

# Физика плазмы и плазменные технологии

**XXX Звенигородская конференция по физике плазмы  
и управляемому термоядерному синтезу**

УДК 621

## Актуальные направления и перспективы развития исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу

*В. А. Иванов, М. Л. Нагаева*  
Институт общей физики РАН, Москва, Россия

*Даны обзор научных работ и анализ основных направлений исследований, представленных в докладах на ежегодной — XXX Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. (УТС), состоявшейся в г. Звенигороде 24—28 февраля 2003 г.*

Конференция была посвящена 100-летию со дня рождения академика М. А. Леонтовича и 100-летию со дня рождения академика И. В. Курчатова.

М. А. Леонтович (1903—1981 гг.) — выдающийся российский ученый, внесший значительный вклад в развитие электродинамики, физической оптики, теории колебаний, радиофизики, физики плазмы и УТС. Академик М. А. Леонтович является создателем научной школы по физике плазмы в СССР и России.

И. В. Курчатов (1903—1960 гг.) — выдающийся российский ученый, глава научно-исследовательских и технологических работ по созданию атомного оружия в СССР, разработчик первой в мире атомной электростанции. Под его руководством были начаты работы по УТС. И. В. Курчатов — создал научную школу физиков-атомщиков в СССР и России.

На конференции было представлено 233 научных доклада из 58 российских и 31 иностранных научных центров, ведущих исследования по физике плазмы, УТС и плазменным технологиям:

- Институт ядерного синтеза Российского научного центра “Курчатовский институт”, Москва;
- Институт общей физики Российской академии наук, Москва;
- Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск;
- Институт экстремальных состояний Объединенного института высоких температур Рос-

сийской академии наук (ИТЭС ОИВТ РАН), Москва;

- ФГУП «Государственный научный центр Российской Федерации “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”» (ТРИНИТИ), г. Троицк, Московская обл.;
- Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, Москва;
- Институт математического моделирования Российской академии наук, Москва;
- Государственный политехнический университет, С.-Петербург;
- Московский физико-технический институт (Государственный университет), г. Долгопрудный, Московская обл.;
- Электротехнический институт (ЭНИН) им. Г. М. Кржижановского, Москва;
- Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук, Москва;
- Институт прикладной физики Российской академии наук, г. Нижний Новгород;
- Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск;
- Институт физической химии Российской академии наук, Москва;
- Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва;
- Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, С.-Петербург;
- ФГУП “Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова”, г. Металлострой, Ленинградская обл.;

- ООО “Прикладная физика” Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, С.-Петербург;
  - Государственное предприятие “Красная звезда”, Москва;
  - Институт спектроскопии Российской академии наук, г. Троицк, Московская обл.;
  - Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, Москва;
  - Российский федеральный ядерный центр “Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики”, г. Саров, Нижегородская обл.;
  - Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва;
  - Московский инженерно-физический институт (Государственный университет), Москва;
  - Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, п. Менделеево, Московская обл.;
  - ФГУП «Научно-производственное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики”» с заводом им. А. Г. Иосифьяна (НПП ВНИИЭМ), Москва;
  - Российский федеральный ядерный центр “Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики” (РФЯЦ ВНИИТР), г. Снежинск, Челябинская обл.;
  - Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Томская обл.;
  - Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова Российской академии наук, Москва;
  - Владимирский государственный университет, г. Владимир, Владимирская обл.;
  - Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва;
  - Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова (ГОИ), С.-Петербург;
  - Санкт-Петербургский институт машиностроения (ВТУЗ-ЛМЗ), С.-Петербург;
  - Институт лазерно-физических исследований РФЯЦ — ВНИИЭФ, г. Саров, Нижегородская обл.;
  - Государственный научный центр РФ “Институт экспериментальной и теоретической физики” (ГНЦ РФ ИТЭФ), Москва;
  - Институт высоких температур Российской академии наук, Москва;
  - Костромской государственный университет, г. Кострома;
  - Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума Госстандарта России, Москва;
  - Институт проблем химической физики Российской академии наук, г. Черноголовка, Московская обл.;
  - Филиал Института энергетических проблем химической физики Российской академии наук (ФИНЭПХФ), г. Черноголовка, Московская обл.;
  - Казанский государственный технический университет, г. Казань;
  - Казанский государственный технологический университет, г. Казань;
  - Казанский государственный университет, г. Казань;
  - Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском государственном университете, г. Томск;
  - Московский авиационный институт, Москва;
  - Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук, Москва;
  - Дагестанский государственный университет, г. Махачкала;
  - Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала;
  - Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С. П. Королева, г. Королев, Московская обл.;
  - Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва;
  - Физико-технологический институт Российской академии наук, Москва;
  - Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва;
  - Институт химической физики Российской академии наук, Москва;
  - Иркутский государственный университет, г. Иркутск;
  - НПП “Всероссийский научно-исследовательский институт электромеханики”, Москва;
  - Институт прикладной механики Российской академии наук, Москва;
  - Московский энергетический институт (Технический университет), Москва;
  - Всероссийский теплотехнический институт, Москва.
- Были представлены доклады из следующих иностранных научных организаций:
- Max-Planck Institut fur Plasmaphysik, Sub-Institut Graifswald, Euroatom Association, Graifswald, Germany;
  - Институт физики плазмы им. Макса Планка, г. Гархинг, Германия;
  - University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA;

