

В ИЯФ СО РАН ГОТОВЯТ «КОНФЕТКУ» СМОЛА



СУДНИКОВ Антон Вячеславович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 24 научных работ

Новосибирские физики вместе со своими российскими и зарубежными коллегами работают над созданием первого в мире термоядерного реактора ИТЭР, запуск которого станет важнейшим шагом к термоядерной энергетике будущего. ИТЭР – токамак, замкнутая магнитная установка для удержания плазмы. Сегодня в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН разрабатывается и новый формат альтернативного варианта магнитных ловушек – открытого поля со спиральной симметрией, которая легла в основу создания винтовой ловушки СМОЛА, позволит открытым ловушкам сравняться с топовыми токамаками по показателям удержания плазмы

Ученые серьезно задумались о возможности управляемого термоядерного синтеза после испытания первой водородной бомбы, и первой задачей в этом направлении стало «приручение» высокотемпературной плазмы. Другими словами, нужно было добиться определенных параметров температуры, плотности и времени удержания этого «звездного» вещества.

Как удержать плазму

Если на Солнце плазму удерживает гравитационное поле, то на Земле решили работать с магнитным. Уже в 1950 г. советские физики А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм выдвинули идею создания термоядерного реактора на основе принципа магнитного удержания и предложили концепцию замкнутой магнитной ловушки. Так появился *токамак* – тороидальная камера с магнитными катушками, или, по-простому, «бублик» с током. Работы по созданию токамаков возглавил Л. А. Арцимович, руководитель советской программы по управляемому термоядерному синтезу с 1951 г.

Конфигураций «закрытых» ловушек было разработано несколько, но именно на токамаке Т-3 в московском Курчатовском институте были получены первые, ошеломительные для того времени результаты: плазма с температурой свыше 10 млн °С! Об этих результатах впервые сообщили на Международной конференции МАГАТЭ по физике плазмы и управляемым термоядерным реакциям, которая прошла в новосибирском Академгородке в 1968 г., а токамаки с тех пор стали основой мировой термоядерной программы.

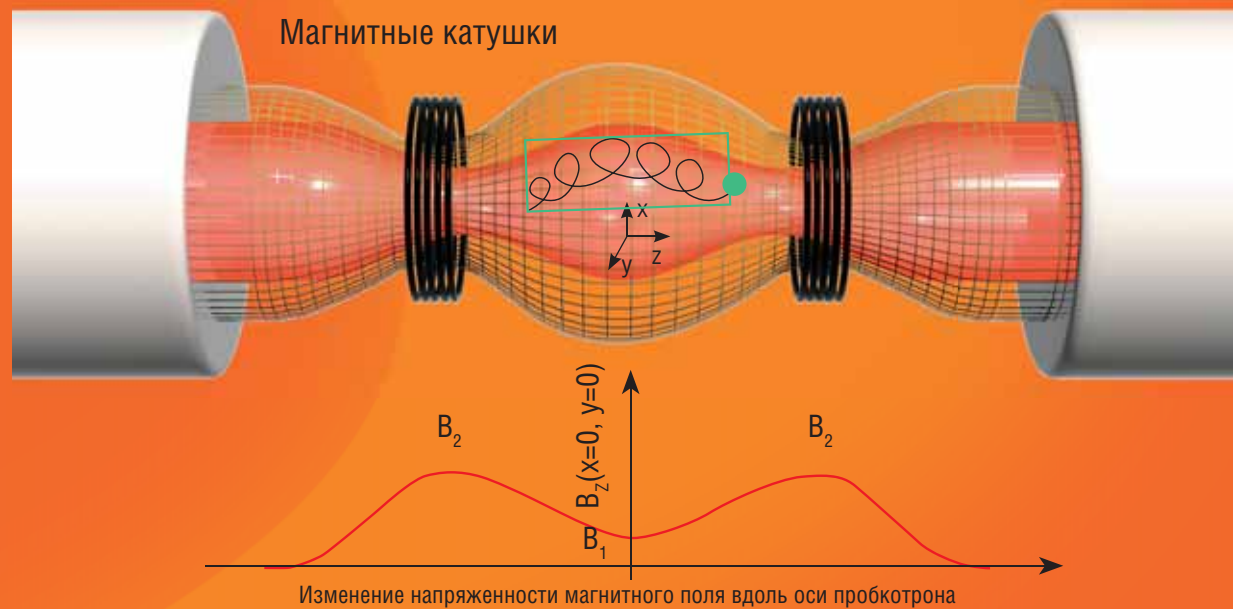
Впрочем, однозначно сказать, что «победили» именно токамаки, нельзя, пока нет ни одной промышленной термоядерной станции. Сегодня активно исследуются и запускаются другие, более сложно устроенные замкнутые ловушки – *стеллаторы*, предложенные еще в 1951 г. американцем Л. Спитцером, а также альтернативные установки – *ловушки открытого типа*. В простых по геометрии открытых магнитных ловушках плазма удерживается в определенном объеме «продольного» магнитного поля,

