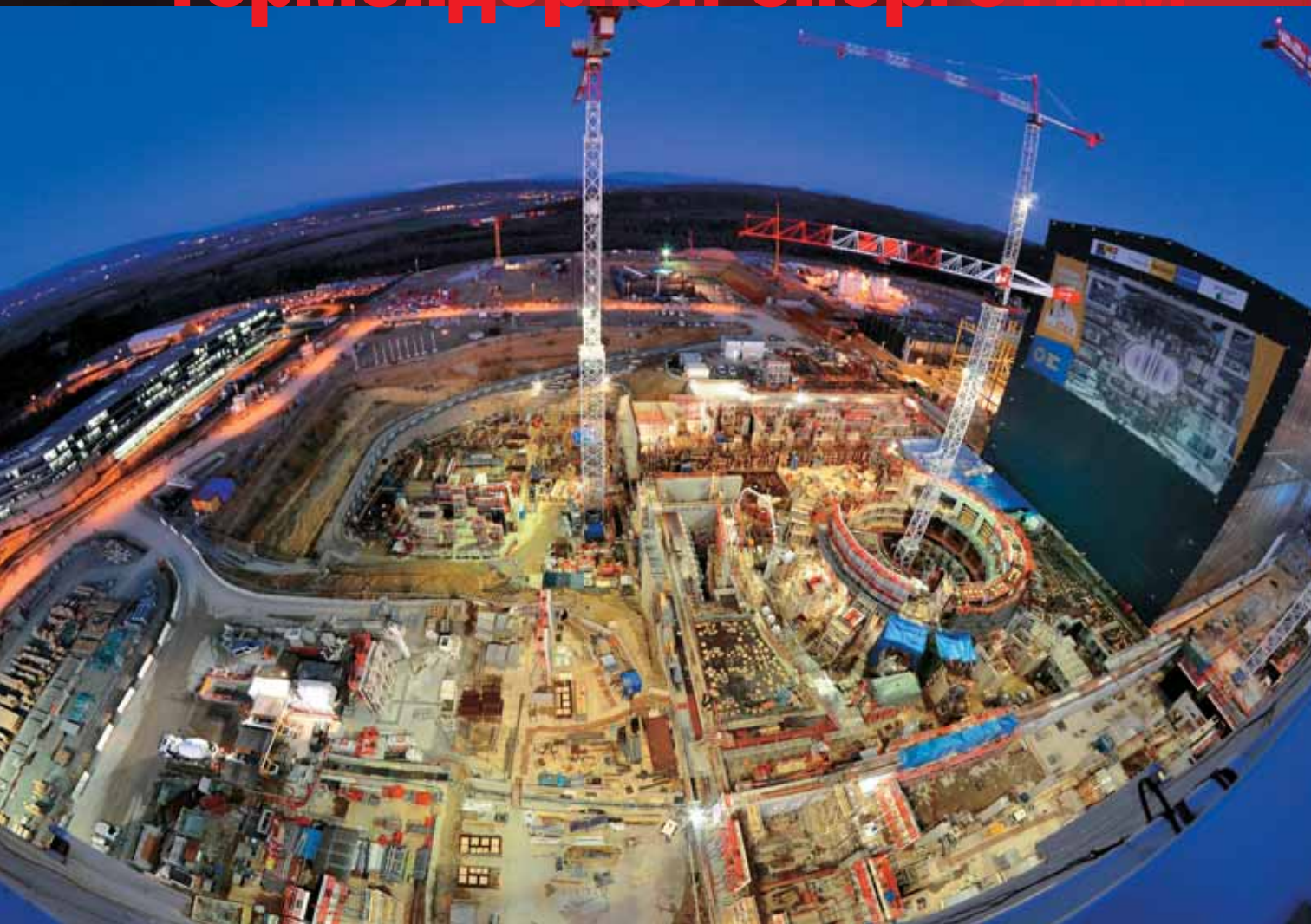


# О настоящем и будущем Термоядерной энергетики



БУРДАКОВ Александр Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск). Автор и соавтор 350 научных публикаций и 5 патентов

