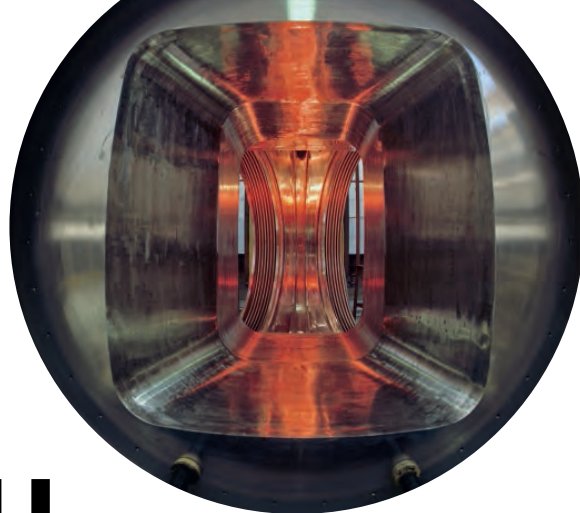


ФИЗИКА

# ТОКАМАК РАСКРОЕТ ТАЙНЫ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ



В эти дни на базе НИЦ «Курчатовский институт» создается токамак принципиально нового типа, в недрах которого можно будет получить плазму более высоких энергетических значений, чем обычно. Установка, находящаяся на этапе сборки, напоминает инопланетный космический корабль с распахнутыми настезь черными глазницами иллюминаторов. Однако пройдет несколько месяцев, и в его металлическом «сердце» поселится раскаленная плазма. Тогда здесь начнутся эксперименты, которые позволят ученым пролить свет на многие фундаментальные вопросы и решить ряд важных прикладных задач.



**Что это за вопросы и каких результатов стоит ожидать от работы этой уникальной мегаустановки — наш разговор с Петром Павловичем Хвостенко, доктором технических наук, научным руководителем Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт».**

**— Петр Павлович, мы с вами находимся в зале, где создается новый токамак. Расскажите, пожалуйста, каковы цели и задачи этого проекта.**

— Он называется токамак Т-15МД, то есть Т-15 модернизированный. Известно, что последние годы строится большой международный токамак — реактор *ITER*. И одна из наших задач — поддержка программы *ITER*. Вторая задача, не менее важная — построить гибридный реактор, который станет источником термоядерных нейтронов. Наш токамак Т-15МД — прототип будущей большой установки, с помощью которой можно будет решить проблему замыкания топливного цикла в атомной энергетике. Ведь сегодня считается, что основного топлива для тепловых атомных станций хватит лет на 50–60. Поэтому встала задача: как возобновить топливо для атомных тепловых реакторов? Токамаки как источники термоядерных нейтронов как нельзя лучше подходят для решения этой задачи.

Токамак должен генерировать термоядерные нейтроны, которые облучают топливо, окружающее плазму. В этом случае исходом топлива становится торий-232, которого очень много в земной коре. После облучения нейтронами мы получаем уран-233, который и будет топливом для атомных станций.

**— Чем же термоядерный источник нейтронов лучше классической термоядерной электростанции?**

— Разница вот в чем. В термоядерном источнике нейтроны получаются от взаимодействия пучка быстрых атомов с основной плазмой, при этом температура плазмы не должна доходить до 120–150 млн градусов, как в чистом энергетическом реакторе. Она должна иметь температуру не более 30–50 млн градусов.

**— Неужели это мало?**

— Немного. На сегодняшних токамаках с помощью гиротронов легко получить и более высокие температуры. Но если вы имеете источник быстрых атомов, которые взаимодействуют с основной плазмой, то в этом случае появляются нейтроны, с помощью которых мы можем изучать физику взаимодействия процесса.

**— На каком веществе будет работать токамак?**

— На водороде. Поэтому нейтронов здесь не будет, но все вопросы технологии процесса мы отрабатываем. Причем он может работать как для нужд *ITER*, так и для задач гибридного реактора.

**— Внешне ваш токамак как будто из фантастического фильма. Кажется — сейчас полетит.**

— Да, это действительно нечто космическое. А когдаходишь внутрь, создается полное ощущение полета. На сегодня мы окончательно смонтировали тороидальную магнитную систему, камеру высотой 3,5 м, и монтажники входят туда, ставят диагностику, меняют элементы, которые будут взаимодействовать с плазмой. Когда плазма поселится в «сердце» токамака, ощущение фантастики усилится.

**— Токамаков в мире существует немало. Чем ваш отличается от других?**

— Наш токамак уникален. Он имеет достаточно низкое аспектное отношение, то есть отношение величины большого радиуса плазменного шнура к малому радиусу. Мы сможем получать более высокое давление плазмы. Такой комбинации низкого аспектного отношения и магнитного поля в 2 Тл нет нигде в мире.