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

- Институт перспективных источников энергии Университета Киото, г. Гокаша-Ужи, Япония;

- Национальный институт термоядерных исследований, г. Токио, Япония;

- Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков, Украина;

- Хельсинский технологический университет, г. Хельсинки, Финляндия;

- Institute for Nuclear Research, Kiev, Ukraine;

- Tokyo Institute of Technology, Meguroku, Tokyo, Japan;

- Chubu University, Kasugai, Japan;

- Forschungszentrum Rossendorf, Dresden, Germany;

- Институт физики плазмы, г. Прага, Чехия;

- Центр исследований по физике плазмы, Лозанна, Швейцария;

- Институт теоретической физики, Университет Дюссельдорфа, г. Дюссельдорф, Германия;

- LPMI, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France;

- Корнельский университет, США;

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

- CNRS, Ecole Polytechnique, France;

- Научно-исследовательский институт прикладной физики, г. Ташкент, Узбекистан;

- Университет Росток, г. Росток, Германия;

- Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Беларусь;

- Университет штата Айова, Айова, США;

- Лаборатория Резерфорда Апплетона, г. Оксфорд, Великобритания;

- Институт внеземной физики им. Макса Планка, г. Гархинг, Германия;

- Технический университет, г. Кемнитц, Германия;

- Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico-city, Mexico;

- Archimedes Technology Group Inc., San-Diego, USA;

- Чешский технический университет, г. Прага, Чехия;

- Университет г. Киото, г. Киото, Япония;

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

Общая численность авторов докладов составила 735 человек. На конференции были заслушаны доклады по четырём важнейшим направлениям физики плазмы:

1. Магнитное удержание высокотемпературной плазмы и термоядерный синтез в стационарных и квазистационарных магнитных ловушках.

2. Инерциальный термоядерный синтез.

3. Физические процессы в низкотемпературной плазме.

4. Физические основы плазменных технологий.

Состоялись четыре пленарных заседания, на которых были заслушаны 13 обзорных докладов об отечественных и мировых результатах исследований по актуальным направлениям физики плазмы, термоядерного синтеза и плазменным технологиям. Этим же направлениям исследований была посвящена работа соответствующих секций конференции, на которых обсуждались 70 устных и 150 стендовых докладов.

На конференции отмечалось, что за последний год наблюдается 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.

В докладе д-ра физ.-мат. наук Н. В. Иванова "Исследования по физике плазмы в поддержку проекта ИТЭР и их координация международными тематическими группами ИТРА" (РНЦ "Курчатовский институт") отмечалось, что в мировом научном сообществе наметились продвижения в развитии проекта Международного экспериментального реактора-токамака (ИТЭР). В результате усилий ученых стран — участниц международного соглашения по ИТЭР (Европейский Союз, Япония, Россия) за 10 лет совместной работы обобщены научные результаты мировых исследований по проблеме магнитного удержания термоядерной плазмы в замкнутых магнитных установках типа токамак и стелларатор. Проведены работы по физическому, техническому и технологическому обоснованиям возможности создания и успешной работы установки ИТЭР. Несмотря на то, что в России в настоящее время отсутствуют экспериментальные установки с рекордными параметрами (плотностью и температурой) плазмы, российские ученые внесли существенный вклад в проект ИТЭР. Успехи работ по международному проекту ИТЭР столь значительны, что в международное соглашение вступил Китай и вернулись США.

Ведутся переговоры о выборе страны и места для строительства ИТЭР; свои территории для его строительства предложили Канада, Япония, Франция и Испания.

Места для размещения установки ИТЭР в каждой из этих стран отвечают требованиям международного сообщества, однако в каждой из

стран имеются свои преимущества и недостатки, которые могут повлиять на окончательное принятие решения. Так, например, территориальная удаленность *Японии* от Европы и Америки, высокая стоимость жизни, а также слабое распространение знаний английского языка среди населения являются негативными факторами, снижающими шансы этой страны на размещение в ней ИТЭР. В то же время значительные финансовые и технологические возможности Японии, ее крупные успехи в термоядерных исследованиях в последние 10 лет повышают ее шансы в реализации проекта ИТЭР.