*Стакан дейтерия, тяжелого изотопа водорода, присутствующего в обычной воде, по энергетическому «потенциалу» эквивалентен эшелону вагонов нефти. Этот поразительный факт при наличии необходимых технологий сулит человечеству в далеком будущем неисчерпаемый источник энергии. Проект Международного экспериментального термоядерного реактора (ITER), основанный на реакции слияния ядер двух тяжелых изотопов водорода, дейтерия и трития, в ядро гелия, призван показать миру возможность промышленного производства термоядерной энергии. И если эксперимент пройдет успешно, то это будущее может оказаться не таким уж и далеким*

Первое упоминание о «звездном» термояде относится еще к 1928 г., но систематические работы по управляемому термоядерному синтезу начались лишь в 1950-х гг. сразу в трех странах: Англии, США и Советском Союзе. И, как нетрудно догадаться, поначалу далеко не в мирных целях: первый успех на этом пути прозвучал в СССР летом 1953 г. очень громко – взрывом первой в мире водородной бомбы. Тогда же появилась идея использовать термоядерную энергию в энергетике, но первоначальная эйфория перетекла в долгие годы исканий и напряженной работы.

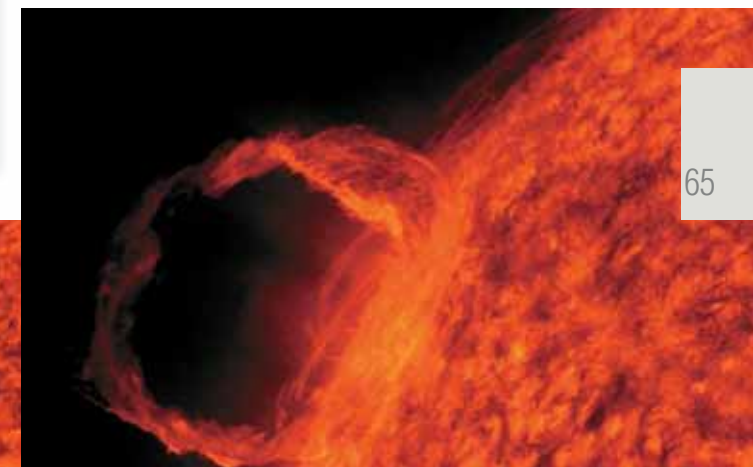
Следующий шаг к управляемому термоядерному синтезу был сделан советскими физиками А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом, предложившими удерживать плазму с помощью магнитного поля. Нужно было только придумать технологию, с помощью которой вещество можно не только довести до необходимой температуры, но и удержать его. Другими словами, создать ловушку для плазмы.

Наши ученые выдвинули идею *замкнутого* магнитного термоядерного реактора. Проблема в том, что магнитное поле сжимает и удерживает плазму в поперечном направлении относительно силовых линий, а вот вдоль них плазма течет свободно, как по рельсам.

Именно термоядерным реакциям обязаны своим существованием звезды, в том числе и ближайший к нам желтый карлик класса G-2 – Солнце.

Внизу – формирование активного солнечного протуберанца. 30 марта 2010 г.

