

Идея приручения термоядерной энергии  
отметила в ушедшем году свой 65-летний  
юбилей. Без пафоса и фейерверков, без  
пламенных речей и концертов, а лишь  
методичной работой лучших умов  
физиков-ядерщиков по всему миру.

# Щедрая

на сюрпризы

В 1950 г. выдающиеся советские ученые Андрей Дмитриевич Сахаров и Игорь Евгеньевич Тамм предложили концепцию разогрева плазмы и ее последующего удержания в трубе, «согнутой кольцом в виде баранки и обвитой по всей длине обмоткой, создающей в трубе магнитное поле, параллельное стенкам трубы».

# Н

есмотря на долгий и не всегда ровный путь, практическое воплощение этой идеи еще далеко от завершения. Плазма не перестает удивлять опытных и привлекать молодых ученых своими загадками, сюрпризами и подарками, не всегда приятными. Об этом и не только мы беседуем с аспирантом отделения токамаков НИЦ «Курчатовский институт» **Леонидом Александровичем Ключниковым**.

— Можно начать с самого начала: что такое токамак, что такое термоядерный синтез, зачем это все нужно. Термоядерный синтез, термоядерная энергетика — это способ окончательно решить энергетическую проблему, связанную с тем, что когда-нибудь мы обязательно исчерпаем ресурсы нефти, газа, угля и, может быть, даже урана — правда, в очень отдаленной перспективе.

Для реализации этого амбициозного проекта по освоению термоядерной энергии сейчас самой перспективной установкой считается установка типа «токамак» — тороидальная камера с магнитными катушками, в которой создается сверхгорячая плазма с температурой гораздо выше, чем в солнечном ядре. Идея этих установок появилась в Советском Союзе и впервые была реализована в Курчатовском институте. В дальнейшем именно благодаря достижениям курчатовских физиков и инженеров токамаки завоевали лидирующие позиции в термоядерных исследованиях во всем мире. Сейчас Россия продолжает исследования в данной области, в том числе здесь, в Курчатовском институте, на установке Т-10.

Т-10 — это уже довольно «взрослая» установка. Она была создана в 1975 г., но до сих пор в строю, и на ней мы проводим многие современные исследования в области физики плазмы, в частности физики переноса частиц и энергии плазмы в токамаке.

Обусловлено это в первую очередь тем, что плазма-то может быть одна и та же в течение десятков лет, но при этом изучается она с помощью все более и более совершенных технологий и методов. И на Т-10 существуют ряд современных диагностических систем, которые позволяют проводить актуальные исследования.

### Термояд международный

Сейчас во Франции сооружается установка *ITER*, в том числе при активном участии России. Вернее

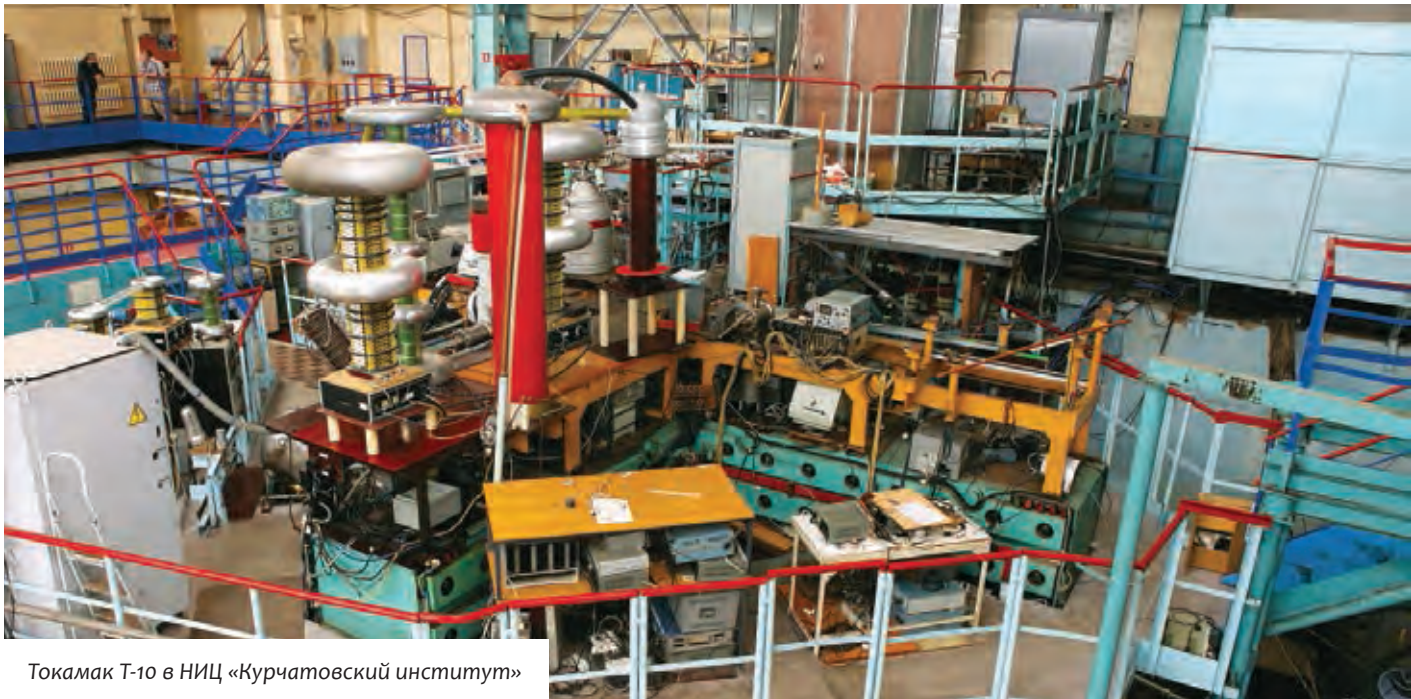
сказать, Россия (конкретно силами Евгения Павловича Велихова) в свое время была инициатором создания проекта и строительства этой установки и сейчас продолжает активно участвовать интеллектуально, технологически и финансово.