*Канада* является “новичком” в проекте ИТЭР и до сих пор занимала скромные позиции в проблеме магнитного удержания термоядерной плазмы. Тем не менее, Канада выдвинула свою кандидатуру в качестве страны размещения ИТЭР, опираясь в основном на США. В случае строительства ИТЭР в Канаде ключевую роль в его создании будут играть промышленность и технологии США. Научное сообщество Америки заинтересовано в строительстве ИТЭР в Канаде, так как ее территориальная и культурная близость позволит американским ученым легко переместиться в Канаду для участия в работах по ИТЭР. Относительная территориальная близость Канады к Европе, схожесть в культурных традициях и отсутствие языкового барьера (как в Японии) дает Канаде преимущества в глазах европейцев. Канада заинтересована в притоке высокоинтеллектуальных специалистов со всего мира, что, безусловно, скажется благоприятно на подъеме экономики Канады. В то же время в том месте, где Канада предлагает строить ИТЭР, практически отсутствует инфраструктура, но этот фактор не является непреодолимым препятствием, так как современная промышленность страны в состоянии в довольно короткий срок создать самую современную инфраструктуру на предлагаемой территории. Таким образом, шансы Канады в качестве страны—претендента на строительство ИТЭР остаются высокими.

*Франция* имеет большой опыт как в термоядерных исследованиях, так и в реализации крупных международных научных программ мирового значения. Франция — одна из ведущих стран Европейского союза. Участие ее в проекте строительства ИТЭР означает подключение к его реализации всей промышленной и интеллектуальной Европы. Однако Франция густонаселенная страна, а установка ИТЭР предполагает работу с радиоактивным тритием, нарабатываемым в процессе работы установки. Кроме того, воздействие выделяющихся в результате реакций термоядерного синтеза быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ на составные мате-

риалы установки будет приводить к возникновению наведенной радиоактивности во многих конструкциях. Уровень такой радиоактивности будет ниже, чем в котлах ядерных реакторах атомных электростанций, однако за время работы установки в течение 10—20 лет этот уровень радиоактивности составит столь большую величину, что в течение 10—30 лет после завершения работы установка не может быть разобрана из-за высокой остаточной радиоактивности элементов конструкции. После распада интенсивных радиоактивных короткоживущих изотопов разборка установки будет произведена с помощью специальных роботов, и ее части планируется утилизировать на территории принимающей страны. Все эти проблемы существенно более острые для густонаселенной Франции и Европы в целом, чем, например, для Канады. И эти обстоятельства снижают шансы Франции в качестве страны, принимающей ИТЭР.

*Испания* стала последним кандидатом, предлагающим свою территорию для строительства ИТЭР. Всего 10 лет назад Испания не была даже в списке стран, участвующих в термоядерных исследованиях. Но за эти годы Испания активно включилась в европейскую программу термоядерных исследований и при активном участии ученых Российской академии наук (ИОФ РАН, ФТИ РАН и ИПФ РАН) достигла значительных успехов как в строительстве сложных экспериментальных установок, так и в получении новых экспериментальных данных в области магнитного удержания горячей плазмы. Испания имеет те же преимущества, что и Франция, и за ней стоит Европейское сообщество. Для ученых США Франция и Испания практически одинаково удобны. Но, помимо тех же негативных моментов, что и для Франции, у Испании имеется дополнительный отрицательный фактор — испанская команда исследователей относительно молода, не имеет опыта строительства крупных установок мирового уровня, среди этой команды нет авторитетных ученых-термоядерщиков с мировыми именами, и опыт работы на больших термоядерных установках очень скромный. Учитывая, что страна—хозяйка ИТЭР должна будет играть ключевую роль во всех перечисленных выше процессах, эти отрицательные моменты для Испании сильно снижают ее шансы в качестве страны, принимающей ИТЭР.

Кроме того, Япония, как одна из ключевых стран проекта ИТЭР, негативно оценивает выдвижение Испании в качестве третьей страны—претендента от Европы (японцы в рамках проекта ИТЭР Канаду причисляют к Европе).

Таким образом, существует уже довольно много вариантов размещения ИТЭР, а острая

конкуренция среди стран-претендентов повышает вероятность того, что международное сообщество, продвигающее концепцию ИТЭР, получит возможность реализовать этот проект. По оценкам, создание установки ИТЭР обойдется сообществу стран-участников проекта в сумму от 4 до 10 млрд дол. США. Условия для страны, в которой будет строиться установка, таковы, что она должна вложить свои средства в объеме до половины стоимости всего проекта. Эта довольно большая сумма, но она будет возмещена за счет расширения занятости трудовых ресурсов, вовлечения в строительство местной промышленности, роста потребности высококвалифицированных специалистов в высокотехнологичных отраслях хозяйства принимающей страны. Совокупность этих обстоятельств обуславливает высокую конкурентную борьбу среди стран, претендующих на размещение установки ИТЭР на своей территории.

Окончательное решение о месте размещения и времени начала строительства ИТЭР еще не принято (принятие решения намечено на конец 2003 г.), тем не менее, сомнений в том, что проект будет реализован, нет. Работа над проектом расширяется и интенсифицируется. Разворачивается работа международных тематических групп по физике токамаков (International Tokamak Physics Activity) — структура, организованная на базе физических экспертных групп ИТЭР и состоящая из семи тематических групп и координационной комиссии. В задачи этих групп входят координация исследований по физике плазмы в токамаке и подготовка будущих термоядерных экспериментов, включая ИТЭР, а именно:

исследование термоядерной плазмы в условиях, близких к зажиганию термоядерной реакции в установках типа ИТЭР;

развитие методов диагностики плазмы, необходимых для физических исследований и управления плазмой в термоядерных установках типа ИТЭР;

экспериментальные исследования, представление экспериментальных данных в соответствии с согласованным форматом;

анализ экспериментальных данных;

создание, поддержание и обновление баз данных;

развитие теории и математическое моделирование, сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными.

