

ЛОВУШКА ДЛЯ ТЕРМОЯДА

Институт ядерной физики, как и все институты Сибирского отделения РАН, — сравнительно молодой: в 2008 г. ему исполнится всего лишь 50 лет — столько же, сколько составляет средний возраст его сотрудников. Отрадно видеть, что за последнее время в ИЯФ появилось много аспирантов и студентов, которые планируют продолжать свои научные исследования в его стенах. Известно, что современная молодежь тянется туда, где интересно, где есть перспективы для роста. А в ИЯФ такие перспективы, несомненно, есть. Следует подчеркнуть и тот факт, что проведение сложнейших современных экспериментов требует усилий не одного человека, а мощной команды единомышленников. Вот почему приток свежих сил так важен для института

Плазма — загадочная материя, обладающая свойством самоорганизации



Плазма — это полностью или частично ионизованный газ, в котором суммарный отрицательный заряд частиц равен суммарному положительному заряду. И потому в целом она представляет собой электрически нейтральную среду, или, как говорят физики, обладает свойством квазинейтральности. Это состояние вещества считается четвертым (после твердого, жидкого и газообразного) агрегатным и является нормальной формой существования при температуре порядка 10 000 градусов по Цельсию и выше.

Исследования этого необычного состояния вещества в природе проводятся уже более века. Начиная со

второй половины 20 столетия «генеральное направление» — осуществление самоподдерживающейся управляемой реакции термоядерного синтеза (УТС). Высокотемпературные сгустки плазмы во Вселенной распространены очень широко: достаточно назвать Солнце и звезды. А вот на Земле ее совсем мало. Космические частицы и солнечный ветер ионизируют верхний слой атмосферной оболочки Земли (ионосфера), а образовавшаяся плазма удерживается земным магнитным полем. Иными словами — это своего рода земная магнитная ловушка. В период повышенной солнечной активности поток заряженных частиц солнечного ветра



ШОШИН Андрей Алексеевич — младший научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН, преподаватель кафедр общей и теоретической физики НГУ (Новосибирск).
Область научных интересов — физика плазмы, спектроскопия, воздействие плазмы на материалы



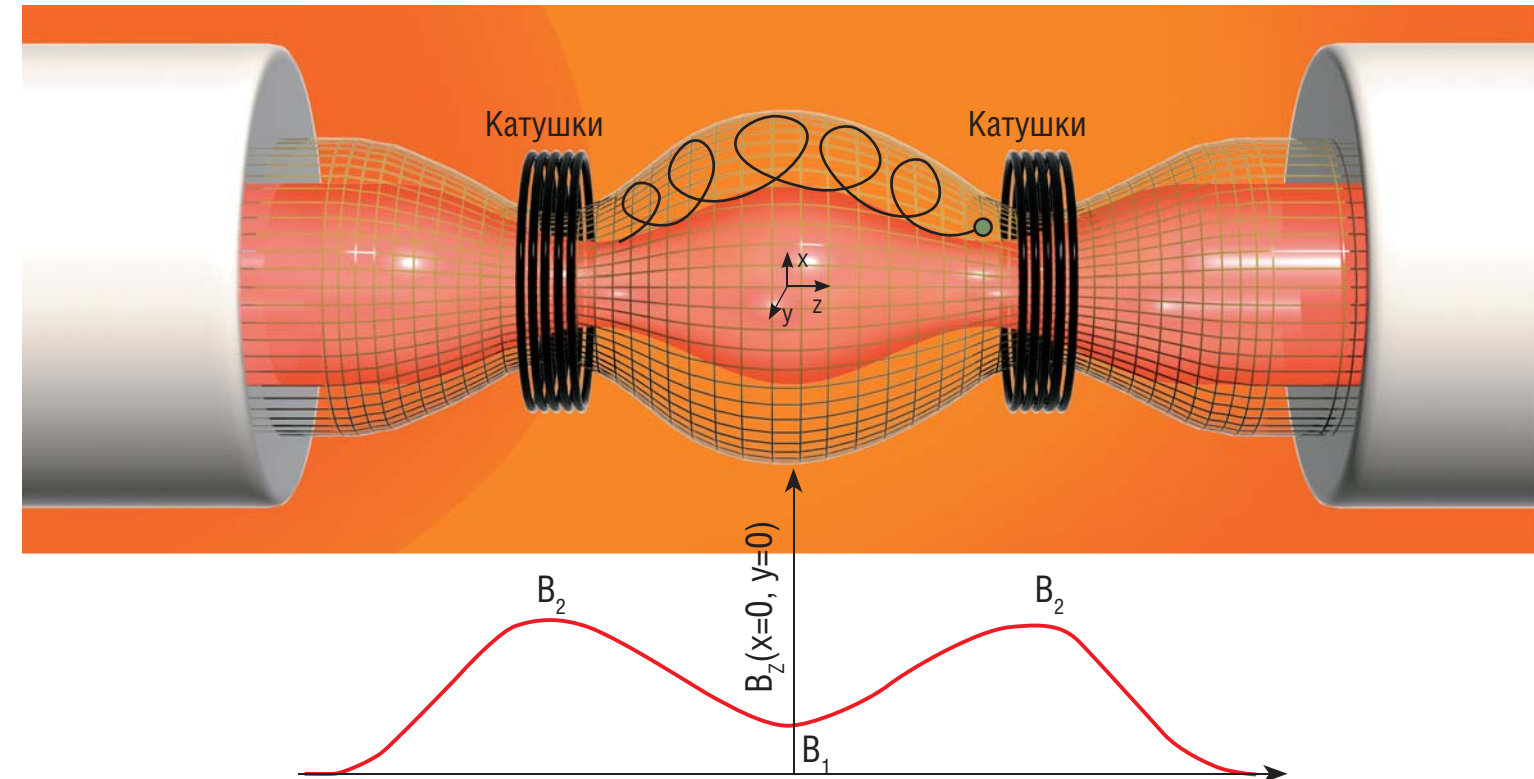
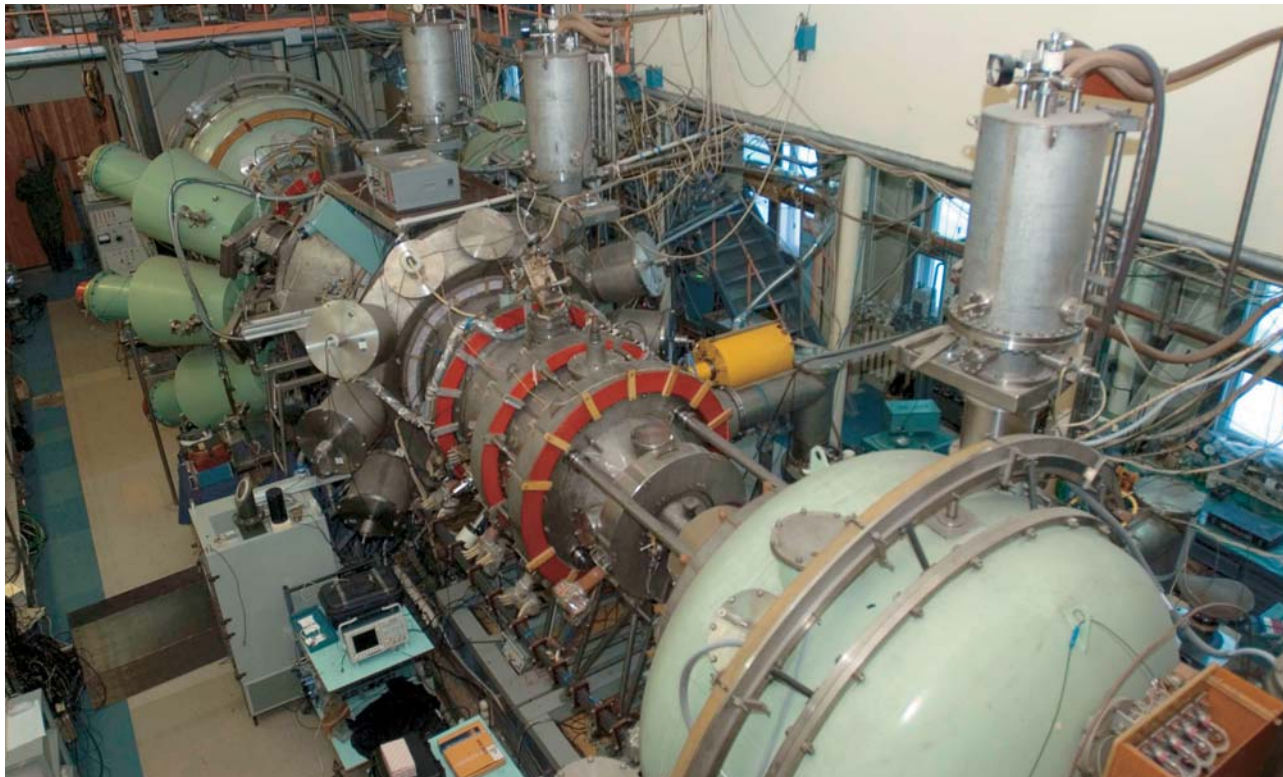
АНИКЕЕВ Андрей Витальевич — к. ф.-м. н., старший научный сотрудник Института ядерной физики СО РАН, преподаватель кафедры физики плазмы НГУ.
Лауреат премии Будкера СО РАН (1996), стипендиат немецкого Фонда Александра фон Гумбольдта