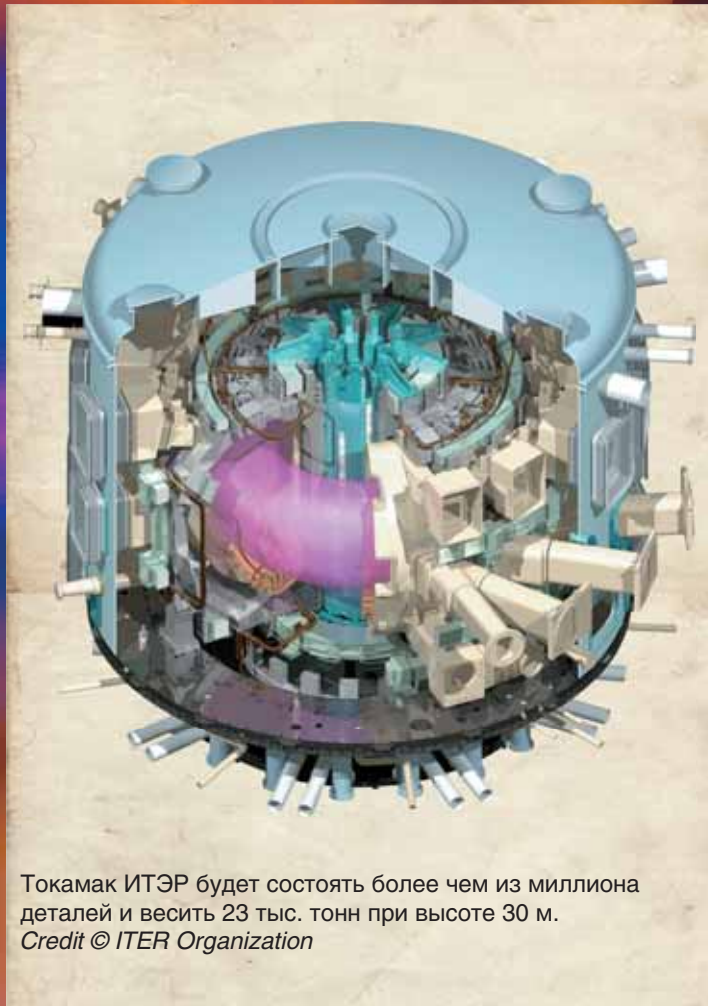
Фото Solar Dynamics Observatory, NASA



**Ключевые слова:** термоядерная энергетика, ИТЭР, управляемый термоядерный синтез, физика плазмы, токамак, открытая ловушка.

**Key words:** fusion energy, ITER, nuclear fusion, plasma physics, tokamak, open trap

Строительная площадка ITER в Провансе, на юго-востоке Франции. Октябрь 2017.  
Credit © ITER Organization



Токамак ИТЭР будет состоять более чем из миллиона деталей и весить 23 тыс. тонн при высоте 30 м.  
Credit © ITER Organization

Плазма – это полностью или частично ионизованный газ, в котором суммарные отрицательные и положительные заряды равны. В целом она представляет собой электрически нейтральную среду. Эта четвертая форма состояния вещества (после твердого, жидкого и газообразного) существует при температурах  $10^4$  °С и выше.

Плотная высокотемпературная плазма находится только в звездах, на Земле ее можно получить лишь в лабораторных условиях. Эта необычная для нас «лучистая материя» поражает воображение большим числом степеней свободы и одновременно способностью к самоорганизации и отклику на внешнее воздействие, такое как электрические и магнитные поля.

Плазму можно удерживать в магнитном поле, заставляя принимать различные формы, но она стремится занять наиболее энергетически выгодное для нее положение: подобно живому организму, она будет вырываться на свободу из жесткой «клетки» магнитной ловушки, если конфигурация последней ее не устраивает (Шошин, Аникеев, 2007)

«Запереть» плазму на пути магнитных силовых линий можно разными способами, но самой успешной оказалась отечественная идея *токамака* – тороидальной камеры с магнитными катушками, где силовые линии магнитного поля как бы навиваются на «бублик».

Именно советский токамак Т-3, на котором была получена поразительная для того времени температура плазмы, стал прародителем магнитных ловушек закрытого типа, начавших создаваться во Франции (TFR), США (Alcator A), Японии (JFT) и чуть позже в Китае. Работа над созданием токамаков стала важнейшим шагом на пути к термоядерной энергетике.