В последний год мировое сообщество ученых, работающих по программе ИТЭР, достигло значительных результатов. Выполнены расчетно-теоретические исследования по анализу вертикальной устойчивости плазмы и срывов разряда, моделированию транспортных процессов энер-

гии и частиц в различных сценариях разряда в ИТЭР. Исследованы условия возбуждения магнито-гидродинамических (МГД) неустойчивостей в ИТЭР, разработаны методы активной стабилизации МГД неустойчивостей, ограничивающих предельно достижимые давления плазмы ИТЭР. Разработаны методы управления профилями давления и тока в плазме ИТЭР. Экспериментально продемонстрирован квазистационарный режим длительностью 7,5 с с управлением устойчивым профилем плазмы. На основе измерения продолжительности пика тепловой нагрузки при развитии неустойчивости типа I ELM сделан благоприятный прогноз для ожидаемых результатов на установке ИТЭР. Получены важные экспериментальные результаты, подтверждающие теоретические выводы о возможности управления частотой неустойчивости на границе плазмы, что определяет хорошие перспективы применения методов управления плазмой на установке ИТЭР и в термоядерном реакторе.

Таким образом, на основе выполненных работ мировой кооперацией ученых открываются хорошие перспективы успешной работы установки ИТЭР.

• В докладе “Современное состояние экспериментальных исследований по диверторам и МГД-устойчивости в токамаках” д-ра физ.-мат. наук С. В. Мирнова (ГНЦ РФ “ТРИНИТИ”) сделан обзор 70 научных работ, представленных на XIX конференции МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза, которая состоялась в г. Лионе (Франция) в 2002 г. На основании анализа представленных работ сделаны следующие выводы:

экспериментально показано, что проблема неустойчивостей плазмы типа ELM для установок типа ИТЭР представляется разрешимой;

экспериментально продемонстрирована возможность стационарной работы больших термоядерных установок с длительностью существования горячей плазмы более 100 с;

намечены технологические пути решения проблемы захвата радиоактивного трития материалами первой стенки токамака-реактора;

на действующих больших токамаках успешно работают активные методы подавления плазменных неустойчивостей типа NTM, RWM;

предложены эффективные методы ослабления последствий больших срывов.

Таким образом, экспериментальные результаты сообщества физиков, работающих на крупных экспериментальных установках по проблеме магнитного удержания горячей плазмы и термоядерного синтеза, дают основание для оптими-

стических прогнозов работы и перспективных результатов международного экспериментально-го реактора — токамака ИТЭР.

• В докладе академика Э. П. Круглякова (ИЯФ СО РАН) обоснована необходимость скорейшего строительства мощного нейтронного источника для испытаний базовых конструкций и материалов, которые необходимо выбрать для строительства ИТЭР.

Поскольку необходимо провести испытания при больших дозах нейтронного облучения с флюенсом порядка  $10^{20} \div 10^{22}$  нейтронов на  $1 \text{ м}^2$ , то для того чтобы набрать такие дозы, необходимо проводить испытания около 20 лет. За это время будет построен и выработает свой ресурс ИТЭР, будет начата разработка термоядерного реактора, для строительства которого необходимы данные испытаний стойкости материалов и конструкция в условиях нейтронного облучения. Предложено строительство мощного источника нейтронов на основе газодинамической магнитной ловушки, разработанной в Институте ядерной физики СО РАН.

• В обзорном докладе академика В. Е. Фортва рассмотрено современное состояние исследований пылевой плазмы как в наземных лабораториях, так и в условиях космоса. Пылевая плазма представляет собой ионизированный газ, содержащий заряженные частицы вещества микронных размеров. Совместное действие сил межчастичного взаимодействия и процессов диссипации энергии в такой плазме может приводить к формированию стационарных пылевых структур, подобных жидкости или твердому телу. В лабораторных условиях наблюдаемые пылевые структуры удерживаются в поле тяжести Земли электрическим полем страты (в тлеющем разряде) или приэлектродного слоя (в высокочастотном разряде), а гравитационное поле оказывает лимитирующее влияние на результаты экспериментов. Одним из существенных преимуществ экспериментов в условиях микрогравитации является возможность исследований в широком диапазоне параметров пылевой плазмы. Последняя является хорошей экспериментальной моделью для изучения различных транспортных процессов в системах взаимодействующих частиц, которые представляют широкий интерес как для физики неидеальной плазмы, так и для физики конденсированных сред, астрономии и т. д.