Несмотря на то что *ITER* уже сооружается, до сих пор остается очень много вопросов по физике плазмы и физике термоядерного синтеза. Многие из них связаны с тем, что не совсем понятно, как эта плазма живет, как в ней происходит перенос тепла, частиц, как в ней удерживается энергия.

— **Что подразумевается под транспортными процессами?**

— Имеется в виду, что мы вложили в плазму какое-то количество энергии с помощью различных систем нагрева, в нее поступает также и топливо в виде дейтерий-тритиевой смеси. Транспортные процессы обуславливают то, как частицы и энергия выходят из плазмы, т.е. насколько хорошо они там удерживаются. По давно существующим классическим представлениям удерживаться они должны очень хорошо, и управляемый термоядерный синтез, по идее, уже должен быть давным-давно осуществлен и освоен. Но, к сожалению, в плазме присутствуют самые разнообразные процессы, которые приводят к тому, что энергия и частицы из плазмы выходят гораздо быстрее, чем мы этого изначально ожидали.

Одна из важнейших задач сейчас состоит в том, чтобы понять, какие конкретно процессы за этим стоят, и научиться их контролировать. Причем не только контролировать, но и понимать, что будет дальше. Построят *ITER*, проведут исследования, получат новые данные, потом надо будет создавать следующую установку большего масштаба. И она уже должна стать демонстрационным термоядерным реактором. С таким реактором можно будет планировать получение энергии коммерчески, т.е. ток должен не только течь по проводам внутри,



Токамак Т-10 в НИЦ «Курчатовский институт»

но и уходить наружу из этого термоядерного реактора. В *ITER* не планируется съем энергии — это чисто экспериментальная машина. Но очень важная.

Последние установки типа «токамак» большого масштаба, самые крупные, которые у человечества вообще есть, построены порядка 30 лет назад. С тех пор новых машин большего масштаба уже не строилось, а *ITER* примерно в десять раз больше, чем современная самая крупная установка, которая называется *JET*. Таким образом, сегодня строится *ITER*, но до него нет каких-то промежуточных этапов.

— **С чем связано отсутствие таких промежуточных шагов?**

— Я так понимаю, что самое главное — это финансирование. Для термоядерной энергетики, которая может глобально разрешить все проблемы человечества с дефицитом газа, нефти и, кстати, целым комплексом экономических и политических проблем, с этим связанных, финансирование, на мой взгляд, совершенно недостаточное. Финансирование *ITER* — самого масштабного проекта, в котором участвует буквально весь цивилизованный мир, — составляет, насколько я знаю, порядка €15 млрд. Эти цифры можно сравнить с ценой строительства какого-нибудь скоростного шоссе, например. Деньги на самом деле не очень большие.

По всей видимости, человечество еще до конца и не осознает, что нефть когда-нибудь закончится, да и с ядерными реакторами есть понятные проблемы, в первую очередь связанные с отработанным ядерным топливом, которое надо хранить где-то в безопасном месте. В термоядерной энергетике таких проблем нет по определению.