**— Кто придумал такую модель установки?**

Конечно, у истоков этих работ на современном этапе стоял Е.П. Велихов, инициировавший международный проект *ITER*. Э.А. Азизов, который

долгое время был директором Курчатовского института физики токамаков, выдвинул идею установки, а я рассчитывал всю магнитную конфигурацию. И когда она стала более или менее понятна, мы обратились к главному конструктору Научно-исследовательского института электротехнической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА) в Санкт-Петербурге. Они делали всю проработку конструкции токамака. А изготовление всех элементов и узлов взяла на себя брянская группа компаний машиностроения и приборостроения, где в рекордно короткие сроки была создана практически вся магнитная система. Это тоже уникальный результат междисциплинарного сотрудничества. Наши коллеги, в том числе зарубежные, не верят, что можно было все это сделать менее чем за два года.

— **Что дает такое сочетание физических характеристик в работе вашей установки?**

— Мы можем получать более высокие значения бета. Бета — это отношение газокINETического давления плазмы к давлению магнитного поля. Это значительно повышает эффективность использования магнитного поля. Кроме того, обычно при повышении давления развивается неустойчивость, которая разрушает плазменный шнур, и поэтому давления выше достичь нельзя. А вот в компактном токамаке, где все сжато, величина бета может достигать более заметных величин, а это

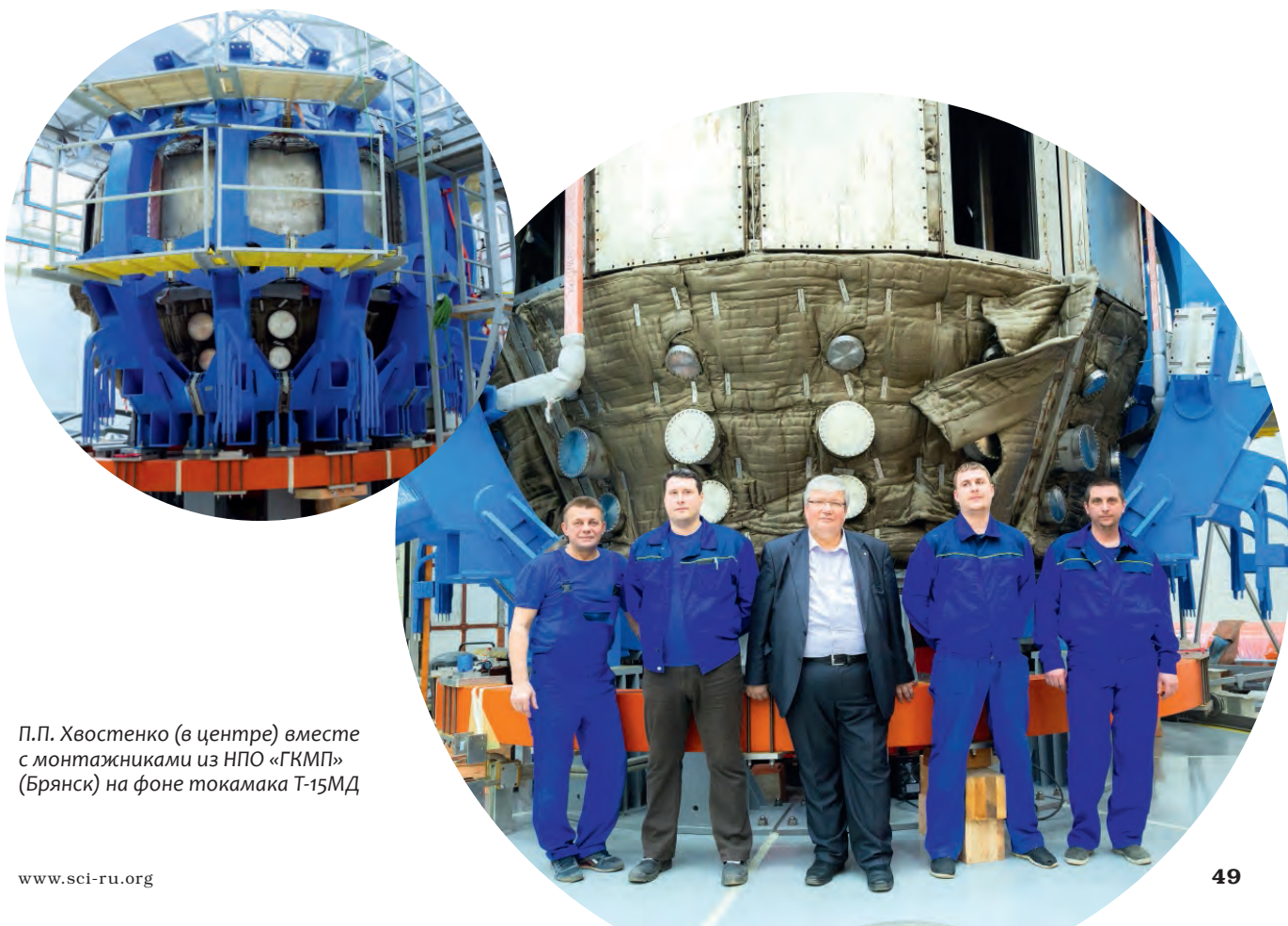
очень важно. Мы сохранили магнитное поле, достаточно высокое для токамака. Это удалось потому, что мы использовали медный проводник с небольшой добавкой серебра. Что это дало? Во-первых, мы имели проводник с проводимостью чистой меди, а по прочности он как нержавеющая сталь. Это важно, потому что при работе токамака действуют очень большие растягивающие силы, и если бы это была чистая медь, то предел прочности был бы превышен. А когда мы перешли на другой тип проводника, все получилось.

