. Прохорова РАН) и открытых ловушках “АМБАЛ-М”, ГДЛ и ГОЛ-3-II (ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН), а также на зарубежных токамаках и стеллараторах: ASDEX, TORSUPRA, W7-AS (ФРГ), LHD (Япония), TJ-II (Испания).

Не ослабевают интерес исследователей к изучению L—H-перехода и возникновению транспортных барьеров. В докладе В. А. Рожанского был представлен обзор теоретических и экспериментальных работ в области физики высокотемпературной плазмы, выполненных на кафедре физики плазмы Санкт-Петербургского Государственного политехнического университета. В частности, сотрудниками кафедры выполнен цикл исследований, посвященных изучению перехода в H-режим, инициированного различными способами. Использование доплеровского рефлектометра позволило проследить за профилем полоидальной скорости при возникновении внутреннего транспортного барьера на токамаке “Туман-3”.

Доклад С. В. Лебедева был посвящен исследованию L—H-перехода на токамаке ASDEX Upgrade (Германия) в целях выяснения причин увеличения пороговой мощности L—H-перехода при низкой плотности плазмы. При плотностях выше $3,25 \cdot 10^{19}$ м⁻³ пороговая мощность соответствует скейлингу, описывающему данные ASDEX Upgrade: $P_{th} = 1,98 n_e^{0,79} B_i^{0,56}$, тогда как при меньших плотностях $2,1 - 3,25 \cdot 10^{19}$ м⁻³ был обнаружен значительный разброс в пороговой мощности, что свидетельствует о существовании других факторов, влияющих на вид зависимости P_{th} . Полученные экспериментальные факты указывают на существенную роль электрон-ионного теплообмена в механизме L—H-перехода.

Значительное число работ, представленных как на устной, так и на стендовой секции, было посвящено экспериментам на открытых ловушках: ГДЛ, ГОЛ-3, “АМБАЛ-М”. Исследования на этих установках направлены на то, чтобы повысить параметры плазмы и показать возможность осуществления режима мощного источни-

ка термоядерных нейтронов на основе открытых ловушек. Такой источник будет востребован в ближайшее время для испытания конструкционных материалов, стойких по отношению к длительному воздействию на них мощных потоков нейтронов с энергией 14 МэВ.

В докладе А. В. Бурдакова "Быстрый нагрев плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3" приведены результаты, полученные на установке ГОЛ-3 после ее модернизации. В частности, соленоид, который удерживает плазму, приведен в режим гофрировки по всей длине таким образом, чтобы создать многопробочную ловушку, состоящую из 55 ячеек. Увеличена также плотность энергии греющего пучка. В результате проведенной модернизации появилась возможность работать с плазмой плотностью $(0,5-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, при этом время удержания плазмы достигает величин $(0,3-1) \text{ мс}$.

Широко представлен экспериментальный материал, полученный на токамаке Т-10. Здесь проводятся работы по исследованию электронной теплопроводности и турбулентности в режимах с нецентральной ЭЦР нагревом и изучению удержания плазмы при плотностях, близких к пределу по Гринвальду.

В докладе Е. А. Вещева "Особенности удержания плазмы в Т-10 при ЭЦР нагреве и $n_e \sim n_G$ " приведены результаты экспериментов как с газовым напуском, так и с инъекцией дейтериевых пилет при плотностях, близких к пределу по Гринвальду. Показано, что при плотностях $n_e < 0,6 n_G$ энергетическое время жизни растет с ростом плотности, а при $n_e > 0,6 n_G$ наблюдается насыщение этой зависимости, что можно объяснить появлением электронной градиентной моды. Проверке этой гипотезы и была посвящена данная экспериментальная работа. Эксперименты с инъекцией дейтериевой пилеты не позволили, однако, однозначно подтвердить данную гипотезу.

В докладе Н. Н. Тимченко "Исследование излучения плазмы токамака Т-10 в режимах с различным содержанием примесей" рассматриваются случаи с низким и повышенным содержанием примесей в плазме при изменении размеров плазмы и условий взаимодействия плазмы со стенкой и с лимитером. Выполнено компьютерное моделирование с использованием кодов ZIMPUR и ASTRA.