— **Может быть, не стоит ждать, пока иссякнет нефть? Ведь, как известно, каменный век закончился не потому, что закончились камни...**

— Конечно! Надо двигаться вперед и освоить эту технологию как можно скорее. Сейчас трудно себе даже представить, что было бы, если бы работали коммерческие термоядерные реакторы, которые уже давали бы на рынок энергию по конкурентоспособным ценам.

### Предсказуемая непредсказуемость

— **Вы говорили, что ученые до конца так и не освоили поведение плазмы. Это связано с тем, что она просто недостаточно хорошо изучена, или ее поведение непредсказуемо в принципе?**

— Очевидно, эта задача может быть разрешена, но, как оказалось, это очень и очень непросто. Если сравнить с теми же ядерными реакторами, то, несмотря на всю технологическую сложность, они освоены уже 60 с лишним лет назад. А управление плазмой и переносом частиц в плазме значительно сложнее, чем многие другие задачи, которые уже разрешены.

Плазма в чем-то непредсказуема. Может открыться какое-то новое ее свойство, которое приведет либо к улучшению ее параметров, либо к ухудшению. И это может довольно сильно изменить то понимание плазмы, которое сейчас сформировалось.

— **А можете привести пример подобного события?**

— Примерно лет 30 назад был открыт так называемый режим улучшенного удержания, и никто этого не ожидал. Может быть, построят *ITER*, а там откроется какой-нибудь режим суперулучшенного

удержания, который сразу же все вопросы и закроет. А может быть, случится наоборот. Точно можно предсказать лишь одно: сюрпризы еще будут. Но надо изучать вопрос, надо проводить исследования. И они проводятся, в том числе у нас, в Курчатовском институте.

— **Как был открыт режим улучшенного удержания?**

— Фактически он был открыт случайно. Нарастивали мощности, которые вкладывали в плазму. И вдруг после некоторых манипуляций удержание плазмы стало в два раза лучше. И такие режимы были получены после этого открытия практически на всех установках, на всех токамаках, которые в мире существуют. На *ITER* тоже планируется достичь такого режима.

Но могут быть сюрпризы и отрицательного характера. Откроется какая-нибудь новая неустойчивость, которая сейчас, быть может, неизвестна или известна только в теории. Или может случиться так, что несколько разных видов неустойчивости как-нибудь друг с другом провзаимодействуют, что приведет к ухудшению параметров плазмы. Трудно сказать. Но сегодня физики — исследователи плазмы уже в основном умеют этим управлять. Известно, как на плазму надо действовать, чтобы стало лучше или хуже. Используя это знание эмпирически, можно, в принципе, получить хороший термоядерный выход, даже не умея описывать поведение плазмы досконально, во всех деталях. Точно так же мы ежедневно используем двигатель внутреннего сгорания, не пытаюсь уяснить все нюансы происходящих в нем процессов.

— **Кроме процессов, протекающих в плазме, какие еще можно выделить проблемы?**

— Проблем масса, на самом деле. Плазма очень горячая. Она содержится внутри замкнутого объема — вакуумной камеры, и энергия, которая в плазме образуется, выходит и поглощается стенками реактора, т.е. выходит на поверхность камеры. Если посчитать среднюю нагрузку, которая приходится на всю площадь поверхности камеры за все время существования плазмы, эта нагрузка не очень велика даже в *ITER*. Ожидаемые величины — порядка тех, что характерны для двигателя внутреннего сгорания. Но проблема в том, что выход энергии может быть очень неоднороден. Во-первых, по времени: могут быть какие-то быстрые вспышки, когда энергия резко поступает на стенку. Во-вторых, по пространству: какие-то точки очень сильно греются, какие-то наоборот получают мало энергии. Это приводит к тому, что предъявляются очень высокие требования к конструкционным

материалам. Задача состоит в том, чтобы не допустить попадания в плазму элементов стенки.

Сейчас в *ITER* в качестве покрытия вакуумной камеры планируется использовать бериллий и вольфрам. Если бериллий будет поступать в плазму, это, конечно, плохо, но не катастрофично, т.к. бериллий — материал с малым атомным номером. На бериллии термоядерная реакция не идет, она идет на дейтериии-тритии, а бериллий здесь выступает как примесь, которая будет снижать эффективность реакции. А вот если в плазму попадет значительное количество вольфрама, то это приведет к потере устойчивости плазмы и к срыву разряда, что уже, в свою очередь, может быть чревато какими-то разрушениями в вакуумной камере установки. Есть еще неустойчивость срыва, при которой вся энергия, запасаемая в плазме в течение длительного времени, может очень резко выйти на стенку и буквально прожечь ее, — это очень опасная вещь.