— **Как вы думаете, когда установка заработает в полную силу?**

— Физический пуск установки запланирован на декабрь 2020 г. Мы работаем в тесном контакте с ГК «Росатом» в рамках федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения». По всем расчетам, к концу апреля мы окончательно соберем нашу установку, потом подключим вакуумную откачку, заварим камеру, все проверим. Вероятно, к лету она будет готова с точки зрения подключения коммуникаций. А потом мы все это разовьем, сделаем антресоли, чтобы физики могли ставить диагностику.

— **Физики будут работать на антресолях?**

— Да, по всему периметру вокруг токамака у нас будут установлены красивые двухуровневые антресоли. Это будет деревянная конструкция, близко подходящая к токамаку. На первом этапе



П.П. Хвостенко (в центре) вместе с монтажниками из НПО «ГКМП» (Брянск) на фоне токамака Т-15МД



диагностики пройдут вакуумные испытания на стендах. Затем они будут пристыковываться к патрубкам (их здесь 152) и работать непосредственно с токамаком.

— **Пристыковываться? Выходит, не зря я уви-дела здесь космическую аналогию?**

— Да, именно пристыковываться. Хотя, конечно, люди будут находиться в атмосфере Земли, не будут летать, но сравнение с космическим экспериментом тут вполне уместно. Наблюдение за плазменным процессом, который будет происходить внутри камеры, — это, в принципе, то же самое, что изучение процессов, происходящих на Солнце или в звездах. И вопросов здесь пока больше, чем ответов.

— **Насколько опасна такая работа?**

— Больших нейтронных потоков здесь не будет. Во время разряда образуется пучок ускоренных электронов, которые попадают на стенку, образуется жесткое гамма-излучение, но интенсивность его очень невелика. К тому же, когда работает установка, в зале никого нет. У нас существует мощная биозащита — стены из свинца и бетона. В процессе работы токамака в отличие от тепловых атомных станций большой наведенной радиационной активности нет, поскольку нет и нейтронов. И вообще токамак по сравнению с АЭС более естественный с точки зрения природоподобия. Президент НИЦ «Курчатовский институт»

М.В. Ковальчук, как идеолог развития природоподобных технологий, всегда отмечает, что токамак — это природоподобная энергетическая установка по своей сути.

— **Почему?**

— Именно потому, что мы воссоздаем такие же реакции, какие происходят на Солнце и в звездах. Природа распорядилась получать энергию путем синтеза легких ядер — и ровно то же самое мы делаем в токамаке. В отличие от реакторов, делящих тот же уран. Ведь такого процесса не увидишь в природе.

