



Библиотека
Общественного совета
Госкорпорации «Росатом»



А.А. Акатов,
Ю.С. Коряковский

БУДУЩЕЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

АНО «Информационный центр атомной отрасли»

Москва

2012



Библиотечка
Общественного совета
Госкорпорации «Росатом»

УДК 621.039.6

ББК 31.4

А.А. Акатов, Ю.С. Коряковский

Будущее ядерной энергетики. Термоядерные реакторы, М. : АНО «Информационный центр атомной отрасли», 2012. – 20 с.

Человечество потребляет огромное количество энергии, и его потребности только возрастают. Как их удовлетворить в условиях надвигающегося энергетического и экологического кризиса? Как создать достаточно мощный, обеспеченный топливом и безопасный источник энергии?

Один из наиболее многообещающих вариантов – овладение термоядерной энергией, «энергией звезд». Но эта задача оказалась настолько сложной, что к ее окончательному решению ученые и инженеры не смогли подобраться и к настоящему времени. О трудном пути к термояду и о том, почему этот путь так заманчив, наш буклет.



www.osatom.ru

© АНО «Информационный центр атомной отрасли». 2012

© А.А. Акатов, Ю.С. Коряковский. 2012

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Любой ребенок на вопрос, что является источником света и тепла для нашей планеты, ответит: «Солнце». Но откуда берется тепло в самой звезде? Проще говоря, почему Солнце светит и греет? Ответ на этот вопрос было не слишком просто отыскать – хотя бы по той причине, что огромная температура солнечной короны (около полутора миллионов градусов) не позволяет приблизиться к ней ни одному исследовательскому аппарату. Тем не менее, ученые установили: солнечная энергия выделяется в результате ядерных превращений.

Суть в том, что обычные физические взаимодействия и химические реакции не способны дать то колоссальное количество энергии, которое Солнце ежесекундно испускает в пространство; такая энергия может быть высвобождена лишь в процессе ядерной реакции. Однако процессы внутри солнца отличаются от того, что происходит в наших ядерных реакторах: если на АЭС энергию получают в результате цепной реакции деления ядер урана, то в недрах звезд протекает взаимодействие ядер атомов водорода – протонов. А поскольку для этого требуется колоссальная температура, то процесс получил соответствующее название – термоядерная реакция.

Важно, что при термоядерных реакциях выделяется гораздо больше энергии, чем при протекании хорошо

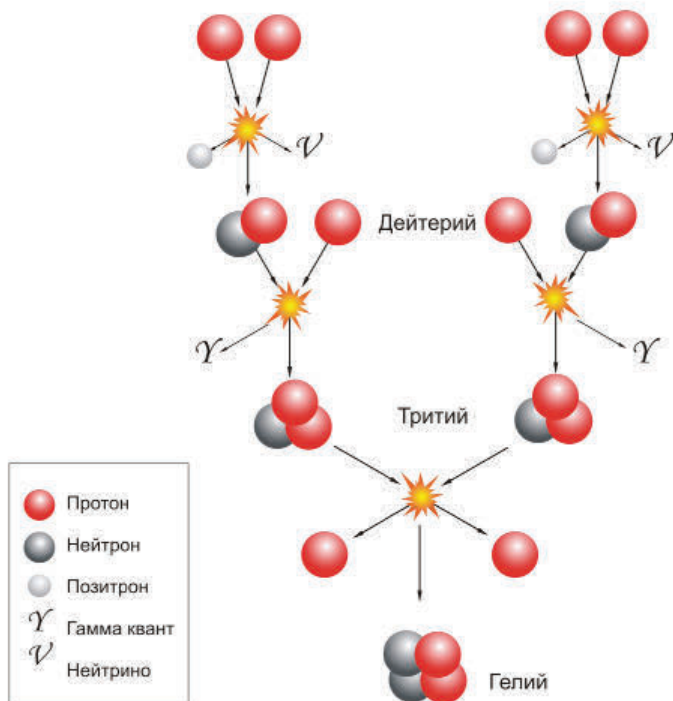
освоенной цепной реакции деления; поэтому неудивительно, что уже многие десятилетия ученые стараются «приручить» этот процесс и добиться того, чтобы искусственное солнце заработало здесь, на Земле. Однако это оказалось очень непростой задачей.

**Солнце – раскаленный
плазменный шар, внутри
которого идет термоядерная
реакция (фото NASA)**



Термоядерной реакцией, или ядерной реакцией синтеза в общем случае называют слияние легких атомных ядер с образованием более тяжелых. Ядра атомов имеют положительный заряд, и при обычных условиях они не могут соединиться из-за действия электростатических сил отталкивания. Но при очень высоких температурах (а в центре Солнца температура достигает пятнадцати миллионов градусов Цельсия!) ядра приобретают такую высокую скорость, что преодолевают эти силы, – тогда и происходит реакция синтеза. В таких условиях вещество находится в состоянии плазмы – смеси из хаотически движущихся электронов и ядер. А поскольку наша звезда состоит в основном из водорода, то в ее ядре идет термоядерная реакция слияния ядер водорода (протонов), часто называемая протон-протонным циклом.