• Обзорный доклад Н. Л. Александрова, Э. М. Базеляна и Ю. П. Райзера посвящен проблеме активного и пассивного воздействий на молнию. Определяются условия, необходимые для зарождения и развития от объекта жизнеспособной восходящей молнии в медленно меняющемся поле грозового облака. Обсуждаются возможно-

сти создания плазменного канала с требуемыми параметрами с помощью лазерного излучения при подаче высоковольтного импульса и механическом удлинении объекта.

• Обзорный доклад В. С. Воробьева и С. П. Малышенко связан с исследованием поведения вещества в присутствии сильных (электрических или магнитных) полей. В частности, возникает сдвиг параметров фазового равновесия, и одна из фаз в присутствии поля оказывается в метастабильном состоянии. Обсуждается специфическая неустойчивость двухфазной системы в присутствии внешнего поля. Эта неустойчивость проявляется в некоторых режимах электрического взрыва проволочек и микроострий в вакуумных разрядах.

• Среди докладов по лазерному термоядерному синтезу в первую очередь следует отметить пленарный доклад С. Г. Гаранина, посвященный итогам и перспективам строительства во ВНИИЭФ нового лазерного комплекса — установки “Луч” как модуля мощного стеклянного лазера “Искра-6”. Многие вопросы, связанные с созданием установки, оказалось возможным решить на основе отечественных науки и промышленности; в конце 2002 г. состоялся физический пуск установки “Луч”. В связи с этим открылось широкое поле деятельности для проведения экспериментов и проверки многих теоретических предположений в области высоких плотностей энергии.

На секцию “Магнитное удержание высокотемпературной плазмы” были представлены 82 доклада (из них 20 — на устных и 62 — на стендовых заседаниях), выполненных сотрудниками 15 российских научных организаций, 8 докладов выполнены совместно с зарубежными научными центрами (из Германии, США, Швейцарии, Японии 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 (ИОФАН) и открытых ловушках “Амбал-М”, ГДЛ и ГОЛ-3-II (ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН).

Повышенный интерес на конференции вызвали доклады, посвященные экспериментам на открытых ловушках: ГДЛ, ГОЛ-3, “Амбал-М”. Исследования на этих установках направлены на то, чтобы показать возможность осуществления мощного источника 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 мощ-

ных потоков нейтронов с энергией 14 МэВ. Требования на поток нейтронов для таких задач составляют 2 МВт/м<sup>2</sup>. Так, в установке ГДЛ были применены источники нейтронов суммарной мощностью 4 МВт, что позволило достичь высоких значений  $\beta = 0,4$ . При этом в эксперименте не зарегистрировано потерь быстрых частиц, связанных с аномальным рассеянием и развитием микронеустойчивостей. Увеличение магнитного поля в центральной части газодинамической ловушки, а также мощности инжекции позволили увеличить содержание быстрых частиц и повысить интенсивность  $D-D$ -реакции в 5 раз.

На установке "Амбал" также проводятся эксперименты, направленные на достижение высоких  $\beta$ . Ряд мер, таких как увеличение плотности плазмы и уменьшение магнитного поля, позволили достичь  $\beta = 0,48$ . Оценка максимального  $\beta$  по МГД устойчивости для этой установки дает значение  $\beta = 0,8$ .

На установке ГОЛ-3 для нагрева плазмы был использован электронный пучок, при этом плотность плазмы повышается до  $n_e = 1,0 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$ , а температура ионов — до  $T_i = 1,0 \text{ кэВ}$ ; зарегистрирован выход  $D-D$ -реакции, а энергетическое время жизни составляет  $\tau_E = 0,3 \text{ мс}$ .

Обширный экспериментальный материал был получен на токамаке Т-10. Здесь проводятся исследования электронной теплопроводности в режимах с ЭЦР нагревом, связи турбулентности с процессами электронного транспорта, исследования удержания плазмы при плотностях, близких к пределу по Гринвальду.

• В докладе В. М. Леонова "Зависимость удержания энергии в L- и H-режимах токамака от аспектного отношения" приведен анализ международной базы данных и экспериментов на Т-10 по удержанию энергии в этих модах. Показано, что с ростом аспектного отношения убывает фактор превышения удержания в H-моду по отношению к удержанию в L-моду, и при аспектном отношении  $A = 5$  сравнивается удержание энергии в этих двух режимах.

Стеллараторное направление представлено работами, выполненными на установках Л-2М (ИОФАН) и "Ураган-3М" (ХФТИ, Украина) и W-7AS (IPP, ФРГ).

На стеллараторе Л-2М продолжены эксперименты по исследованию режимов с низкими радиационными потерями. Эти режимы получают 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 мощности СВЧ-излучения ( $P = 50-300 \text{ кВт}$ ), существенно уменьшить мощность излучения из плазмы, которая для режима с плотностью  $n_e = 1,0 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  не превы-

шает 10 % от вводимой 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 исследовалось также электронное циклотронное излучение на второй гармонике электронной циклотронной частоты в режимах с низкой плотностью плазмы до  $n_e = 0,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Было показано, что при понижении плотности происходит искажение спектра ЭЦ излучения плазмы, которое связывается обычно с отклонением функции распределения электронов по скоростям от максвелловской функции распределения.