### Мирный термояд – почти реальность

Одна из главных проблем, которую надо решить при создании термоядерной станции, – повышение ее КПД, т.е. отношение мощностей, полученной и затраченной в ходе термоядерной реакции. Этот параметр

(фактор  $Q$ ), естественно, должен быть больше единицы. Для промышленной же электростанции значение  $Q$  должно быть не меньше пяти: только в этом случае заряженные альфа-частицы, которые вместе с нейтронами рождаются при термоядерной реакции, но, в отличие от последних, не покидают магнитную ловушку, будут способствовать поддержанию высокой температуры. Таким образом, при  $Q$ , равном пяти, достаточно один раз «зажечь» плазму, а потом никаких дополнительных манипуляций с реактором проводить уже не нужно. В идеале значение  $Q$  должно достигать десяти.

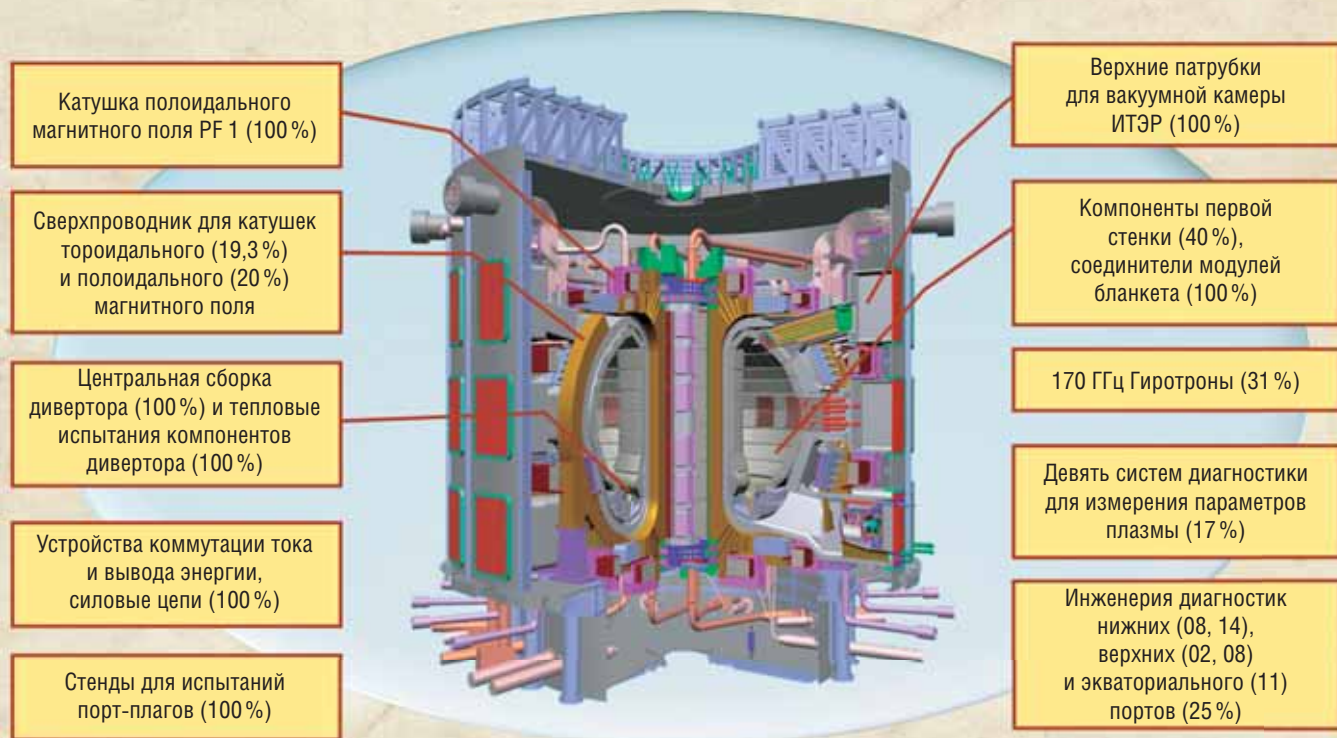
Но создание подобной установки не под силу ни одной стране мира в одиночку. Поэтому в 1980-х гг. советские физики-ядерщики выступили с инициативой строительства международного экспериментального термоядерного реактора – с проектом ИТЭР. Тогдашний глава СССР М. А. Горбачев, президенты Р. Рейган (США) и Ф. Миттеран (Франция) поддержали эту идею. Но прошло еще два десятилетия, прежде чем мир сделал очередной шаг к термоядерному будущему: было



Строительная площадка ИТЭР, 2008–2017 гг.  
Credit © ITER Organization

определено место для строительства экспериментального реактора.