деформирует магнитосферу планеты. Вследствие развития гидромагнитных неустойчивостей плазма проникает в верхнюю атмосферу в районе полюсов — и атмосферные газы, взаимодействуя с заряженными частицами плазмы, возбуждаются и высвечиваются. Этим обусловлено явление полярного сияния, которое можно наблюдать только на полюсах.

Наряду с «генеральным направлением» в исследовании физики плазмы, существуют и другие, не менее важные, прикладные. Это привело к появлению многочисленных новых технологий: плазменная резка, сварка и обработка поверхности металлов. В качестве рабочего тела плазма может использоваться в двигателях космических кораблей и люминесцентных лампах для освещения. Применение плазменных технологий вызвало настоящий переворот в микроэлектронике. Не только существенно повысилась производительность процессоров и увеличился объем памяти, но и значительно снизилось количество используемых в производстве химикатов — таким образом, уровень ущерба, наносимого экологии, удалось минимизировать.

Плотная высокотемпературная плазма существует только в звездах, на Земле ее можно получить лишь в лабораторных условиях. Это необычное состояние вещества поражает воображение большим количеством степеней свободы и, вместе с тем, способностью к самоорганизации и отклику на внешнее воздействие. К примеру, плазму можно удерживать в магнитном поле, заставляя принимать различные формы. Однако она стремится принять то состояние, которое для нее наиболее энергетически выгодно, что часто приводит к развитию различных неустойчивостей, и, подобно живому организму, вырваться на свободу из жесткой «клетки» магнитной ловушки, если конфигурация этой ловушки ее не устраивает. Вот почему задача физиков — создать такие условия, чтобы плазма была устойчивой,

Общий вид установки ГДЛ



Конфигурация магнитного поля в пробкотроне, используемом для удержания плазмы:
а — схема расположения катушек и конфигурация магнитного поля (показана часть траектории захваченной частицы);
б — изменение магнитного поля вдоль оси пробкотрона

«жила» в ловушке долго и спокойно, нагревалась до термоядерных температур порядка 10 миллионов градусов по Цельсию.