В 2003 г. были представлены две работы, выполненные на торсотроне "Ураган 3М" (Харьковский Физико-технический институт, Украина). В одном докладе представлены результаты исследований диверторного потока. Обнаружена сильная асимметрия этого потока, причем преобладает выход плазмы в направлении тороидального дрейфа ионов. С ростом мощности нагрева наблюдается уменьшение плотности плазмы, что свидетельствует о повышении ухода частиц из плазмы, а с другой стороны — увеличивается поток дивергируемой плазмы и его вертикальная асимметрия с преобладанием потока на стороне тороидального дрейфа ионов. В работе содержится вывод о справедливости предположения об определяющей роли потерь быстрых частиц в формировании вертикальной асимметрии распределения диверторного потока в торсотроне У-3М.

Второй доклад посвящен исследованию формирования внутреннего теплового барьера вблизи рациональных значений магнитных поверхностей на стеллараторе "Ураган 3М".

Формирование барьера на торсотроне У-3М происходит, если длина свободного пробега электронов в области локализации рациональных поверхностей много больше длины тора, это условие выполняется при плотности плазмы  $n_e = 0,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и мощности нагрева  $P > 140 \text{ кВт}$ . После формирования барьера происходит переход в режим улучшенного удержания.

В области изучения фундаментальных процессов в плазме исследования ведутся в России при поддержке как Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), так и иностранных научных фондов. Несколько групп российских ученых (ИОФ РАН, ФИ РАН, ОИВТ РАН, ИПМ РАН) успешно работают в области фундаментальных теоретических исследований по взаимодействию сверхмощного электромагнитного излучения с плазмой и конден-

сированными средами. Интенсивное развитие эта область исследований получила благодаря технологическим успехам в области создания лазеров, генерирующих сверхкороткие (фемтосекундной длительности) импульсы с рекордными интенсивностями вплоть до  $10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>. Такие лазеры открывают новые возможности для фундаментальных и прикладных исследований в различных областях физики, ускорительной технике, медицине.

В рамках работы секции "Инерциальный термоядерный синтез" на четырех секционных заседаниях было представлено 57 докладов, включая 15 — устных и 42 — стендовых доклада. Представленные работы выполнены в ведущих научных центрах и вузах России (ФИ РАН, РФЯЦ ВНИИЭФ, ИЯС «РНЦ "Курчатовский институт"», ГНЦ РФ "ТРИНИТИ", МГУ, МИФИ, МФТИ и др.). В ряде докладов представлены результаты работ с участием российских и зарубежных ученых: Университет П. и М. Кюри (Франция), Корнельский университет (США), ИФП и ЛМ им. С. Калиского (Польша), Эколь Политехник (Франция), Чешский технический университет, Университет г. Киото (Япония).

От секции были представлены также два пленарных доклада по основной тематике: "Развитие исследований по лазерному термоядерному синтезу в РФЯЦ-ВНИИЭФ" (С. Г. Гаранин) и "X-пинч: эксперимент и моделирование" (С. А. Пикуз, ФИАН).

Необходимо отметить высокий научный уровень представленных докладов и разнообразие тематики. Традиционно полно представлены вопросы лазерного термоядерного синтеза (14 докладов) и сильноточных разрядов (пинчи, лайнеры — 17 докладов). По-прежнему популярна тематика теоретических исследований взаимодействия коротких мощных лазерных импульсов с плазмой (10 докладов). К сожалению, на данной конференции была слабо представлена тематика, связанная с термоядерным синтезом, инициируемым пучками тяжелых ионов (2 доклада), хотя в этой области имеются заметные достижения. Следует отметить, что вопросы математического моделирования изучаемых физических процессов затрагивались в большей части представленных докладов. При этом докладов, специально посвященных вопросам разработки и создания численных кодов, было немного. Это свидетельствует об имеющемся у исследователей достаточном наборе мощных математических программ, вполне обеспечивающих интерпретацию экспериментальных данных и позволяющих моделировать будущие эксперименты.

Разнообразная тематика остальных докладов демонстрировала широкий диапазон научных исследований высокого уровня — от технологии

изготовления мишеней лазерного термоядерного синтеза до рентгенографии биологических объектов с помощью излучения X-пинча. Большое количество новых сообщений экспериментального плана, в том числе и по современной диагностике быстропротекающих процессов, свидетельствует о возрастающей активности отечественной физической науки.

В докладах на секционных заседаниях были представлены новые экспериментальные работы по взаимодействию лазерного излучения с малоплотными пористыми материалами. Выявлены существенные отличия в поведении плазмы в зависимости от внутренней структуры пористого вещества, получено экспериментальное подтверждение ряда теоретических идей о возможности достаточно однородного ускорения тяжелых оболочек при поглощении лазерного излучения в пористом абсорбере.