Выбор пал на область Прованс на юго-востоке Франции. Это место соответствовало всем требованиям, включая комфортный климат и хорошую транспортную доступность, в том числе по морю. Последнее было важно, так как планировалась транспортировка громоздких деталей, вес которых мог достигать 100 т и более. Наконец, уже в середине первого десятилетия нового века, началось строительство токамака ИТЭР.

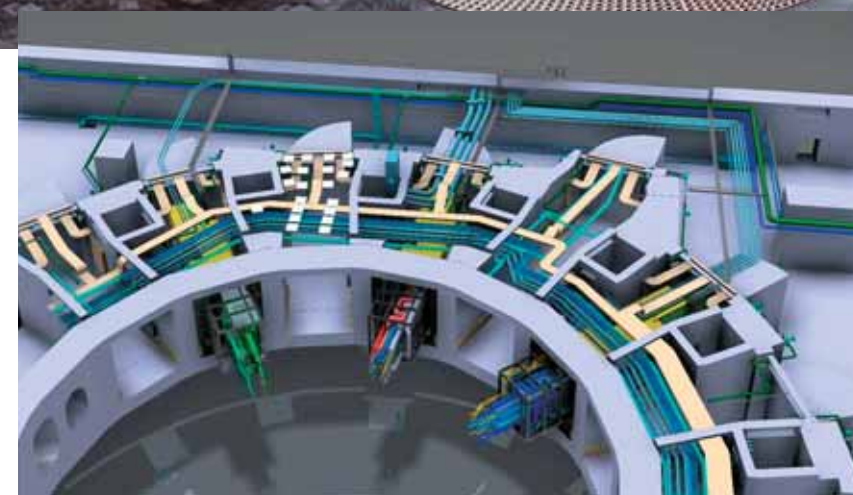


**А. В. КРАСИЛЬНИКОВ, Д. Ф.-М. Н., ДИРЕКТОР «ПРОЕКТНОГО ЦЕНТРА ИТЭР» (МОСКВА):**

«Еще в 1960-х гг. академик Л. А. Арцимович, внесший огромный вклад в реализацию советской программы по управляемому термоядерному синтезу, говорил, что термоядерная энергия будет освоена тогда, когда она действительно понадобится человечеству. Решение семерки технологически развитых стран (Евросоюза, России, Китая, Индии, Японии, Южной Кореи и США) о создании Международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР) свидетельствует о том, что это время пришло. Состоятельной и обоснованной критики проекта ИТЭР и термоядерной энергетики в целом на сегодня нет. Вся интеллектуальная собственность, создаваемая в рамках этого проекта, в полной мере принадлежит всем партнерам, включая РФ, вклад которой эквивалентен 9,09% стоимости проекта. В сборнике, недавно изданном нашим центром, представлено свыше трех десятков подобных новых технологий, которые уже активно внедряют в своих лабораториях и на производствах российские организации, участвующие в реализации проекта. Но хотя проект ИТЭР сегодня является технологической платформой термоядерной энергетики, для создания самого термоядерного реактора необходимо развить еще ряд технологий, выходящих за рамки проекта. Например,

Зоны ответственности России в проекте международного экспериментального термоядерного реактора. ИЯФ СО РАН участвует в инженерии диагностик портов