— **А можно чем-то заменить бериллий и вольфрам?**

**Финансирование *ITER* составляет порядка €15 млрд. Эти цифры можно сравнить с ценой строительства какого-нибудь скоростного шоссе**

— Изначально планировался углерод. Его использование дает хорошие результаты в современных установках и более высокие показатели удержания энергии. Но проблема в том, что в углероде будет накапливаться тритий. Он будет его в себя «засасывать». Тритий очень дорогой, и непонятно, как его оттуда доставать. Кроме того, стойкость углерода к тепловым нагрузкам значительно ниже. Эта проблема привела к тому, что от углерода было решено отказаться и вместо него использовать бериллий и вольфрам.

### Большой конструктор

— **Установка T-10 создана еще в 1970-е гг., и большинство существующих токамаков в мире примерно того же поколения. Достаточно ли их технических характеристик, чтобы проводить современные исследования?**

— Достаточно. Токамак — это своеобразный конструктор, в котором можно очень многое изменить внутри. Можно полностью изменить покрытие, структуру вакуумной камеры, заменить материалы, из которых она состоит. Но постепенно строятся и новые токамаки. В частности, сейчас

За работой в лаборатории исследований транспортных процессов в плазме отделения токамаков НИЦ «Курчатовский институт»



— Наша лаборатория как раз изучает транспортные процессы, которые происходят в плазме, — как переносятся энергия и частицы в плазме. Конкретно мы изучаем плазму с помощью спектроскопических методов — смотрим на свет, выходящий из плазмы. Он содержит в себе огромное количество информации, если понимать физическую природу его происхождения. Например, мы инжектируем в плазму пучок атомов водорода, ускоренных напряжением 30 кВ до очень высоких скоростей. При этом возникает дополнительное излучение из центральных областей плазмы. Оно несет в себе информацию о самых главных параметрах: о концентрации и температуре электронов плазмы, примесей, ионов, которые будут реагировать и на которых будет осуществляться термоядерная реакция.

в Курчатовском институте будет фактически сооружен новый токамак — уже начата очень глубокая модернизация существующей установки токамака T-15. В итоге получится вполне современная исследовательская установка.

— **Говоря компьютерным языком, апгрейд токамака вполне возможен и достаточно прост?**

— Конечно. И постоянно производится. Жизнь не стоит на месте, каждый день происходит что-нибудь новое.

Сейчас в мире активно ведутся эксперименты как раз с вольфрамом, установленным в камере токамака. В том числе у нас ведется такая программа на T-10. Самое главное — можно постоянно вводить в строй диагностические системы, которые могут дать гораздо больше информации о плазме, чем было вчера или позавчера. Здесь наука постоянно идет вперед.

— **Чем токамак, над которым сейчас работают в Курчатовском институте, будет принципиально отличаться от T-10?**

— Обновленная установка T-15 будет обладать совсем другой конфигурацией. T-10 — это токамак круглого сечения, а T-15 будет установкой с вытянутым сечением плазменного шнура в форме буквы D. Будет установлено специальное устройство — так называемый дивертор, который сможет принимать на себя большую часть нагрузки, выходящей на стенку.

Таким образом, наш коллектив физиков, сейчас работающий на T-10, получит в руки новую машину, которая, несомненно, сможет внести свой вклад в мировую науку.

— **А чем занимается конкретно ваша лаборатория?**

Все это имеет целью понять, как происходят переносы — перенос частиц, перенос примесей, перенос рабочего газа, перенос энергии. Плазма состоит из электронов и ионов. Тепло может уходить быстрее либо по ионному каналу, либо по электронному. Все это зависит от огромного количества процессов. Мы изучаем и многие другие параметры.

— **Какие успехи достигнуты? Чем можете похвастаться?**

— Похвастаться можно тем, что мы все больше и больше понимаем — пусть даже и не конкретные процессы, которые у нас происходят, но можем даже количественно описать вынос энергии и плазмы. То есть мы создаем необходимую базу для того, чтобы в дальнейшем разобраться, какие бывают неустойчивости или турбулентности в плазме, что всеми этими процессами управляет и как их контролировать.