Привлекает внимание доклад по экспериментальным исследованиям генерации рентгеновского теплового излучения на лазерной установке "Искра-5" и его распространения в различных материалах. Тем самым создана большая база данных для отладки и тестирования математических моделей и численных кодов. Отметим также доклад, посвященный подробным измерениям спектра и выхода быстрых ионов из твердотельных мишеней, облучаемых излучением СО<sub>2</sub>-лазера (до значений параметра  $I\lambda^2 \cong 5 \cdot 10^{15}$  Вт·мкм<sup>2</sup>/см<sup>2</sup>, здесь  $I$  — интенсивность излучения,  $\lambda$  — длина волны).

Заслуживает внимания доклад коллектива ИТЭФ по созданию ускорительно-накопительного комплекса для проведения экспериментов по взаимодействию тяжелых ионов с веществом. Работы ведутся с целью выхода в перспективе на значения плотностей потока энергии тяжелоионного пучка до  $5 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>, что открывает возможность проведения экспериментов по созданию и исследованию горячей плазмы, образующейся в результате воздействия на вещество пучков тяжелых ионов.

Среди докладов по тематике сильноточных разрядов, сжатия лайнеров и пинчей была представлена большая группа докладов от ТРИНИТИ (установка "Ангара"), в которой подробно исследовался процесс образования высокотемпературной излучающей плазмы при сжатии многопроволочного лайнера. На основании многочисленных экспериментальных исследований к настоящему времени сформированы представления о физической модели явления, существенным образом принимающей во внимание "холодный старт" и затянутое плазмообразование. С большим интересом был заслушан пленарный доклад по этой тематике, представ-

ленный С. А. Пикузом. Была представлена богато иллюстрированная история развития исследований по X-пинчу — от зарождения идеи до современных многочисленных применений этого яркого точечного источника рентгеновского излучения.

По секции "Физические процессы в низкотемпературной плазме" было проведено три устных заседания с общим числом докладов 21 и одно стендовое, на котором были представлены 24 работы. Устные доклады подытоживали исследования по следующим основным направлениям:

пылевая плазма (Ваулина, Пустыльник);

фазовые превращения, уравнения состояния и транспортные и радиационные свойства (Левашов, Ткаченко, Апфельбаум, Хищенко, Гавриленко, Шилкин, Яковлев);

различные виды разрядов (Герасимов, Паншечный, Бориев, Кондратьев и др.).

По этим же направлениям можно разбить и стендовые доклады, хотя здесь был ряд докладов, связанных с 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. Стартуя от кинетического уравнения Больцмана и последовательно рассчитывая скорости различных процессов и реакции (число которых может достигать нескольких десятков), удалось описать наблюдаемые в экспериментах характеристики. На конференции отмечено, что достигнут значительный прогресс в описании термодинамических и гидродинамических явлений в конденсированных средах, приводящих к появлению полностью ионизованной плазмы. Здесь речь идет о широкодиапазонных уравнениях состояния вещества и фазовых переходах во внешних электрических и магнитных полях. Это направление является своеобразным "мостом" для перехода от холодной низкотемпературной плазмы к горячей. Вместе с тем следует обратить внимание на отсутствие докладов, связанных с исследованием элементарных процессов в низкотемпературной плазме. В целом работа секции "Физические процессы в низкотемпературной плазме" была успешной и прошла на высоком уровне.

На секцию "Физические основы плазменных и лучевых технологий" было представлено 37 докладов, из них 15 были заслушаны как устные, остальные — стендовые. Доклады представлены ведущими научными центрами России, а

также научными коллективами Украины. Значительные достижения в области плазменных технологий продемонстрировали ведущие научные институты: ИОФ РАН, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, ИТЭС ОИВТ РАН, ИПФ РАН, Физико-технологического института РАН, ИЯФ СО РАН, ИВТ РАН, ИММ РАН, ИПМ РАН, Институт сильноточной электроники СО РАН, а также такие научные центры как ГНЦ РФ "ТРИНИТИ", РИЦ "Курчатовский институт".

Большое число докладов представили научные лаборатории ведущих учебных учреждений России: физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, МГТУ им. Н. Э. Баумана, МФТИ, МИФИ, МЭИ, Казанского государственного университета, Иркутского государственного университета, Дагестанского государственного университета.

По уже сложившейся традиции ряд сообщений был посвящен проблемам так называемой плазменной аэродинамики. Если раньше работы в этой области были посвящены в основном вопросу снижения лобового сопротивления летательных аппаратов (ЛА) за счет создания плазмы перед ЛА, то последние работы, представленные научными группами МГУ, касались таких проблем, как: поджиг горючей смеси в сверхзвуковых прямоточных двигателях (А. Ф. Александров, А. П. Ершов и др.), улучшение характеристик активированного пористого топлива (Е. А. Бушманов, В. Ю. Великодный и др.), дальнейшая разработка методов диагностики параметров плазмы газовых разрядов в сверхзвуковом потоке газа (А. А. Карачев, В. М. Шибков, Л. В. Шибкова), исследование характеристик нового типа разряда в сверхзвуковом потоке газа — СВЧ-разряда на внешней поверхности диэлектрической антенны (А. Ф. Александров, В. М. Шибков и др.), а также изучение взаимодействия сверхзвукового потока газа и плазменной струи (Н. В. Арделян, В. Л. Бычков и др.). Эти работы с одной стороны показали перспективность использования газовых разрядов в задачах создания активированного топлива и его эффективного воспламенения в прямоточных двигателях, а с другой — продемонстрировали возможность количественного описания процессов в газовых разрядах в сверхзвуковом потоке с помощью классических представлений физики газового разряда.