— **Каких ожидаете результатов?**

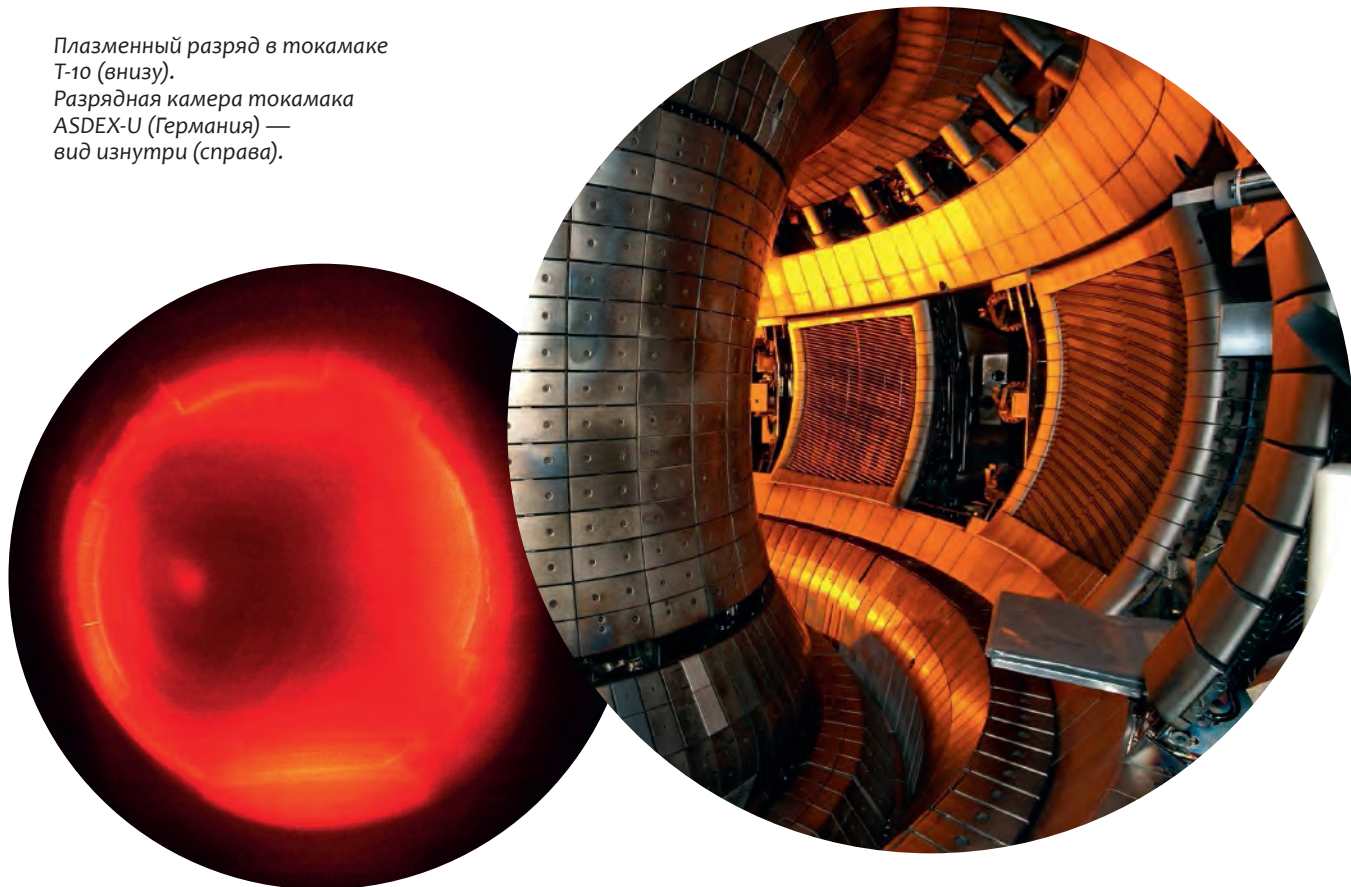
— В первую очередь, мы должны собрать большую базу данных как по инженерии, так и по физике для проектирования будущих термоядерных станций и гибридных реакторов. За это время нам нужно обобщить всю информацию, чтобы потом меньше оставалось вопросов с точки зрения проекта будущих больших реакторов.

— **А с фундаментальной научной точки зрения каких ожидаете открытий?**

— Физика плазмы — наука, до конца не изведенная. Надо найти пути к уменьшению различных влияний и повышению устойчивости плазмы. Эти задачи идут в поддержку *ITER*, потому что следующий шаг — это демонстрационный реактор, большая экспериментальная установка, где мы ждем по-настоящему прорывных результатов.

Плазменный разряд в токамаке Т-10 (внизу).

Разрядная камера токамака ASDEX-U (Германия) — вид изнутри (справа).