Ключевые слова: управляемый термоядерный синтез, токамак, открытые магнитные ловушки, ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН, винтовая ловушка.

Key words: controlled fusion, tokamak, magnetic mirrors, Budker INP, helical mirror

«Токамак» – это аббревиатура от словосочетания «тороидальная камера магнитная», которую предложил ученик академика И. В. Курчатова, И. Н. Головин. Создатель первой тороидальной системы Н. А. Явлинский предложил для благозвучия заменить букву «г» на «к». В таком виде это слово вошло во все языки мира

© А. В. Судников, 2017



причем для предотвращения ее вытекания по силовым линиям используются разные виды магнитных «пробок» и специальных расширителей.

Концепция открытой магнитной ловушки была предложена в 1953 г. независимо друг от друга двумя учеными: Г. И. Будкером (СССР) и Р. Постом (США). Через шесть лет справедливость этой идеи была подтверждена в эксперименте С. Н. Родионова, сотрудника только что созданного новосибирского Института ядерной физики СО АН СССР. С тех пор ИЯФ является лидером в проектировании, строительстве и экспериментах с ловушками открытого типа.

Конечно, современные установки новосибирских ученых экспериментальные, а поэтому небольшие, импульсные. Но теоретически такой тип магнитных ловушек перспективен для использования в промышленном термоядерном реакторе, поскольку они имеют ряд потенциальных преимуществ по сравнению с замкнутыми: у них более простое инженерное решение, большая эффективность использования энергии магнитного поля, т. е. более высокая экономичность. К тому же работа этих устройств в стационарном режиме в отличие от токамаков не вызывает проблем.

Сегодня группа физиков из плазменных лабораторий ИЯФ работает над свежей идеей: использовать для подавления продольных потерь плазмы из открытой ловушки магнитное поле с винтовой симметрией, позволяющее управлять вращением плазмы. Для проверки этой концепции была разработана и построена экспериментальная установка СМОЛА (*Спиральная Магнитная Открытая Ловушка*).

В пробкотроне Будкера-Поста для удержания плазмы используется особая конфигурация магнитного поля. На схеме пробкотрона (вверху) показана часть траектории захваченной частицы. По: (Шошин, 2007)

«Мясорубка» для плазмы

Что же представляет собой новая открытая ловушка, и чем она отличается от «прародителей»?

Принципиальная особенность всех открытых ловушек в том, что силовые линии магнитного поля в них не замкнуты, и плазма удерживается посередине. А на концах установок, вдоль силовых линий, плазма может вытекать, и наша задача – уменьшить этот поток. Для уменьшения потерь на концах таких ловушек ставят *магнитные пробки*, т. е. резко усиливают силу магнитного поля. В *газодинамической ловушке* (ГДЛ) таким способом удается очень сильно сузить «горлышки» бутылки, из которой истекает плазма, но полностью избежать потерь нельзя.