Вторая большая группа работ также традиционно посвящена проблемам плазменных технологий. Основная группа работ, представленных по этому вопросу, касалась исследования физических процессов в источниках плазмы, применяемых в различных задачах модификации

свойств поверхности. Эксперименты и расчеты показали, что в индуктивном ВЧ-разряде во внешнем магнитном поле основной механизм ввода энергии в плазму базируется на возбуждении и поглощении собственных волн плазмы — косых ленгмюровских и геликоновых волнах (А. Ф. Александров, Е. А. Кралькина и др.). Сходные процессы идут также в ВЧ- и СВЧ-источниках плазмы в ионном имплантере (С. Н. Аверкин, Я. Н. Суханов и др.). Процессы, происходящие в крупномасштабном СВЧ-источнике плазмы, предназначенном для переработки атомных отходов, исследованы в работе ИПФАН (А. А. Литвак, А. Г. Шалашов и др.). Формирование микрорельефа на поверхности твердых тел в микроплазменных разрядах изучалось в ИОФАН (В. А. Иванов и др.), получение коррозионно-стойких покрытий в вакуумно-дуговом разряде — в МГТУ (А. Н. Кузнецов, А. А. Романов). Исследованы также оптические характеристики тонкопленочных покрытий, получаемых с помощью плазменных струй (Р. Т. Галяутдинов, Н. Ф. Кашапов). Математическая модель взаимодействия плазменной струи от ВЧ-плазмотрона с поверхностью твердых тел построена в работе И. Ш. Абдуллина и В. С. Желтухина.

Ряд работ посвящен проблемам экологии. Это — работы по применению многоискрового высоковольтного импульсно-периодического разряда в воде в целях ее обеззараживания (А. М. Ампилов, Э. М. Бархударов и др.) и работы по применению стримерной короны для очистки дыма и газов (И. П. Кужекин, П. У. Юсупалиев и др.).

Широкий спектр работ был посвящен изучению разнообразных физических процессов, имеющих перспективы технологических приложений, в газовых разрядах различных типов: формированию плазменных структур в СВЧ-разрядах (П. В. Веденин, Н. А. Попов), восстановлению концентрации электронов в пучковой плазме воздуха по данным о проводимости плазмы (Н. В. Арделян и др.), синтезу алмазов в разрядах типа шаровой молнии (В. А. Скворцов, Н. И. Фогель), формированию в катодной плазменной струе вакуумного искрового разряда локальной горячей области и генерации многозарядных ионов (М. Ф. Артамонов и др.), СВЧ-электрическому пробою диэлектриков в вакууме (В. А. Иванов, М. Е. Коньжев), созданию лазерной искры в поле бесселевых пучков (С. С. Бычков и др.), сильноточной коммутационной дуге (Э. А. Азизов, А. И. Емельянов, В. А. Ягнов), импульсному объемному разряду в парогазовых смесях гелия высокого давления (Н. А. Ашурбеков и др.), явлению повышения зарядности ионов при наложении продольного

магнитного поля на вакуумно-дуговой разряд (И. А. Кринберг). Обсуждались также состояние исследований в области кластерного термоядерного синтеза (В. Ю. Великодный, В. А. Битюрин) и ряд других интересных проблем.

Доклады, представленные на конференцию, опубликованы в сборнике “Тезисы докладов XXX Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС”, а также в электронном виде на странице в системе “Интернет” по адресу [www.fpl.gpi.ru](http://www.fpl.gpi.ru).

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

В целом следует отметить, что XXX 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, Российская академия наук, Министерство Российской Федерации по атомной энергии, Федеральная целевая программа “Интеграция”.

Организаторами прошедшей XXX 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 30-й раз и собрала на свои заседания значительное количество участников из научных центров России и других стран. Конференция, имея юридически статус национальной научной конференции, фактически приобрела интернациональный статус. Участники конференции имеют возможность обмениваться информацией по всем актуальным проблемам физики плазмы, стоящими 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 остается стабильным несмотря на физическое и моральное старение экспериментального и диагностического оборудования, отсутствие количественного роста 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 технологий" и "Физические процессы в низкотемпературной плазме" XXX 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-технологическом рынках.

## **Actual directions and prospects for the development of investigations on plasma physics and controllable thermonuclear fusion**

*V. A. Ivanov, M. L. Nagaeva*

General Physics Institute, Moscow, Russia

*A review of scientific works and an analysis of reference directions of investigations, which have been submitted in reports of the annual XXX-th Zvenigorod conference on plasma physics and controllable thermonuclear fusion (February 24—28, 2003), are given in the article.*