На стеллараторе Л-2М продолжены эксперименты по исследованию режимов с низким уровнем радиационных потерь. Эти режимы получаются после проведения боронизации вакуумной камеры. Применение боронизации позволило расширить диапазон плотности плазмы ($n_e = (0,3-3,0) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) и греющей плазму мощности СВЧ-излучения ($P = 50-300 \text{ кВт}$), существенно уменьшить мощность излучения из плазмы. Выходящая из плазмы мощность излучения для режима с плотностью $n_e = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

не превышает 10 % от вводимой СВЧ-мощности. Энергетическое время жизни в этих режимах хорошо описывается международным стеллараторным скейлингом ISS 95. При мощности нагрева 250 кВт и плотности плазмы $n_e = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ энергосодержание плазмы составляет величину $W = 650 \text{ Дж}$. На стеллараторе исследовалась также стадия свободного распада энергии после выключения электронного циклотронного нагрева на второй гармонике электронной циклотронной частоты. Показано, что удержание плазмы как на стационарной стадии нагрева, так и на стадии свободного распада энергии (первые 2-3 мс, когда излучение из плазмы не играет еще заметной роли в энергетических потерях) хорошо совпадают со скейлингом ISS 95. Этот результат позволяет сделать заключение о том, что поглощаемая плазмой СВЧ-мощность в режиме ЭЦР-нагрева не вносит дополнительных энергетических потерь при удержании плазмы в стеллараторе Л-2М.

*

На секции "Инерциальный термоядерный синтез" (председатель секции — Г. В. Иваненков) было заслушано 11 устных и 39 стендовых докладов из 16 научных организаций России, двух научных организаций ближнего зарубежья и семи — из зарубежных стран. Были проведены два устных и два стендовых заседания, на которых председательствовали В. Б. Розанов и Г. В. Иваненков.

Большой интерес среди устных докладов вызвали сообщение А. Э. Бугрова "Экспериментальное исследование физических процессов в пористых мишенях низкой плотности, облучаемых мощными лазерными импульсами", и доклад С. А. Пикуза "Использование жесткого излучения Х-пинча для диагностики взрыва тонких проводников в различных средах", а также доклад С. Ф. Гаранина "Подавление филаментации в плазменном фокусе с помощью предионизации, создаваемой вспомогательным разрядом от высоковольтного быстропеременного источника".

Среди стендовых докладов наиболее активно обсуждались сообщения А. С. Нужного "Прогноз развития НТР-индуцированного турбулентного перемешивания в задаче лазерного термоядерного синтеза с помощью методов искусственного интеллекта", доклад В. В. Вихрева, С. А. Пикуза и других о резистивной стадии токового нагрева проволок в средах, а также два доклада И. В. Волобуева и других об измерении интенсивности нейтронного выхода в плазменном фокусе.

*

Секция "Физические процессы в низкотемпературной плазме" (председатель секции — профессор В. С. Воробьев) работала в рамках Совета РАН по проблеме "Физика низкотемпературной

плазмы". Было представлено 26 устных докладов и 32 стендовых сообщения.

Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям: лазерная плазма, фазовые превращения, уравнения состояния плазмы, транспортные и радиационные свойства плазмы, различные виды электрических разрядов в газовых и конденсированных средах. По этим же направлениям можно классифицировать и стендовые доклады. На секции был представлен ряд докладов, связанных с возможными технологическими применениями низкотемпературной плазмы.

Результаты конференции свидетельствуют о высоком уровне экспериментальных и теоретических исследований, проводимых в России, применительно к такому новому объекту, как пылевая плазма. Намечился известный прогресс в описании разрядов, протекающих в существенно неравновесных условиях. Проведено экспериментальное и численное исследование формирования сильноточных импульсных разрядов и эффективности генерации вакуумного ультрафиолетового излучения с помощью наносекундных импульсов с амплитудой напряжения до 50 кВ. Проведен термодинамический расчет и получены решения уравнения состояния плазмы в смеси водорода с гелием и малыми добавками тяжелых элементов в диапазоне термодинамических параметров, соответствующих условиям и химическому составу реальной плазмы Солнца. Достигнут прогресс в описании термодинамических и гидродинамических явлений в конденсированных средах, приводящих к появлению низкотемпературной частично ионизованной, а затем и полностью ионизованной плазмы. Речь идет о широкодиапазонных уравнениях состояния и фазовых переходах во внешних полях. В целом работа секции "Физические процессы в низкотемпературной плазме" была успешной и прошла на высоком уровне.

*

На секции "Физические основы плазменных и лучевых технологий" (председатель секции — профессор А. Ф. Александров) были представлены 42 доклада, из них 8 заслушаны как устные, остальные — стендовые. Доклады представлены ведущими научными центрами России, а также научными коллективами Белоруссии. Значительные достижения продемонстрировали ведущие научные институты: ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, ОИВТ РАН, ИПФ РАН, ИПМ РАН, ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, ИСЭ СО РАН, РНЦ "Курчатовский институт", РФЯЦ-ВСИТФ им. Е. И. Забабахина, ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, ИХФ им. Н. Н. Семенова РАН, НИИ ЯФ им. Д. В. Скобельцина МГУ, ИХТТИМ СО РАН.