## Токамак с характером

Тут еще важно сказать, что на одной установке могут доминировать какие-то одни процессы, а на другой установке, которая отличается либо методом нагрева, либо размером токамака, физика может проявляться совершенно иначе. Такой «пазл» необходимо собрать, чтобы понять, что происходит у нас и как это можно применить к другим установкам. Но тут в помощь постоянное международное сотрудничество. Регулярно проходят различные конференции, где мы в том числе обмениваемся опытом с зарубежными коллегами и от них что-то перенимаем. Без этого нельзя. В одной стране сделать полностью работающий термоядерный реактор — наверное, сегодня практически

нерешаемая задача. В свое время человечество решило, что эту технологию можно развивать только сообща. И с тех пор все исследования по этой теме стали открытыми.

**— В рамках ваших исследований было что-то, что вас на самом деле удивило?**

— Да, один раз мы получили подобный результат: мы обнаружили, что у нас на токамаке примеси, поступающие в плазму, распределяются по ней не так, как электроны, и не так, как рабочий газ, а аккумулируются в центре, занимают именно центральные области шнура. Если такое будет происходить в реакторе, ни о каком хорошем термоядерном выходе просто речи быть не может. Особенно если аккумулироваться будут тяжелые примеси, такие как тот же вольфрам. Но оказалось, что если нагрев плазмы вести с помощью СВЧ-излучения на частоте 130–140 ГГц, то примеси из центра просто выбрасываются. Это было довольно интересное наблюдение. Не только мы, конечно, такие уникальные, что обнаружили этот феномен. Но у нас этот эффект оказался очень контрастным, было приятно на такое посмотреть. Можно сказать, мы внесли определенный вклад в общее дело.

Бывают разные наблюдения, но они в основном понятны только специалистам: здесь стало чуть лучше, здесь что-то изменилось. Но все это может быть темой обсуждения с коллегами, в том числе на конференциях. Бывает, что из таких кусочков собирается более цельная картина, которая позволяет что-то понять.

**— Если говорить о термоядерном реакторе и вообще о термоядерном синтезе, существует хотя бы теоретический шанс совершить прорыв и кардинально ускорить процесс перехода к термоядерной энергетике?**

— С самого детства я слышал, что на Луне есть практически бесконечные запасы гелия-3 — легкого изотопа гелия, на котором можно осуществить более безопасную термоядерную реакцию. Сейчас запланировано, что термоядерный синтез будет происходить на дейтерий-тритии, но при этой реакции выделяется нейтрон с очень высокой энергией. Его, конечно, можно использовать, но помимо выполнения полезной функции он еще попадает в элементы вакуумной камеры, в элементы конструкции установки и создает сильную наведенную радиоактивность. Кроме того, это ведет к ухудшению конструкционных свойств — постепенной деградации материалов. У реакции дейтерий-гелий-3 нет такого дефекта. Действительно, при реакции гелия с дейтерием не образуется нейтрона и стенка вакуумной камеры из-за этого не разрушается.

Но я недавно увидел оценки: для того чтобы осуществить термоядерную реакцию на гелии-3, необходимо будет улучшить параметры плазмы, которых сейчас человечество надеется достичь в *ITER*, во много раз. Можно привести такое сравнение: если создать *ITER* и получить термоядерную реакцию для человечества — это как для отдельно взятого человека залезть на Эверест, то освоить технологию с гелием-3 — это примерно как залезть на какую-нибудь гору, которая в три раза выше и находится на Марсе. А так — да, действительно, все возможно.

**— Кроме того, придется как-то организовать доставку гелия-3 с Луны или синтезировать здесь...**

**При реакции гелия с дейтерием не образуется нейтрона с высокой энергией, и стенка вакуумной камеры из-за этого не разрушается**

— Можно, но в этом не будет большого смысла, потому что надо получить гораздо более высокие температуры и концентрации плазмы, чем те, которые сейчас по силам освоить человечеству. Гелием-3 иногда обуславливают необходимость полета на Луну. Но такие оценки говорят, что, по всей видимости, это делать совершенно незачем, по крайней мере для термоядерного синтеза. Поэтому на данный момент дейтерий с тритием — наше будущее. ■

*Беседовал Виктор Фридман*

## СПРАВКА

**Леонид Александрович Ключников**

- Аспирант отделения токамаков НИЦ «Курчатовский институт».
- Родился в Москве.
- В 2011 г. окончил Московский инженерно-физический институт (МИФИ) по специальности «физика плазмы».
- Работает в НИЦ «Курчатовский институт» с момента прохождения преддипломной практики.
- Сфера научных интересов: физика плазмы, спектроскопия плазмы.
- Увлечения: велоспорт.
- Женат, есть сын.