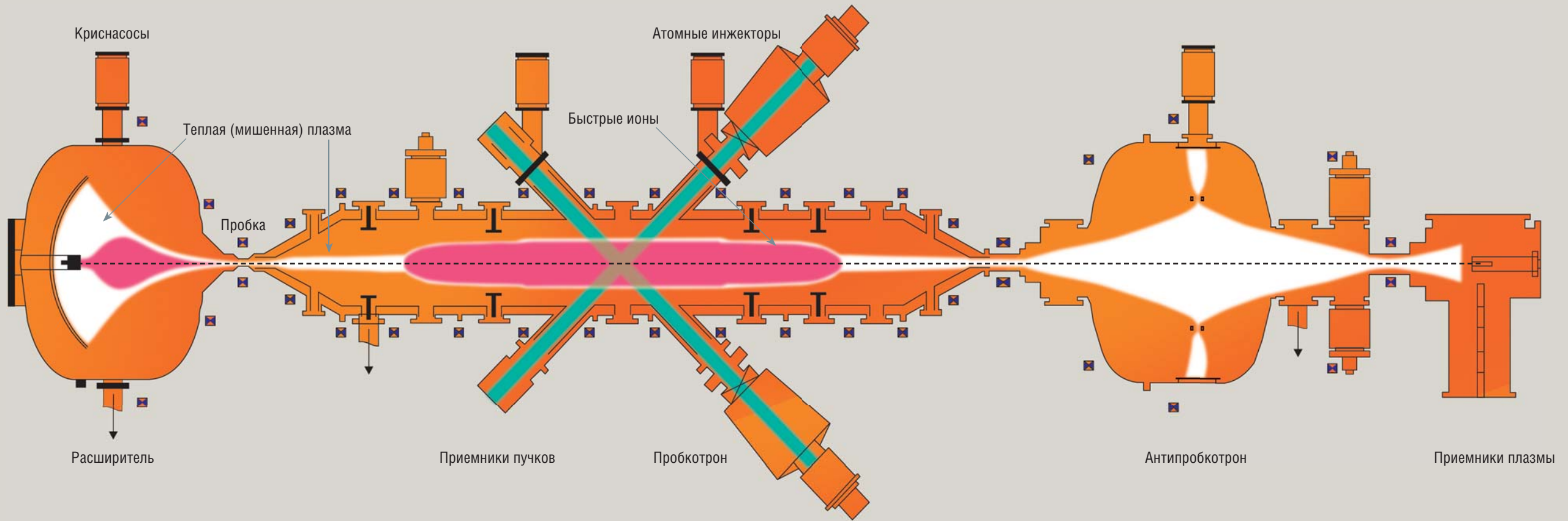
На сегодняшний день в ИЯФ успешно функционируют две уникальные большие плазменные ловушки, которые явились итогом применения на практике оригинальных идей и принципов, рожденных в стенах института. Это ловушки открытого типа, существенно отличающиеся от популярных замкнутых магнитных систем. Они поражают своей загадочной грандиозностью и в то же время простотой функционирования. За всю историю работы на установках ученым удалось получить важные результаты по нагреву и удержанию плотной горячей плазмы, а также сделать ряд открытий, связанных с фундаментальными свойствами этого четвертого состояния вещества. Каждый год преподносил что-нибудь новое и необычное то в одних, то в других условиях для жизни в ловушках при изменении конфигурации магнитного поля, при создании электрических полей, при добавке различных примесей, а также при инъекции в плазму мощных пучков и при «прощупывании» плазмы различными диагностиками. И плазма,

«реагируя» на подобные действия, пусть и неохотно, но делилась с исследователями своими самыми сокровенными тайнами...

Газодинамическая ловушка (ГДЛ)

Установка ГДЛ, созданная в новосибирском Институте ядерной физики в 1986 г., относится к классу открытых ловушек и служит для удержания плазмы в магнитном поле.

Конфигурация магнитного поля в классической открытой аксиально-симметричной ловушке представляет собой вытянутую область однородного магнитного поля с максимумами на краях, которые достигаются при помощи кольцевых катушек сильного магнитного поля. Области под этими катушками (те области пространства, занятого магнитным полем, в которых оно достигает максимального значения) принято называть «магнитными пробками», а ловушку, устроенную по такому принципу, — «пробкотроном». В простейшем



случае магнитное поле в пробкотроне создается только магнитными пробками.

Заряженные частицы плазмы (отрицательные электроны и положительные ионы) движутся по силовым линиям магнитного поля между магнитными пробками, отражаясь от них и совершая, таким образом, колебательные движения. Частицы, имеющие кинетическую энергию, достаточную для преодоления потенциального барьера пробки, покидают ловушку за один пролет.

Отличиями газодинамической ловушки (ГДЛ) от обычного пробкотрона, описанного выше, являются большая протяженность участка однородного поля в центре ловушки и очень большое «пробочное отношение» (отношение $R = V_1/V_2$ значений магнитного поля в пробке и в центре ловушки). В такой конфигурации длина свободного пробега ионов мала по сравнению с длиной участка однородного магнитного поля, поэтому истечение плазмы из установки происходит по законам газовой динамики аналогично истечению газа в вакуум из сосуда с маленьким отверстием, чем и обусловлено название установки. Делая «отверстия»

в магнитных пробках очень маленькими, а объем, занимаемый плазмой, большим, можно получить время удержания плазмы, достаточное для осуществления управляемой термоядерной реакции. Правда, вот длина подобного пробкотрона-реактора будет составлять несколько километров. Однако использование различных устройств, так называемых амбиполярных плагов, уменьшающих поток плазмы в пробки, позволит уменьшить длину ловушки до разумных пределов. Поэтому реакторные перспективы такой ловушки остаются по-прежнему привлекательными. Наиболее перспективным термоядерным приложением схемы удержания плазмы является создание на основе ГДЛ простого и надежного источника быстрых нейтронов с энергией 14 МэВ, которые рождаются в реакции синтеза ядер дейтерия и трития. Фактически это тот же термоядерный реактор (только с малым КПД), потребляющий энергию и вырабатывающий нейтроны. Такой нейтронный генератор можно использовать для проведения материаловедческих испытаний первой стенки будущего промышленного термоядерного реак-