Большое число докладов представили научные лаборатории ведущих высших учебных заведений России: МГУ им. М. В. Ломоносова, МГТУ им. Н. Э. Баумана, МФТИ, МИФИ, МЭИ, Казанский государственный университет, Казанский государственный технологический университет, Иркутский государственный университет, Дагестанский государственный университет и Томский политехнический университет.

По сложившейся несколько лет назад традиции ряд докладов был посвящен проблемам так называемой плазменной аэродинамики. Последние работы в этом направлении посвящены плазменной активации горения сложных углеводородных компонентов в плазме в условиях сверхзвуковых течений газа. К этим работам следует отнести исследования, проводимые научными группами МГУ, которые касались разработки методов зондовых измерений в разрядах в сверхзвуковых потоках (А. Ф. Александров, А. П. Ершов и др.), экспериментам по воспламенению сверхзвукового потока смеси воздуха с пропаном с помощью поверхностного разряда, моделированию процессов воспламенения и горения углеводородных топлив в условиях газового разряда (Р. С. Константиновский, Д. Л. Савков, В. М. Шибков), расчету оптимальных конструкций плазмотронов для воздействия на сверхзвуковые потоки топлива (Н. В. Арделян, В. Л. Бычков, И. Б. Тимофеев). К этому же направлению относится моделирование электро-разрядного зажигания в противоточных струях окислителя и горючего, выполненное в ИВТ РАН (В. А. Битюрин, А. Н. Бочаров, Е. А. Филимонова). Эти работы показывают перспективность использования плазмы для активации топлива и его эффективного воспламенения, а с другой стороны — демонстрируют развитие методов количественного описания химически активной плазмы в сложных газодинамических условиях.

К работам, связанным с модификацией топлива, применяемого в прямоточных двигателях, относятся исследования, выполненные коллективом из ИПМ и МГУ (В. Ю. Великодный, В. П. Воротилин, Ю. Я. Яновский, И. Б. Тимофеев) по созданию пористого топлива при ударно-волновой обработке и распылению турбулентной струи в потоке окислителя.

Вторая большая группа работ посвящена традиционным проблемам разработки плазменных технологий и применению плазмы для модификации свойств поверхностных и объемных свойств материалов. Работы группы ИОФ им. А. М. Прохорова РАН (В. А. Иванов, М. Е. Кобышев, А. М. Спиринов) посвящены созданию с помощью микроплазменных разрядов микро-рельефа на поверхности металлов и сплавов (Co—Cr), входящих в состав металлокерамических изделий, применяемых в медицине. Эта же

группа проводит исследования свойств микроволновых разрядов на поверхности монокристаллов КВг в целях создания высококонцентрированных слоев с центрами окраски.

Группой из ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН и ИХТТИМ СО РАН создан стенд для превращения веществ (термолиз органических солей для получения ультрадисперсных порошков металлов) при быстром СВЧ-нагреве. К этой теме относятся исследования по нанесению покрытий на различные материалы при использовании струйных высокочастотных разрядов, проведенные в Казанском государственном технологическом университете (И. Ш. Абдуллин, Р. Т. Галяутдинов, Н. Ф. Кашапов, А. Ф. Гайсин и др.), в частности этой группой выполнены исследования по модификации поверхности волокнистых органических материалов (натуральной кожи, текстиля).

В работе группы из КазГТУ (Н. Ф. Кашапов, А. Ф. Гайсин) исследованы возможности очистки поверхности металлических изделий с помощью парогазового разряда с жидким электродом.

В работе группы из ИОФ РАН и ИХФ (Э. М. Бархударов, В. М. Шмелев) рассмотрена возможность использования импульсного поверхностного разряда на границе раздела воды и атмосферного воздуха для очистки воды от органических загрязнений.

В работе группы из ИПМ и РязПГУ (Г. И. Змиевская и др.) проведено статистическое моделирование флуктуационной стадии фазовых переходов на поверхности твердого тела при росте тонких пленок.

Был выполнен ряд работ по использованию барьерных разрядов в плазмохимических и медицинских технологиях. Так, в работе в ИХФ РАН (В. М. Шмелев) проведено экспериментальное исследование образования окиси азота в этих разрядах.