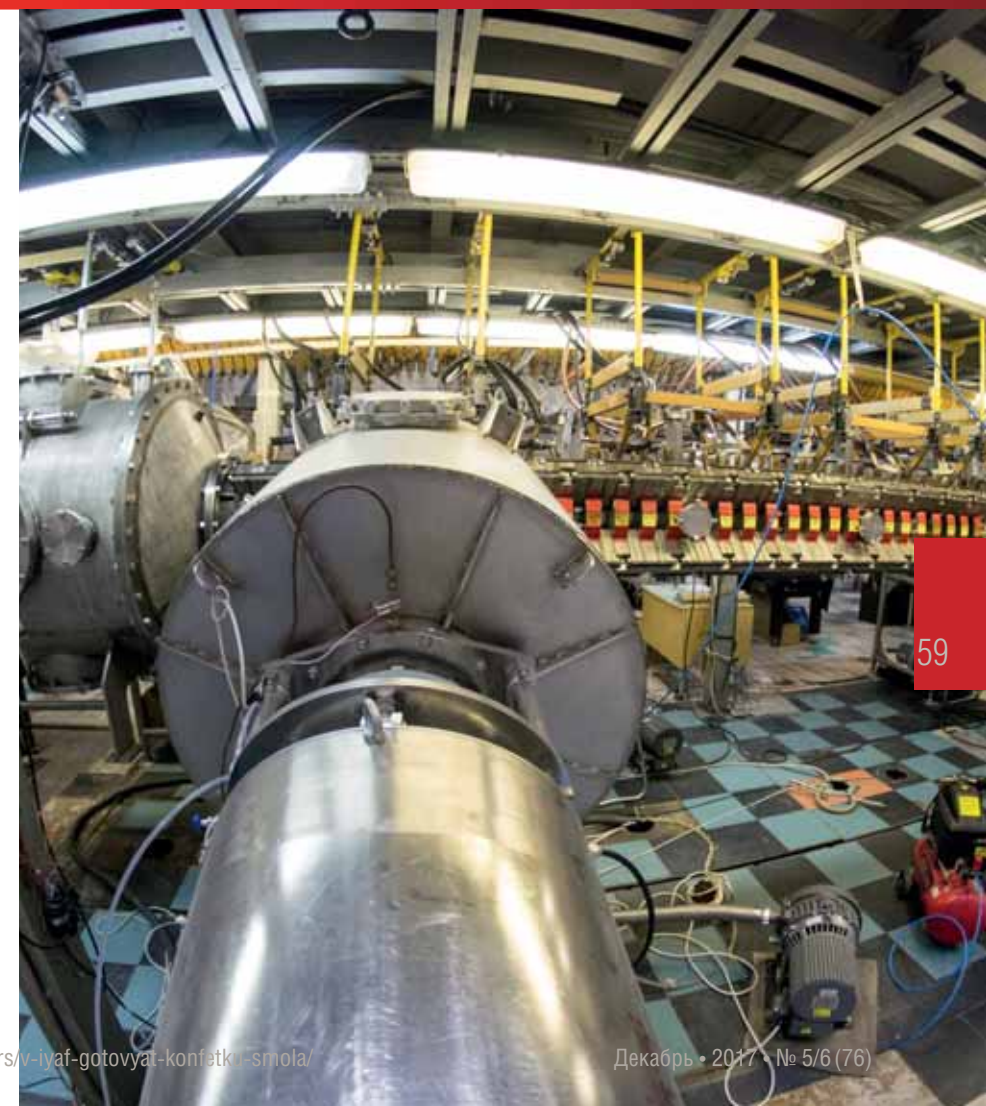
В *гофрированной ловушке* (ГОЛ) с каждой стороны стоит не одна магнитная пробка, как в ГДЛ, а несколько в зависимости от конфигурации. Например, в установке ГОЛ-3 их было 52, а в ГОЛ-NB – по 14 на каждом конце. В результате такой конструкции плазма не просто течет через гладкую трубу, а как бы трется о «гофрировку» магнитного поля. Из-за силы трения скорость потока становится ниже звуковой, а значит, и потерь будет меньше. Так как расстояние между пробками жестко задано, сделать их бесконечно близкими нельзя,