— **Помните, как у Высоцкого: «А с этой плазмой дойдешь до маразма». Правда ли, что плазма — самое сложное состояние вещества?**

— Абсолютная правда. Состояние это сложное и во многом непонятное. Идея токамака была изначально завязана на плазме, и родилась она в этих стенах, в Курчатовском институте, еще в 50-е гг. прошлого века. И.Е. Тамм и А.Д. Сахаров выдвинули идею, как с помощью магнитного поля можно удерживать высокотемпературную плазму, а потом у нас в институте начались эти исследования. После испытания водородной бомбы в 1953 г. И.В. Курчатов говорил о том, что термоядерная энергия должна не разрушать, а созидать. И когда появилась эта идея, он горячо ее поддержал, лично интересовался исследованиями и даже предложил установку, которая очень похожа на сегодняшний гибридный реактор. В этом был пророческий дар И.В. Курчатова. Исследования были поручены Л.А. Арцимовичу, под руководством которого проводились исследования именно в этом здании. А само слово «токамак» (сокращение от «тороидальная камера с магнитными катушками») придумал И.Н. Головин, первый заместитель И.В. Курчатова. Это слово используется во всем мире, это наш бренд — как спутник, матрешка, валенки или водка.

— **Первый токамак тоже появился в этих стенах?**

— Да, в 1959 г. Это была маленькая установка. А до 1965 г. в этом здании мы собрали еще девять установок различной конфигурации, на которых решались самые разные задачи. В 1968 г. здесь впервые в мире была получена плазма с температурой более 10 млн градусов. Никто не верил, что нам удалось достичь такой температуры. Предложили Л.А. Арцимовичу пригласить иностранную делегацию, чтобы это проверить. А Лев Андреевич был не только выдающимся ученым и организатором науки, но еще и очень смелым человеком. Холодная война, железный занавес — а он сумел добиться разрешения на проезд в эти сверхсекретные стены английских ученых. Настолько велик был его авторитет.

— **И что же? Они померили температуру плазмы?**

— Померили. Причем приехали на пяти огромных фурах, привезли свое измерительное оборудование. Тогда ведь вся диагностика была громоздкой. В результате измерений температура оказалась даже чуть выше, чем мы заявляли. После этого все сомнения были сняты — и токамак получил «зеленую улицу». Сегодня более 300 токамаков создано по всему миру. Но наш, повторю, уникален.

— **Наверное, к вам на работу приходят очень квалифицированные физики?**

— Сейчас вектор исследований перемещается в технологию, инженерию. Например,

в *ITER* первая стенка должна будет меняться раз в пять лет. Там идут большие тепловые потоки до 20 МВт/м<sup>2</sup>, начинается эрозия материала, он попадает в плазму, поэтому без суперпрофессиональных физиков и инженерных кадров не обойтись. За годы работы мы провели исследования по широкому спектру материалов, включая вольфрам, который сейчас предлагают наши европейские партнеры. Выясняется, что он не очень хорошо себя ведет при больших нагрузках.

— **То есть идет поиск идеального материала?**

— Да. Сейчас наши ученые предлагают литиевые технологии, которые позволяют перераспределять мощность на более широкие площади, не давая такую интенсивную нагрузку. Эти идеи также будут проверены на нашем токамаке.

— **Значит, опять настал момент, когда инженеры в стране нужны?**

— Да, это так. Токмак будет полностью управляться системой компьютеров, вся техника — самая современная и очень сложная. Физики — это наши главные генераторы идей, а инженеры — наша главная движущая сила. С ростом масштабов установок и их сложности эти специалисты должны быть самого высокого уровня.

— **Где вы их берете?**

— Физики — базовая кафедра МИФИ, МФТИ, физфак МГУ. Инженерия — Бауманский институт, МЭИ, МАИ. Очень толковые ребята — других здесь не держат.

— **Вы ведь тоже в свое время пришли сюда из МГТУ им. Н.Э. Баумана?**

— Да, это моя альма-матер. Когда я пришел сюда больше 40 лет назад, мне казалось, что я попал в какую-то научную Мекку. Здесь широчайшее поле знаний, на котором, куда ни обратишься, тебе подскажут все, что ты хочешь узнать. Ты все это впитываешь и с какого-то момента тоже становишься разносчиком знаний. Это поле знаний — Курчатовский институт.

— **Такая атмосфера осталась?**

— Осталась. Мало того, в последние годы, я бы сказал, мы двинулись более широко, в разнообразных направлениях. М.В. Ковальчук такие традиции активно развивает. У нас по его инициативе сейчас представлены буквально все науки, даже гуманитарные. При этом активно развиваются и базовые атомные исследования, с которых когда-то начинался наш институт. Сегодня внимание к атомным и ядерным установкам и проводимым на них исследованиям огромное. Есть понимание на государственном уровне, что эти знания могут двигать общество вперед, и радостно, что именно Курчатовский институт этим занимается. Мне особенно приятно об этом говорить, потому что я проработал здесь, можно сказать, всю жизнь. ■

**Беседовала Наталия Лескова**