В работе совместной группы МГУ и НПП ВНИИ электромеханики (В. М. Фадеев, У. Юсупалиев, С. А. Шутеев) исследованы неравновесные процессы, приводящие к изменению температуры в барьерном разряде, используемом в медицинских целях.

Широкий спектр работ был посвящен изучению разнообразных физических процессов, имеющих перспективы технологических приложений низкотемпературной плазмы.

Исследованию процессов в плазме импульсного объемного разряда в гелии посвящен цикл работ группы из Дагестанского государственного университета (О. А. Омаров, В. С. Курбанисмаилов и др.), в частности исследованы ионизационно-рекомбинационные процессы и процессы, приводящие к развитию неустойчивостей объемного разряда.

Ускорению многозарядных ионов металлов во фронте катодного факела вакуумного искрового

разряда посвящены работы группы из Иркутского государственного университета (В. Л. Паперный, С. П. Горбунов и др.). В них также исследованы особенности расширения и нагрева токонесущей плазмы в вакуумно-дуговых разрядах разного типа (И. А. Кринберг).

Генерация плазмы на основе сильнооточного газового разряда с внешней инжекцией электронов исследована в работе группы из ИСЭ СО РАН (М. В. Шандриков, А. В. Визирь и др.).

Двумерные распределения плотности плазмы в газовом разряде при низком давлении с учетом инерции ионов исследованы в работе группы из МГУ и ММА им И. М. Сеченова (С. А. Двинин, Е. В. Берлин, Ю. В. Морозов и др.).

Электровзрывной размыкатель тока с амплитудой в несколько сотен килоампер с характерным временем протекания тока порядка сотен микросекунд разработан в РФЯЦ — ВНИИТФ в рамках проекта “Байкал” для установки “МОЛ” (А. И. Ведерников, В. Ю. Кононенко, А. В. Павленко и др.). Там же выполнены эксперименты по обострению мощности при двухкаскадном электрическом взрыве проводников. Применение каскадной схемы позволило уменьшить длительность импульса напряжения со ~ 100 мкс до ~ 100 нс, при этом максимальный коэффициент перенапряжения составил около 70.

В работе Н. А. Попова из НИИ ЯФ МГУ проанализировано развитие лидерного канала при разряде в воздухе.

В области пучковых и пучково-плазменных систем проведено обсуждение проекта эксперимента по кильватерному ускорению на инжекционном комплексе ВЭПП-5 (энергия — 510 МэВ, число частиц в сгустке — до $5 \cdot 10^5$, эмиттанс — менее $2,3 \cdot 10^{-3}$ мрад·см). Этот проект представила группа из ИЯФ СО РАН (А. В. Петренко, А. Н. Скринский и др.).

Обсуждение Blow-out-режимов плазменного кильватерного ускорения проведено в работе исследователей из ИЯФ СО РАН (К. В. Лотов). Генерация электронного пучка с большой плотностью тока (более 10 кА/см²) реализована в группе из ИЯФ СО РАН (И. В. Кандауров, В. С. Бурмасов и др.).

Сплавление двухслойных металлических мишеней из алюминия и меди под воздействием сильнооточных электронных пучков было изучено на основе метода Монте-Карло в работе группы из ОИЭИЯИ “Сосны”, Белоруссия (А. И. Побитко, Г. М. Новик и др.).

В работе группы из МГУ и Исследовательского центра им. М. В. Келдыша (Н. В. Арделян, В. Л. Бычков, А. И. Головин) проведены экспериментальные исследования и теоретическое моделирование свойств электронно-пучковой плазмы, генерируемой в воздухе в большом объеме с использованием нерелятивистских пучков электронов.

Свойства пылевой плазмы исследовались в работах групп из ИПМ (А. Л. Бондарева, Г. И. Змиевская и др.) на основе разработанного кинетического плазменно-пылевого кода, и в ИОФ РАН (С. А. Майоров) на основе вычислительного эксперимента по формированию пространственного разряда вокруг структур протяженной формы.

На секции также обсуждалась работа по исследованию продуктов электрического взрыва титановых фольг, проделанная группой из ГНУП РЭКОМ РНЦ “Курчатовский институт”, РНЦ “Курчатовский институт” (В. М. Доровский, Л. И. Уруцкоев, Д. В. Филиппов и др.). В работе сообщается о наличии в осадке атомов Au и Pb, появление которых авторы связывают с трансформацией ядер Ti в плазме в результате электровзрыва. Обсуждались также исследования в области кластерного ядерного синтеза (В. Ю. Великодный, В. А. Битюрин).