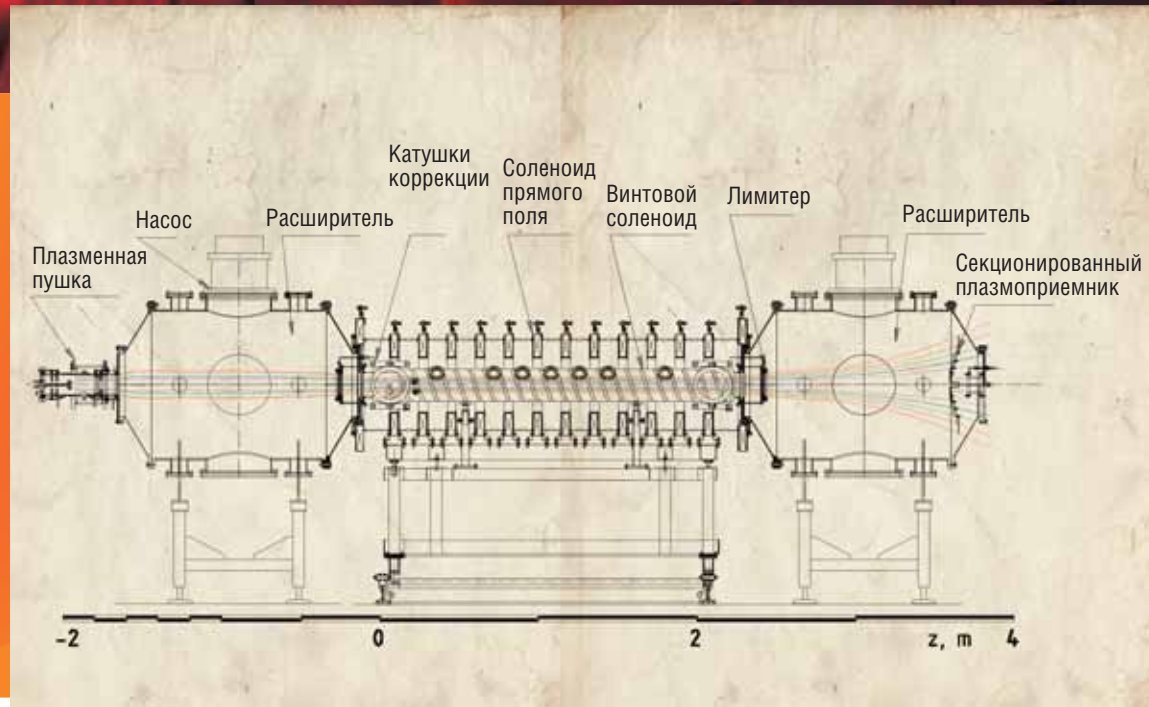
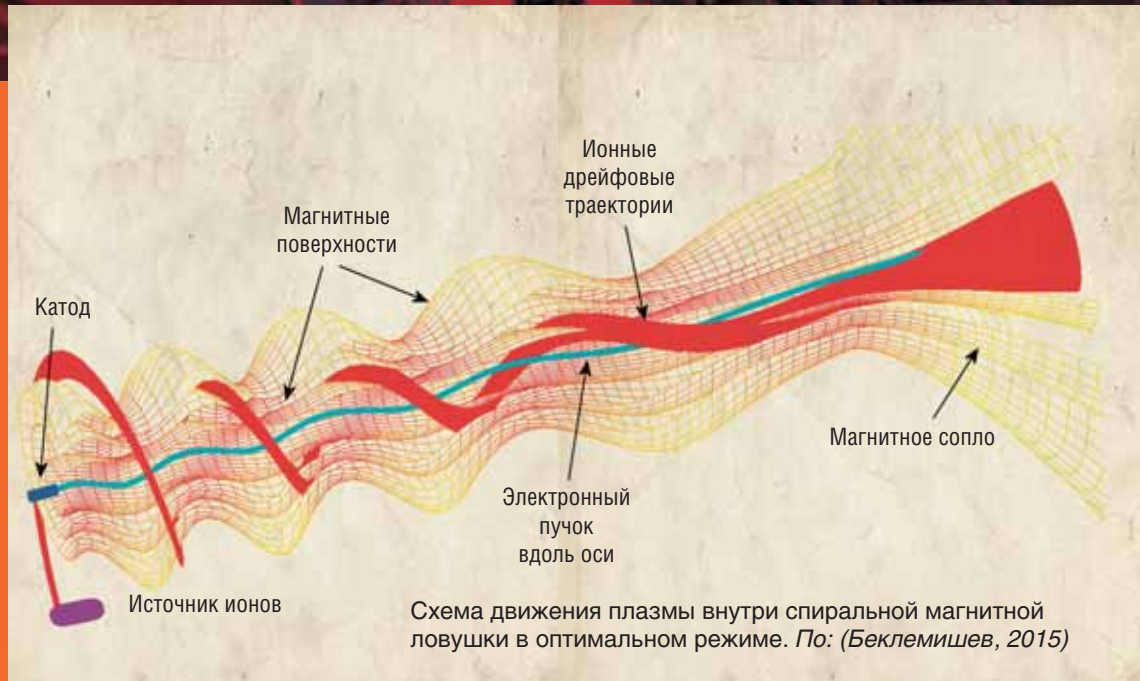
Установка ГОЛ-NB в ИЯФ СО РАН, созданная на основе гофрированной магнитной ловушки ГОЛ-3. На этой и других открытых ловушках в институте проводятся эксперименты по изучению физики плазмы