Схема установки ГДЛ



Работа внутри вакуумной камеры установки ГДЛ

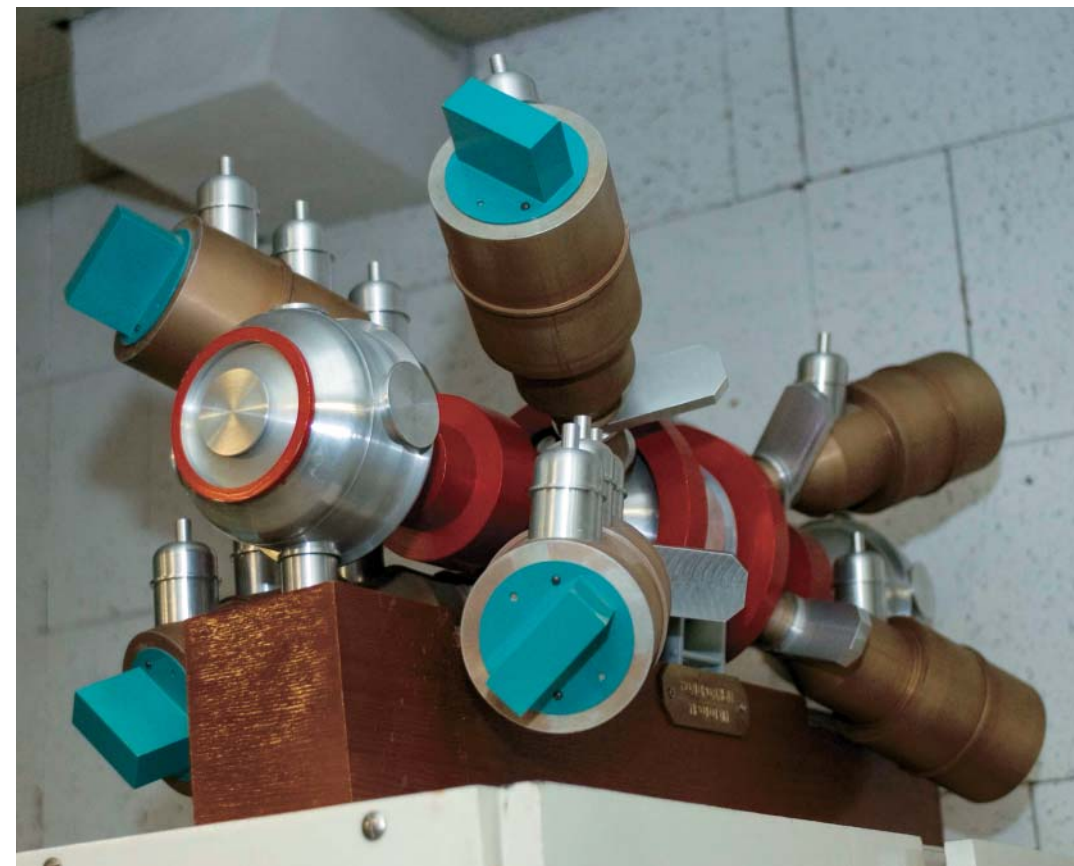


тора или для подпитки слабо энергетическими нейтронами реактора деления, что делает безопасным современную ядерную энергетику. Проект нейтронного источника на основе газодинамической ловушки в течение многих лет разрабатывается в Институте ядерной физики. В целях практической проверки предсказаний теории и накопления базы данных для создания нейтронного источника в Институте ядерной физики СО РАН и была создана экспериментальная модель газодинамической ловушки — установка ГДЛ.

Главной частью установки является осесимметричный пробкотрон длиной 7 м, с полем 0,3 Тл в центре и до 10 Тл в пробках, предназначенный для удержания двухкомпонентной плазмы.

Одна из компонент — теплая «мишенная» плазма — имеет температуру электронов и ионов до 100 эВ (это примерно 1 200 000 градусов по Цельсию) и плотность $\sim 5 \cdot 10^{19}$ частиц в кубическом метре. Для этой компоненты характерен газодинамический режим удержания, описанный выше. Другая компонента — это быстрые ионы со средней энергией $\sim 10\ 000$ эВ и плотностью до $2 \cdot 10^{19}$ частиц в кубическом метре. Они образуются в результате ионизации в мишенной плазме мощных пучков атомов, наклонно инжектируемых в ловушку с помощью специальных устройств — инжекторов нейтральных атомов. Для этой быстрой компоненты характерен тот же режим удержания, что и в классическом пробкотроне: быстрые ионы движутся по магнитным орбитам вдоль силовых линий магнитного поля и отражаются от области сильного магнитного поля. При этом быстрые ионы тормозятся при взаимодействии с частицами мишенной

Система атомарной инъекции установки ГДЛ



Этот макет — уменьшенная копия установки, которая должна стать следующим большим шагом на пути к созданию мощного нейтронного источника

В настоящее время международное научное сообщество, занимающееся решением проблемы УТС, приступило к строительству крупнейшей плазменной ловушки типа токамак под названием «ИТЭР». В ближайшие десятилетия ИТЭР должен продемонстрировать возможность функционирования самоподдерживающейся управляемой термоядерной электростанции на основе реакции синтеза дейтерия и трития.

Однако очевидно, что для дальнейшего развития термоядерной энергетики будущего и строительства таких станций, которые будут работать десятилетиями и даже столетиями, уже сегодня нужно отобрать надежные материалы, способные на протяжении всего срока службы выдерживать сильные нейтронные потоки. Для проведения испытаний таких материалов необходим мощный нейтронный источник. ИЯФ уже в течение многих лет разрабатывает проект такого источника на основе ГДЛ.

Все физические принципы, заложенные в основу компактного и относительно недорогого нейтронного источника на основе открытой газодинамической ловушки, в данное время исследуются в реальном эксперименте по накоплению, удержанию и нагреву плазмы в установке ГДЛ. Уже сегодня проходят прямые измерения излучаемого нейтронного потока в опытах с инъекцией дейтерия. Реакция синтеза дейтерий-дейтерий при данных параметрах эксперимента дает, в общем-то, небольшой поток по сравнению с реакцией дейтерий-тритий. Но для проверки модельных расчетов, которые в будущем планируется использовать для расчетов реактора-источника, их вполне достаточно. В декабре этого года установке исполняется 22 года: первая плазма была получена в конце 1985 г. Те, кто строил и запускал ее, и сегодня еще работают в лаборатории. Но команда пополнилась и новыми, молодыми и энергичными, сотрудниками: некоторые из них — ровесники самой установки ГДЛ

плазмы (в основном с электронами) и нагревают ее до 100 эВ и выше. При наклонной инжекции и малом угловом рассеянии частиц плотность быстрых ионов оказывается сильно пикированной (большой) вблизи области отражения, и это обстоятельство является наиболее привлекательным для реализации нейтронного источника. Дело в том, что поток нейтронов в реакции синтеза пропорционален квадрату плотности ионов дейтерия и трития. И потому при подобной пикировке плотности он будет сосредоточен только в области остановки, где и будет размещаться «тест-зона». Остальное же пространство установки будет испытывать гораздо меньшую нейтронную нагрузку, что позволит отказаться от дорогостоящей нейтронной защиты всех узлов генератора.