нужно решить проблемы с генерацией стационарного неиндуктивного тока, созданием электромагнитной системы из высокотемпературного сверхпроводника и т. п. Эксперименты, которые в дальнейшем будут проводиться на ИТЭР, дополняют этот перечень. В программах термоядерных исследований всех технологически развитых стран в качестве горючего сегодня рассматривается дейтерий-тритиевая смесь. Изучение других вариантов термоядерного горючего (дейтерий-дейтерий, дейтерий-гелий-3, протон-бор-11) носит пока академический характер, так как по ряду существенных физико-технических факторов эти реагенты существенно уступают Д-Т-топливу. Планируется, что полномасштабная реализация процессов горения термоядерной плазмы в ИТЭР будет достигнута во второй половине 2030-х гг. Должна быть получена термоядерная мощность в 500 МВт, что в десятикратном размере превысит мощность, «истраченную» на поддержание плазмы. Но потребуется еще около 15 лет, чтобы построить термоядерный реактор (ДЕМО), где будет генерироваться электрическая и тепловая энергия»



44 порта вакуумной камеры будущего термоядерного реактора обеспечат доступ для удаленных погрузочно-разгрузочных операций и диагностики, а также для систем нагрева и вакуумных систем. Полномасштабный прототип вакуумной камеры (справа) был создан специалистами из Японии, России и США. Credit © ITER Organization

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН выполняет несколько работ по проекту ИТЭР. Одна из них – разработка и производство 4-х *порт-плагов*, устройств из стали с максимальным весом 46 т, которые выполняют роль первой стенки, примыкающей к плазме, нагретой до 100 млн °С. Порт-плаг одновременно служит и «окном» в горячую область, так как является носителем многочисленных диагностических устройств, и «пробкой» на пути потока нейтронов, генерируемых в плазме. В защитных модулях порт-плагов разместят диагностические системы, поставляющие информацию о состоянии вещества на центральный пульс. Подобные системы делают в России, Европе, Кореи, Индии, США, Китае. На этом этапе ИЯФ исполняет еще одну роль – интеграционную. В 2019 г. в институте появится

особая площадка, где будут собраны эти диагностические устройства и начнется их монтаж в порт-плаги. По окончании этой сложной инженерной работы узлы будут отправлены во Францию, на площадку ИТЭР. Интеграционная площадка для сборки порт-плагов уже готовится. Это будет «чистое» помещение, где содержание пыли, микроорганизмов, аэрозольных частиц и химических паров будет постоянно контролироваться и поддерживаться на определенном уровне. Один из порт-плагов, которые создаются в ИЯФ, – *экваториальный*, непосредственно контактирующий с плазмой, – должен быть готов к запуску токамака, запланированному на 2025 г. Поэтому все работы должны быть закончены уже к 2023 г. И сейчас у института горячее время, а через год станет еще горячее.



### Каждая деталь – шаг в неизведанное

Создание каждой детали для ИТЭР не простое производство, но сложная исследовательская работа. К примеру, итоговый вариант экваториального порт-плаги, за производство которого взялся ИЯФ, разительно отличался от первоначального.

Уже в процессе работы стало очевидно, что придется искать новые материалы и технологии. Так, для работы над проектом в институте освоили технологию глубокого сверления. В классическом варианте вращается деталь, а сверло неподвижно. А для того, чтобы убрать стружку, которая забивает полость сверления, в сквозное отверстие самого сверла пускают охлаждающую жидкость под большим давлением. Но если деталь большая и неподвижная, как в нашем случае, то вращаться должно сверло, и направить жидкость в полость сверления гораздо сложнее. Подобной технологии в ИЯФ не было, поэтому институт купил и модернизировал под свои нужды соответствующее оборудование. Теперь мы можем сверлить на два метра с двух сторон с хорошей точностью.

В работе по проекту ИТЭР новые технологии требуются буквально на каждом этапе. Одна технология рождает другую – это непрерывный и многоцелевой процесс. Как следствие, в институте появляется комплексное высокотехнологичное оборудование, которое ИЯФ будет использовать и для своих собственных проектов.

То же самое относится и к новым материалам. Например, когда в институте началась работа над нейтронной защитой первой стенки, было решено использовать *карбид бора* – материал, хорошо выдерживающий экстремальные температурные нагрузки, но дорогой. Сейчас мы совместно с Новосибирским электровакуумным заводом начинаем исследовательскую работу по разработке более дешевой технологии производства этого нужного материала.