но можно увеличить длину этих многопробочных секций.

Чтобы уменьшить скорость истечения плазмы, многопробочные секции теоретически следовало бы в прямом смысле слова перемещать к центру установки. В этом случае сама плазма будет «стоять», а вдоль нее – «пролетать» магнитные пробки, создавая силу трения и увлекая вещество за собой. Идея двигать пробки возникла одновременно с самой идеей многопробочной ловушки, но в то время задачу посчитали невыполнимой и нерентабельной: чтобы создать подобное «бегущее» поле, нужна невероятная мощность.

Мысль «обмануть» вещество, создать такую конфигурацию стационарного магнитного поля, чтобы плазма «казалось», что оно движется к центру, возникла в конце 2012 г.





Как известно, плазма в открытой ловушке всегда вращается, и есть задачи, когда ее нужно целенаправленно вращать. Вопрос был простой: можно ли это вращение использовать для чего-то еще?

Идея состояла в том, чтобы создать магнитное поле в виде винта. Представьте себе шнек мясорубки, который крутит измельченное мясо в нужном направлении. У нас аналогично с двух сторон от центрального отсека с плазмой создается винтовая нарезка поля, но при этом разная – с правым и левым винтом. С одной стороны магнитное поле тащит плазму влево, с другой – вправо. Таким образом, обе эти концевые секции закачивают

плазму обратно. Конечно, полностью избавиться от потерь при этом нельзя: когда поток плазмы слабеет, частицы друг с другом даже не сталкиваются. Но если удалось сделать поток таким редким, значит, мы на порядок-два выиграли по параметрам удержания плазмы.

Новая концепция позволяет создать установку, которая по своим характеристикам может быть сравнима с лучшими нынешними токамаками. Сложность только в том, что пока эта идея теоретическая. В ноябре 2017 г. мы физически запустили установку СМОЛА и перешли к новому этапу – экспериментальному.

Для нашего уникального эксперимента нужно не так уж и много: одна винтовая магнитная пробка, узел, где

создается плазма, и ее приемник, а также расширитель, вытягивающий вещество в магнитное поле. Сейчас, запустив установку, мы начали «ощупывать» плазму и смотреть, как изменяются ее характеристики на разных режимах работы. Чтобы подтвердить теоретические расчеты, нам нужно показать стабильное улучшение характеристик плазмы в устройстве с винтовой магнитной пробкой по сравнению с обычным.