Важной проблемой на пути к созданию реактора и нейтронного источника на основе аксиально-симметричного пробкотрона является стабилизация плазмы поперек магнитного поля. В схеме ГДЛ она достигается благодаря специальным дополнительным секциям с благоприятным для устойчивости профилем магнитного поля, которые расположены за магнитными пробками и обеспечивают надежную стабилизацию плазмы.

Другой важной проблемой управляемого термоядерного синтеза (УТС) на основе открытых ловушек является термоизоляция плазмы от торцевой стенки. Дело в том, что, в отличие от замкнутых систем типа токамак или стелларатор, из открытой ловушки плазма вытекает и попадает на плазмодриемники. При этом холодные электроны, эмитированные под действием потока с поверхности плазмодриемника, могут проникать обратно в ловушку и сильно охлаждать плазму. В опытах по изучению продольного удержания на установке ГДЛ удалось продемонстрировать, что расширяющееся магнитное поле за пробкой перед плазмодриемником в торцевых баках — расширителях — препятствует проникновению холодных электронов в ловушку и дает эффективную термоизоляцию от торцевой стенки.

В рамках экспериментальной программы ГДЛ ведется постоянная работа, связанная с повышением устойчивости, мишенной температуры и плотности быстрых частиц плазмы; с исследованием ее поведения в различных условиях работы установки и т.д. Ведется также и изучение фундаментальных свойств. Стоит подчеркнуть, что спектр научных интересов и исследований, имеющих отношение к плазме, очень широк.

Установка ГДЛ оснащена самыми современными средствами диагностики. Большинство из них разработано в нашей лаборатории и, ко всему прочему, на контрактной основе поставляется в другие плазменные лаборатории, в том числе и зарубежные.

Команда ученых, инженеров и технических работников, ведущих исследования на установке ГДЛ, неболь-

шая, но невероятно трудоспособная. Высокий уровень квалификации всех ее членов помогает им добиваться и высоких результатов. К тому же, научные кадры постоянно пополняются «молодой кровью» — выпускниками НГУ и НГТУ. Студенты различных курсов, проходя практику в лаборатории, с первых дней принимают активное участие в экспериментах, внося, тем самым, непосредственный вклад в создание новых знаний. Уже после первой курсовой работы они остаются на практику в лаборатории, успешно защищают дипломы, поступают в аспирантуру и готовят кандидатские диссертации. Не скроем, это чрезвычайно радует и нас, научных руководителей.

Другая ловушка — «ГОЛ-3» — и несколько иной угол зрения на термояд

Человечество испытывает недостаток электричества, и в ближайшем будущем эта проблема станет первоочередной: запасы топлива — нефть и газ, — используемого на основных современных электростанциях, увы, истощаются. Вот почему основой электроэнергетики будущего должны стать термоядерные реакторы.

Термоядерные реакции — это реакции синтеза легких ядер, например изотопов водорода дейтерия и трития, с выделением большого количества энергии. Для осуществления этих реакций требуется большая температура — более 10 миллионов градусов Цельсия. Известно, что любое вещество при температуре более 10 тысяч градусов Цельсия становится плазмой. Контакт с твердым телом приводит к мгновенному ее охлаждению и взрывному разрушению поверхности твердого тела, поэтому плазма должна быть изолирована от конструкции: с этой целью ее и помещают в магнитное поле.

Нагреть вещество до огромных температур и в течение длительного времени удерживать в магнитном поле чрезвычайно сложно — и потому многие специалисты считают управляемый термоядерный синтез (УТС) наиболее сложной из когда-либо стоявших перед человечеством задач.

Установка ГОЛ-3 в Институте ядерной физики СО РАН предназначена для нагрева и удержания термоядерной плазмы в многопробочном магнитном поле. Установка состоит из трех основных частей: ускорителя У-2, 12-метрового соленоида (узла для создания сильного магнитного поля) и выходного узла.

Электронный пучок, который используется в установке, создается самым мощным в мире (в своем классе) ускорителем У-2. В нем электроны вытягиваются электрическим полем из взрывоэмиссионного катода и ускоряются напряжением около 1 миллиона Вольт.