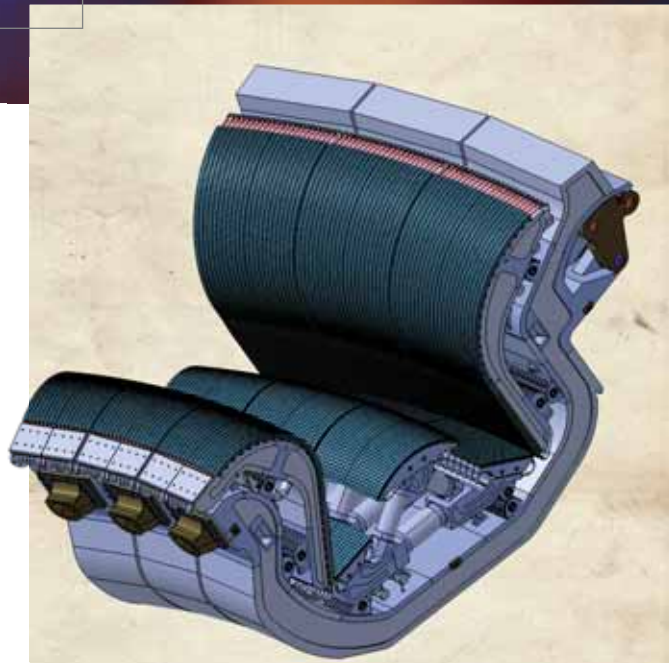
Есть и физические задачи, которые также требуют решения. Основная из них – проблема взаимодействия плазмы с поверхностью. Когда токамак работает в *режиме хорошего удержания*, плазма сходит с поверхности «бублика» в специальное устройство (*дивертор*) порциями, а не сплошным потоком. И каждая такая порция несет разрушительную энергию: тепловая нагрузка на него оказывается больше, чем на внутренние стенки жидкостных ракетных двигателей. Поэтому, если не предпринимать никаких мер, материал конструкции быстро истончится.

Научный сотрудник ИЯФ СО РАН Д. Е. Гавриленко: «Порт-плаги, которые примыкают непосредственно к плазме, не только несут диагностические комплексы, позволяющие судить о ходе термоядерной реакции, но и защищают от потока нейтронов. Поэтому сделаны они из стали, разработанной специально для проекта ITER, – марки 316L(N)-IG. Одна из особенностей этого материала – тщательно контролируемый химический состав, обеспечивающий нужный уровень примесей и легирующих элементов. В ИЯФ создается и самый сложный порт – экваториальный. Пока сделан полномасштабный опытный образец элемента диагностического защитного модуля, другими словами, верхняя крышка. Работа ведется, можно сказать, по методу последовательного приближения: сначала создается макет, а затем по результатам испытаний происходит корректировка проекта вплоть до стадии прототипирования и постановки на производство. Такой регламент очень важен, так как любой инженерный просчет ставит под угрозу весь проект»

ИТЭР – это токамак, т. е. магнитная ловушка закрытого типа, однако ИЯФ является признанным мировым лидером в создании альтернативного варианта – открытых магнитных ловушек. Сейчас в институте работают две подобные установки: ГДЛ (газодинамическая ловушка) и ГОЛ-3 (гофрированная ловушка), а недавно была запущена новая экспериментальная установка СМОЛА. На этих установках наши специалисты занимаются не только собственными исследованиями физики плазмы, но и решают нетривиальные физические задачи для проекта ИТЭР.

Как работает такой научный обмен? Возьмем физику неустойчивостей, в которой мы работаем. Явления подобной природы проявляются одинаково как в закрытых, так и в открытых системах, где есть магнитное удержание плазмы. Например, на токамаках ученые научились бороться с желобковой неустойчивостью, и эти знания мы можем использовать в открытых ловушках.