Установка СМОЛА на этапе сборки. Слева и справа от винтовой секции – баки источника и приемника плазмы

Через одно-два поколения открытых ловушек можно будет говорить о создании полноценных термоядерных реакторов, причем работающих на бестритиевых топливах (например, с использованием реакции синтеза дейтерий-дейтерий или протон-бор). Токамаки же работают с реакцией дейтерий-тритий, из-за чего возникает серьезная проблема радиационной защиты. Недаром так много внимания в проекте ИТЭР уделяется созданию сверхпрочных материалов и мощной биозащиты. В реакторе, работающем на реакции синтеза двух ядер дейтерия, на конструкциях не оседает радиоактивный тритий, что делает его системы безопасности намного более простыми.

Преимущество термоядерной реакции синтеза дейтерий-тритий лишь в том, что человечество уже получает с ее помощью термоядерную плазму. Чтобы стала возможна другая, энергетически менее доступная реакция, требуются намного большие температуры, плотность и время удержания плазмы, но таких технологий еще не создано.

Впрочем, говорить о безнейтронных реакторах как о далеком будущем тоже не стоит. На открытой ловушке с улучшенным удержанием плазмы теоретически можно достичь параметров, необходимых для реакции дейтерий-дейтерий, тогда как экспериментально доказано, что в случае токамаков для этого есть серьезные ограничения.

Естественно, нашу «винтовую» модель еще нужно проверять и оптимизировать, для чего потребуются большая научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа. Но уже сейчас ясно, что это начало интересной научной истории, и в конце нас ожидают результаты, которые могут оказаться очень важными для термоядерной энергетики будущего.

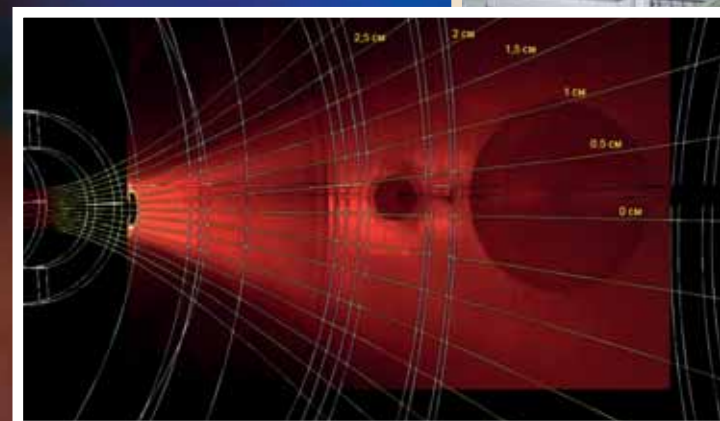
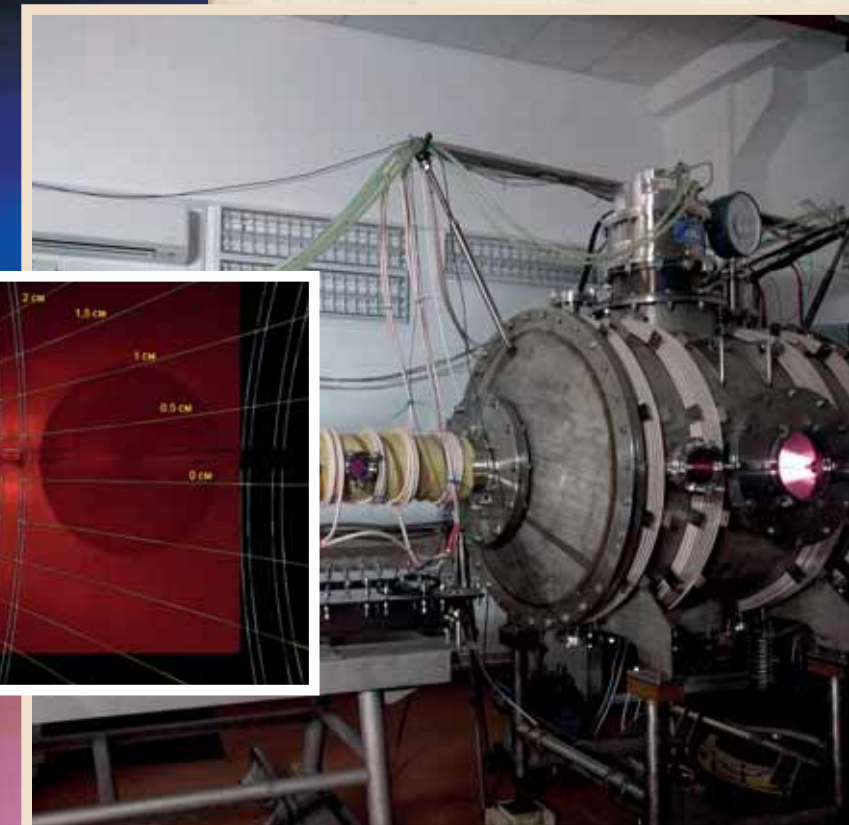
Может показаться, что шаг, который мы сделали на пути улучшения конфигурации открытых ловушек, – это шаг в сторону, потому что весь мир сегодня работает с ловушками замкнутой конфигурации. Но мы надеемся экспериментально показать преимущества открытых форм. И если удастся доказать, что несмотря на технические сложности винтовая форма открытой магнитной ловушки дает существенный выигрыш в удержании плазмы, то в устройства следующего поколения, которые планируются создавать в ИЯФ, будут встраиваться винтовые секции. Уже сейчас мы видим тот путь, который нужно пройти, и практические применения нашей технологии.