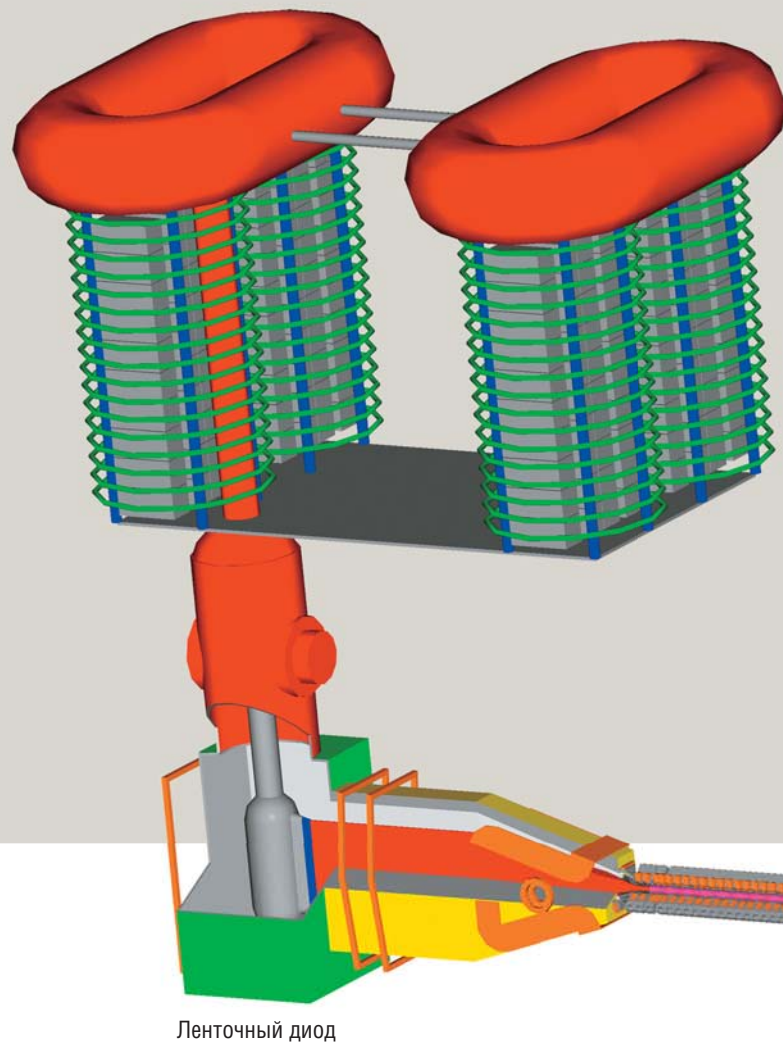
Генератор мегавольтных импульсов ускорителя У-2, используемого для нагрева плазмы в многопробочной ловушке ГОЛ-3

При токе 50 000 Ампер мощность системы достигает 50 ГВт. (А вот весь Новосибирск в дневное время суток потребляет энергии в 20 раз меньше.) При длительности пучка около 8 микросекунд в нем содержится до 200 000 Дж энергии (что эквивалентно взрыву ручной гранаты).

В основном соленоиде при пролете пучка в дейтериевой плазме с плотностью $n = 10^{20} - 10^{22}$ частиц в кубическом метре вследствие развития двухпоточковой неустойчивости возникает большой уровень микротурбулентности и пучок теряет до 40 % своей энергии, передавая ее электронам плазмы. Темп нагрева очень высокий: за 3—4 микросекунды плазменные электроны нагреваются до температуры порядка 2 000—4 000 эВ (23—46 миллиона градусов Цельсия: 1 эВ = 11 600 градусов Цельсия) — это мировой рекорд для открытых ловушек (для сравнения: на установке 2ХИВ в США температура не превышала 300 эВ против 2 000—4 000 эВ на ГОЛ-3).

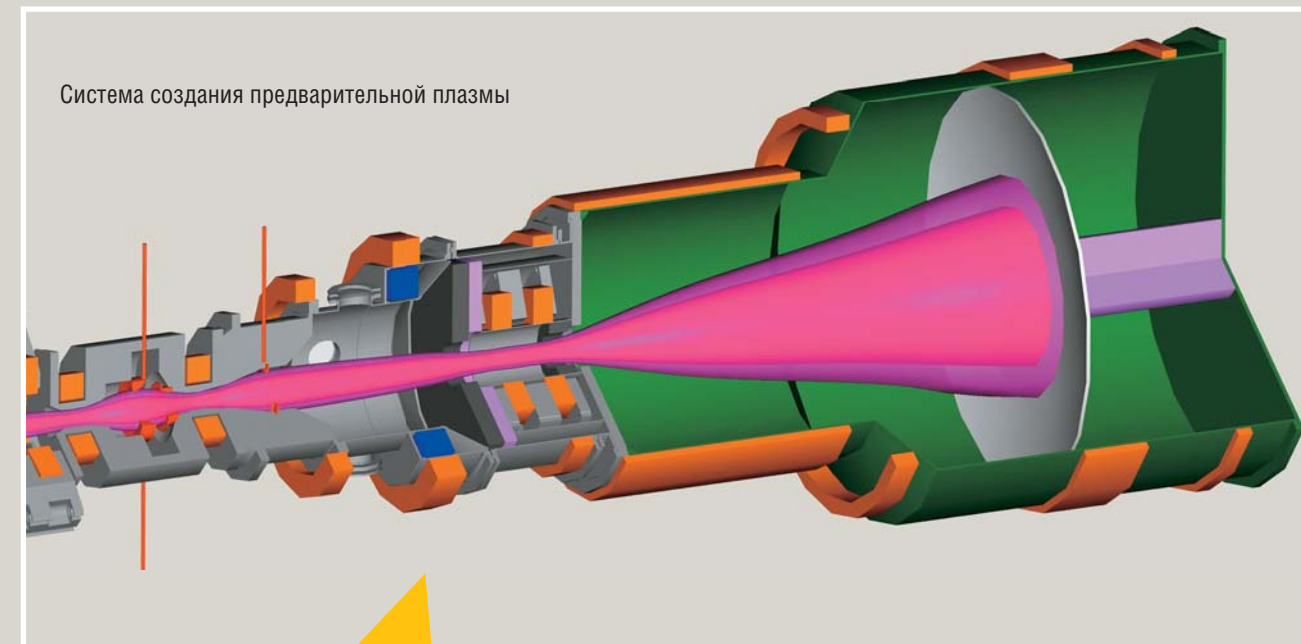
Магнитное поле в основном соленоиде — многопробочное (55 пробкотронов), т.е. максимумы (5 Тл) и минимумы (3 Тл) поля чередуются, причем расстояние между максимумами (22 см) — порядка длины пробега ионов. К чему это приводит: если ион покинет одиночный пробкотрон и полетит вдоль магнитного поля, то в соседнем пробкотроне он столкнется с другой частицей, в результате может быть захвачен соседним пробкотроном, и тогда он «забудет», куда летел. Таким образом, разлет плазмы из ловушки существенно замедляется. А вот время удержания горячей плазмы на ГОЛ-3 составляет до 1 миллисекунды, что можно признать несомненным достижением ученых.