В целом работа секции “Физические основы плазменных и лучевых технологий” была успешной, в ней было представлено значительное количество экспериментальных и теоретических работ, соответствующих мировому уровню исследований в этом направлении.

*

Доклады, представленные на конференцию, были опубликованы в сборнике “Тезисы докладов XXXI Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС”, а также в электронном виде представлены в системе “Интернет” по адресу www.fpl.gpi.ru.

Часть полных текстов докладов направлена авторами для опубликования в журналах “Физика плазмы” и “Прикладная физика”.

Следует отметить, что XXXI Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу стала важнейшим событием, оказавшим влияние на развитие научных исследований и их координацию в ведущих научных центрах России.

Финансовую поддержку конференции оказали Российский фонд фундаментальных исследований, Министерство промышленности, науки и технологий РФ, Министерство Российской Федерации по атомной энергии, Федеральная целевая программа “Интеграция”.

Организаторами прошедшей XXXI конференции являлись Научный совет по физике плазмы Российской академии наук, Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН, Научный совет РАН по комплексной проблеме “Физика низкотемпературной плазмы”, Институт теплофизики экстремальных состояний при Объединенном институте высоких температур РАН, Научно-технологический центр ПЛАЗМАИОФАН, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Подводя итоги конференции, следует отметить следующее.

1. Звенигородская конференция является единственным ежегодным крупномасштабным научным форумом ученых России, работающих в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза в нашей стране. Она проходила уже 31-й раз и собрала на свои заседания значительное количество участников из научных центров России и других стран. Конференция имеет фактически международный статус. Участники конференции получают возможность обмениваться информацией по всем актуальным проблемам физики плазмы, стоящим перед мировой наукой. Проведение конференции имеет большое значение для развития исследований по физике плазмы в России, и целесообразность ее проведения в дальнейшем не вызывает сомнения.

2. Качество экспериментальных работ, выполненных российскими учеными на крупных отечественных установках в области магнитного удержания горячей плазмы, сохраняется высоким, а количество работ растет, несмотря на физическое и моральное старение экспериментального и диагностического оборудования, слабый количественный рост научных коллективов.

3. Экспериментальные исследования в России по лазерному термоядерному синтезу имеют хорошую перспективу в связи со строительством новой экспериментальной установки “Искра-6” в НИИЭФ.

4. Развиваются исследования по инерциальному термоядерному синтезу на основе пучков тяжелых ионов.

5. Крупные успехи достигнуты в области создания мощных рентгеновских источников на основе ускорения лайнеров в импульсных электрических разрядах.

6. Увеличивается число работ, посвященных прикладным исследованиям в области физики плазмы, растет интерес к этим научным исследованиям среди молодежи, принявшей участие в работе конференции.

7. Значительно возросло число представленных на конференции работ, выполненных российскими учеными в научных центрах за пределами России — Европа, США, Япония. Это указывает на то, что авторитет и научная квалификация российских ученых остаются высокими, и они востребованы мировым научным сообществом.

В данном выпуске журнала “Прикладная физика” представлены статьи, подготовленные на основе некоторых докладов, которые были заслушаны на секциях “Физические основы плазменных и лучевых технологий” и “Физические процессы в низкотемпературной плазме” XXXI Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС.

Сотрудничество редакционной коллегии журнала "Прикладная физика" и Организационного комитета Звенигородской конференции в публикации материалов конференции является полезным и важным для продвижения достижений и результатов фундаментальной и прикладной физики плазмы на национальном и мировом научно-технологических рынках.

*Работа выполнена в рамках Программы
Президента Российской Федерации
для поддержки молодых российских ученых*

*и ведущих научных школ Российской
Федерации, проект НШ-1965.2003.2.*

Л и т е р а т у р а

1. Программа XXXI Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. — М.: ООО "Фирма Алком", 2004. — 32 с.
2. Тезисы докладов XXXI Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. — М.: ЗАО НТЦ ПЛАЗМАИОФАН, 2004. — 276 с. ISBN 5-94688-001-2.
3. http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXI/Zven_XXXI.html

Development of scientific researches on physics of plasmas and controlled thermonuclear fusion in Russia in 2003

V. A. Ivanov, M. L. Nagaeva

A. M. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

This is the review of scientific works and analysis of the basic directions of researches submitted in the reports on annual of XXXI-th Zvenigorod's conference on physics of plasmas and controlled thermonuclear fusion which was holded in Zvenigorod-town from February 16 till February 20, 2004.