Винтовые ловушки могут использоваться как нейтронные источники для исследования поведения материалов при контакте с плазмой, создания *подкритических* (неспособных самостоятельно поддерживать ядерную реакцию) реакторов, но в первую очередь для создания «обычных» атомных электростанций. Некоторые конфигурации винтовых ловушек увеличивают скорость потока плазмы до 100 км/с, что служит необходимым условием для двигателей космических кораблей, транспортирующих спутники с геосинхронной орбиты, к примеру, на орбиту Луны.



Торжественная церемония запуска экспериментальной установки СМОЛА. Слева направо: директор ИЯФ СО РАН, академик П. В. Логачев, мэр г. Новосибирска А. Е. Локоть, зам. врио губернатора Новосибирской области А. К. Соболев, руководитель Сибирского территориального управления ФАНО России А. А. Колович, председатель СО РАН, академик В. Н. Пармон

Лумепамыра
 Beklemishev A.D. Helicoidal System for Axial Plasma Pumping in Linear Traps // *Fusion Sci. Technol.* 2013. V. 63. N. 1. P. 355–357.
 Beklemishev A.D. Radial and Axial Transport in Trap Sections with Helical Corrugation. *AIP Conference Proceedings*. 2016. DOI: 10.1063/1.4964191.
 Beklemishev A.D. Helical plasma thruster // *Phys. Plasmas*. 2015. V. 22. N. 10. DOI: 10.1063/1.4932075.
 Budker G.I., Mironov V.V., Ryutov D.D. Gas dynamics of the dense plasma in corrugated magnetic field // *International conference on plasma theory. Kiev, 1971. Published by ITP AS USSR, 1972, p. 145.*
 Postupaev V.V., Sudnikov A.V., Beklemishev A.D. & Ivanov I.A. Helical Mirrors for Active Plasma Flow Suppression in Linear Magnetic Traps // *Fusion Eng. Design*. 2016. V. 106. P. 29–33.
 Sudnikov A.V., Beklemishev A.D., Postupaev V.V. et al. SMOLA device for Helical Mirror Concept Exploration // *Fusion Eng. Design*. 2017. V. 122. P. 86–93.



В публикации использованы фотографии из архива автора

Работа поддержана грантом РФФ 14-50-00080 «Развитие исследовательского и технологического потенциала ИЯФ СО РАН в области физики ускорителей, физики элементарных частиц и управляемого термоядерного синтеза для науки и общества»