Но есть вопросы, связанные, к примеру, со взаимодействием плазмы и материала, которые нельзя решить на существующих сегодня токамаках. В частности, на них нельзя достичь параметров плазменных потоков, которые будут контактировать со стенками термоядерного реактора. А вот на открытых ловушках в силу их геометрической конфигурации такие потоки получить можно. Поэтому подобные эксперименты проводятся в ИЯФ, а полученная информация используется в проекте ИТЭР



От самых первых токамаков ИТЭР отличается наличием дивертора – устройства для приема мощного потока плазмы из реактора.  
Credit © ITER Organization

Винтовая секция СМОЛЫ, новой экспериментальной открытой магнитной ловушки для плазмы



Директор ИЯФ СО РАН академик РАН П. В. Логачев и руководитель ФАНО России М. М. Котюков на экспериментальном производстве института



Еще время от времени и по неизвестным причинам происходит так называемый *срыв плазмы*, когда она переходит в неустойчивое состояние и полностью изливается в дивертор. Задача распадается на несколько составляющих: какие предельные нагрузки выдерживает дивертор, как уменьшить поток плазмы и есть ли способ ее переизлучить, как ликвидировать или управлять таким срывом?

Можно смело утверждать, что термоядерная энергетика начнет реально удовлетворять энергетические потребности человечества уже в последней трети текущего века – именно тогда, когда ожидается энергетический дефицит, если учитывать прогнозы по выравниванию энергопотребления среди стран. Время термоядерной энергетике действительно пришло: промышленный термоядерный реактор очень скоро будет необходим всем развитым странам мира.

Что касается ИТЭР, то этот мировой научно-исследовательский проект явился настоящим шагом в неизведанное. К тому же помимо достижения основной цели – освоения «звездной энергии» и перехода на новую термоядерную энергетику – все страны-участницы в процессе реализации проекта получают «бонусом» самые последние научные открытия и новейшие технологии, которые можно использовать здесь и сейчас.

#### ДИРЕКТОР ИЯФ СО РАН, АКАДЕМИК П. В. ЛОГАЧЕВ:

«Новое высокотехнологичное оборудование, которое мы приобрели и оптимизировали для работы над этим проектом, будет использоваться по максимуму: не только для ИТЭР, но и для другого проекта – безнейтронного термоядерного реактора в Калифорнии, в работе над которым ИЯФ также принимает участие. Важно и то, что оборудование и технологии, которые мы используем в работе для ИТЭР, помогут нам создавать установки для самостоятельных фундаментальных исследований, которые проводятся в институте. Таким образом, работая над проектом ИТЭР, ИЯФ СО РАН поддерживает и развивает свои научные школы и компетенции. Благодаря первоклассной команде инженеров, технологов и ученых, которая десятилетиями формировалась в нашем институте, и творческому подходу к решению задач мы получаем отличные результаты»

#### Литература

Кругляков Э. П. Звездные реакторы // НАУКА из первых рук. 2005. Т. 5. № 2. С. 54–61.

Шошин А. А., Анисеев А. В. Ловушка для термояда // НАУКА из первых рук. 2007. Т. 17. № 5. С. 6–19.

Burdakov A. V., Avrorov A. P., Arzhannikov A. V. et al. Recent experiments in GOL-3 Multiple Mirror Trap // The 10th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, August 26–29, 2014, Daejeon, Korea, Abstract Book of OS2014, p.23 (invited talk OS1-04), <http://www.os2014.org/sub0202>

Burdakov A. V., Ivanov A. A., Kruglyakov E. P. et al. Axially symmetric magnetic mirrors: history of development and future prospects. // Abstracts of 9th Intern. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Tsukuba, Japan, 27-31 August 2012, <http://www.prc.tsukuba.ac.jp/OS2012/abstract-download/>.

Kruglyakov E. P., Burdakov A. V., Ivanov A. A. Fusion Prospects of Axisymmetric Magnetic Mirror Systems // Proceedings of 24th IAEA Fusion Energy Conference, San Diego, USA, 8–13 October 2012, OV/P-07.