Многопробочность приводит к неоднородности передачи энергии от пучка к электронам плазмы: там, где магнитное поле больше, нагрев



Генератор электронного пучка У-2 создает мощный электронный пучок для нагрева плазмы

В основном соленоиде происходит быстрый нагрев до термоядерных температур и удержание горячей плазмы в гофрированном магнитном поле



Система создания предварительной плазмы

Выходной узел обеспечивает стабильность работы установки и принимает мощный поток плазмы из основного соленоида

Приемник пучка

Схема многопроходной ловушки ГОЛ-3

электронов сильнее. При нагреве же пучком высокий уровень турбулентности способствует сильному (более чем в тысячу раз) подавлению электронной теплопроводности, поэтому не выравниваются неоднородности температуры, и следовательно, возникают большие перепады давления плазмы: по этой причине плазма начинает двигаться как целое. Из областей высокого давления к минимумам давления с двух сторон начинают двигаться два встречных плазменных потока, которые сталкиваются и прогреваются до температуры 1–2 кэВ (она немного выше, чем в центре Солнца).

Данный механизм быстрого нагрева был открыт на ГОЛ-3 четыре года назад в процессе экспериментов. Из теории следовало, что он должен сопровождаться резкими скачками плотности плазмы, которые вскоре были обнаружены методом томсоновского рассеяния луча лазера.

После пролета основного соленоида пучок попадает в выходной узел, который способен принять мощный пучок электронов, а также поток плазмы и при этом не разрушится. Для этого магнитное поле в выходном узле должно быть расходящимся, что раз в 50 уменьша-

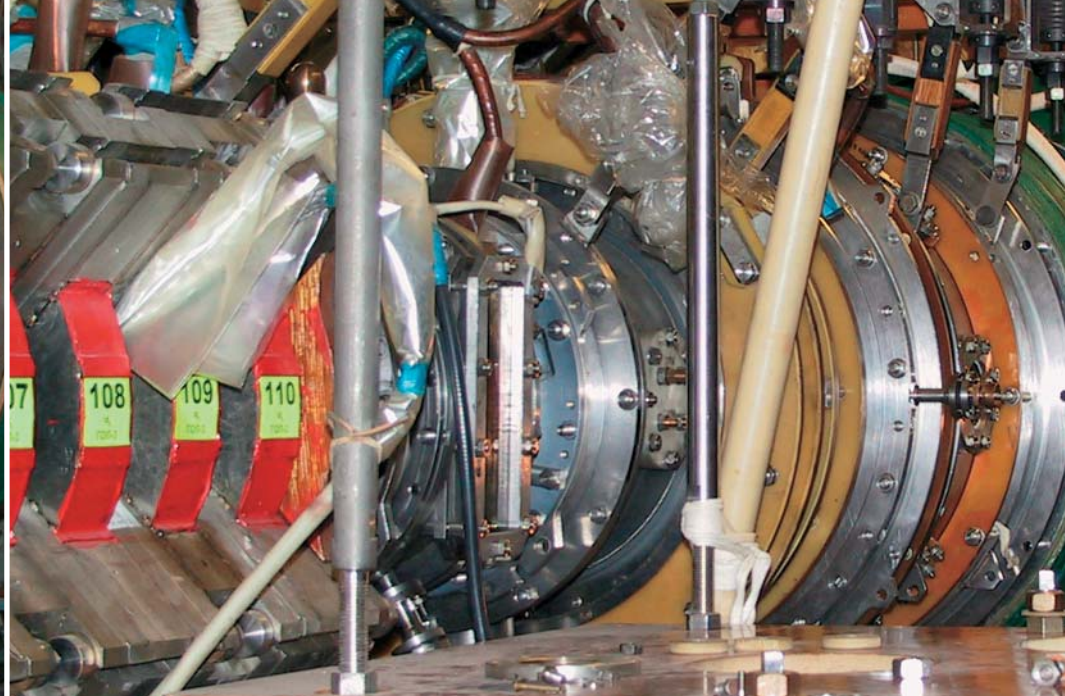
ет плотность энергии в пучке, а приемник пучка — графитовым. Особенность графита, во-первых, в том, что у него нет жидкой фазы, он сразу испаряется; во-вторых, он имеет незначительную плотность (2 г/см^3), благодаря чему пробег электронов в нем выше, чем в металлах, а следовательно, энергия выделяется в большем объеме и не превышает порога взрывного разрушения графита, и потому эрозия графита невелика — порядка 1 микрона за выстрел. Наличие на выходе установки мощного плазменного потока позволяет проводить эксперименты по облучению материалов для термоядерных реакторов буду-

щего: эти реакторы будут подвергаться такому высокому уровню тепловых нагрузок, достичь которого на других плазменных установках сегодня пока нереально.

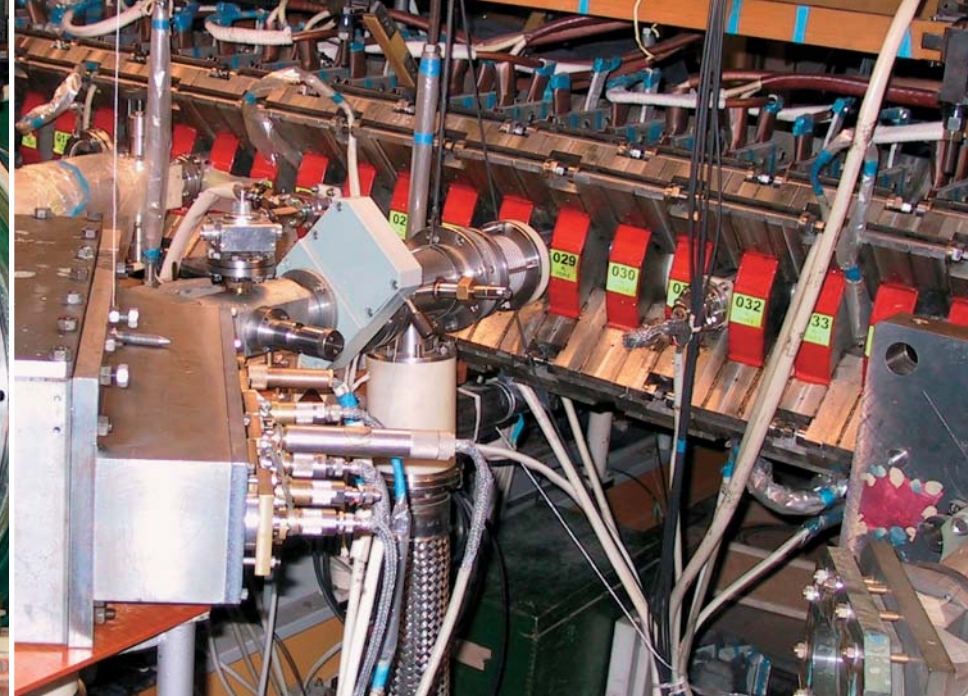
Другая важная задача, которую можно решить с помощью выходного узла, — это обеспечение безопасности транспортировки пучка через основной соленоид. Вся сложность проблемы заключается в том, что ток пучка в соленоиде (30 кА) больше порога устойчивости (для камеры ГОЛ-3 — 12 кА), поэтому пучок неустойчив и может выбраться на стенку или внутрикамерные конструкции, что приведет к их разрушению. С этой



Выходной узел многопробочной ловушки ГОЛ-3



В выходном узле ГОЛ-3 проводятся эксперименты по изучению стойкости материалов под воздействием мощного плазменного потока



Многоканальный анализатор нейтралов перезарядки позволяет измерять температуру ионов масштаба 25 миллионов градусов

целью перед инъекцией пучка в выходном узле нужно пробить разряд (молнию), и тогда основной соленоид заполнится относительно холодной (несколько эВ) предварительной плазмой, в которой при инъекции электронного пучка наводится встречный ток, и он полностью компенсирует ток пучка, что в целом обеспечивает системе стабильность (суммарный ток не будет превышать 3 кА).

Одна из самых серьезных проблем УТС — устойчивость плазмы, т.е. создание условий, при которых плазма не могла бы покинуть ловушку поперек магнитного поля из-за развития различных плазменных неустойчивостей. Для открытых ловушек самой опасной является желобковая неустойчивость. Суть ее в том, что плазма раздвигает магнитные силовые линии и между ними проскальзывает наружу. В плазме ГОЛ-3 эта неустойчивость подавлена благодаря сдвигу магнитных силовых линий на разных радиусах плазмы, который возникает по причине сложной конфигурации токов в плазме. В центре плазмы течет ток пучка, там же — высокий уровень турбулентности. Обратный ток течет по плазме, но из-за турбулентности в центре ее сопротивление возрастает — и обратный ток течет по поверхности плазменного шнура. Прямолинейный ток создает вокруг себя круговое магнитное поле, что вместе с продольным полем соленоида дает спиральное магнитное поле. На разных радиусах ток разный (и те-

чет в разные стороны) — поэтому и шаг, и направление спирали тоже разные. Вот почему когда плазменный желобок раздвигает магнитные силовые линии на одном радиусе, то он натывается на силовые линии под другим углом и не может их раздвинуть — так подавляется желобковая неустойчивость.

Непростой задачей является и диагностирование горячей плазмы, т.е. определение ее температуры, состава, плотности, величины магнитного поля и многого другого. Градусник туда не вставишь — он может взорваться — и плазма остынет. Приходится использовать различные специальные методы, которые делятся на пассивные и активные. С помощью пассивных диагностик можно изучить то, что излучает плазма. С помощью активных — инжектировать в плазму, например, свет лазера или пучки атомов и посмотреть, что из этого выйдет.

Из пассивных диагностик на установке ГОЛ-3 работают детекторы и спектрометры фотонов в видимой, ультрафиолетовой, рентгеновской и гамма-областях, детекторы нейтронов, детектор нейтралов перезарядки, диамагнитные зонды и пояса Роговского. Из активных — несколько лазерных систем, инжектор атомарных пучков и инжектор твердотельных крупинок.

Хотя сейчас к реакторным параметрам наиболее близки токамаки (у них выше температура и время удержания), благодаря ГОЛ-3 многопробочные ловушки также

рассматриваются в качестве варианта термоядерного реактора. Плотность плазмы в ГОЛ-3 почти в сто раз выше, чем в токамаках в среднем, к тому же, в отличие от токамаков, в этой установке нет ограничений по давлению плазмы. Если давление будет сравнимо с давлением магнитного поля (5 Тл создает давление ~100 атмосфер), то ловушка перейдет в режим «стеночного» удержания — вытолкнутое из плазмы магнитное поле (т.к. плазма — диамагнетик) будет концентрироваться и увеличиваться вблизи стенок камеры и все равно сможет удерживать плазму. В настоящее время нет ни одной причины, которая бы принципиально ограничивала рост основных термоядерных параметров (n , T и время удержания) в многопробочных ловушках.

Основная задача, стоящая сегодня перед коллективом установки ГОЛ-3 — это разработка концепции многопробочного термоядерного реактора, а также экспериментальная проверка основных положений этой концепции.

Не хлебом единым... Но и хлебом тоже

Исследование плазмы не может осуществляться без диагностики, и потому разработки ИЯФ охотно покупаются. Институт заключает контракты на поставку некоторых средств диагностики, научные сотрудники занимаются разработкой, сборкой этих средств в собственных цехах. В основном это диагностические инжекторы, но есть также и некоторые оптические приборы, интерферометры и т.д. Дело не стоит на месте: деньги зарабатывать ИЯФ тоже умеет.

Литература

1. A. Burdakov, A. Azhannikov, V. Astrelin, A. Beklemishev, V. Burmasov at all. Plasma heating and confinement in GOL-3 multimirror trap // Transactions of Fusion Science and Technology. — 2007. — Vol. 51. — No. 2T. — Pp. 106–111.
2. А.В. Аржанников, В.Т. Астрелин, А.В. Бурдаков, И.А. Иванов, В.С. Койдан, С.А. Кузнецов, К.И. Меклер, С.В. Полосаткин, В.В. Поступаев, А.Ф. Ровенских, С.Л. Силицкий, Ю.С. Суляев, А.А. Шошин. Исследование механизма быстрого нагрева ионов в многопробочной ловушке ГОЛ-3 // Физика плазмы. — 2005. — Т. 31. — № 6. — С. 506–520.