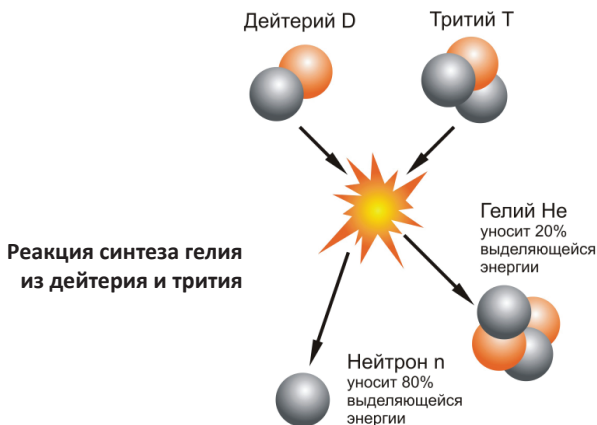
Протон-протонный цикл



Вы можете задать вопрос: а зачем вообще пытаться организовать термоядерный синтез на Земле, тем более, что это очень сложно? Насколько это будет выгодно по сравнению с существующими способами выработки электроэнергии? Расчеты показывают, что для производства одного киловатт-часа энергии затрачиваются доли миллиграмма водорода. В то же время, для выработки киловатт-часа потребуется несколько сотен граммов угля, газа, мазута или дизельного топлива. Даже ядерного топлива, изготовленного из урана, израсходуется на порядок больше. При этом уран приходится извлекать из земных недр, его с каждым годом становится все меньше и меньше, в то время как водород можно получать из воды, то есть с развитием термоядерной энергетики мы получили бы практически неисчерпаемый источник топлива.

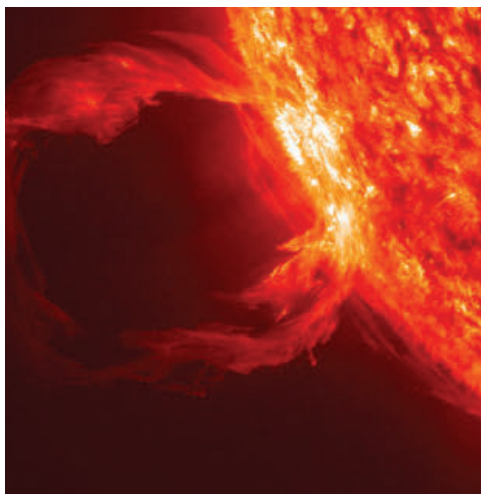
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА: КАК ПОЛУЧИТЬ И УДЕРЖАТЬ?

Температуры, при которых идет термоядерный синтез, вполне достижимы. Устройство, в котором этот процесс реализован, было создано давно и носит название термоядерной (или водородной) бомбы. В нем используется наиболее легко осуществимая реакция: дейтерий (D) и тритий (T) соединяются, в результате чего образуется ядро гелия (${}^4\text{He}$) и нейтрон (n), а также выделяется энергия. Причем при синтезе одного ядра гелия выделяется энергия, в миллионы раз превышающая энергию сгорания одного атома углерода: такова эффективность термоядерного горючего по сравнению с традиционным топливом. Однако в бомбе идет неконтролируемая реакция, которую нельзя использовать для выработки электричества. Чтобы перевести термоядерный синтез на «мирные рельсы», требуется аппарат принципиально иной конструкции.



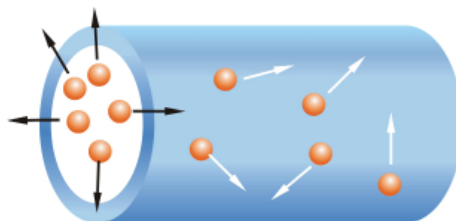
Основная проблема термоядерного синтеза заключается в создании устройства, которое будет способно поддерживать невероятно высокую температуру, требующуюся для протекания процесса (около сотни миллионов градусов Цельсия). Удержать разогретую до таких параметров плазму, не позволить ей вырваться наружу – это проблема куда более сложная, чем запуск цепной реакции деления ядер урана в эксплуатируемых ныне реакторах.

Подсказку к ее решению снова дало Солнце. Существует такое явление, как протуберанцы – струи раскаленной плазмы, которые вырываются из солнечной короны наружу и удерживаются некоторое время магнитным полем. Возникла мысль организовать подобный «трюк» на Земле – создать аппараты, в которых плазма оказалась бы заключенной в магнитную ловушку. В подобных устройствах используется эффект движения заряженных частиц, из которых состоит плазма, вдоль линий магнитного поля – по спирали, что позволяет избежать контакта высокотемпературной плазмы со стенками реактора.

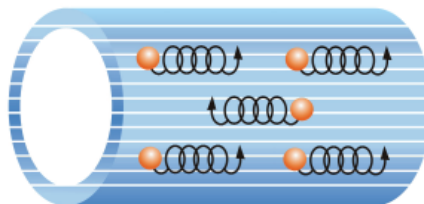


Гигантский протуберанец на Солнце
(фото NASA)

Движение заряженных частиц в отсутствие магнитного поля



Движение заряженных частиц вдоль линий магнитного поля

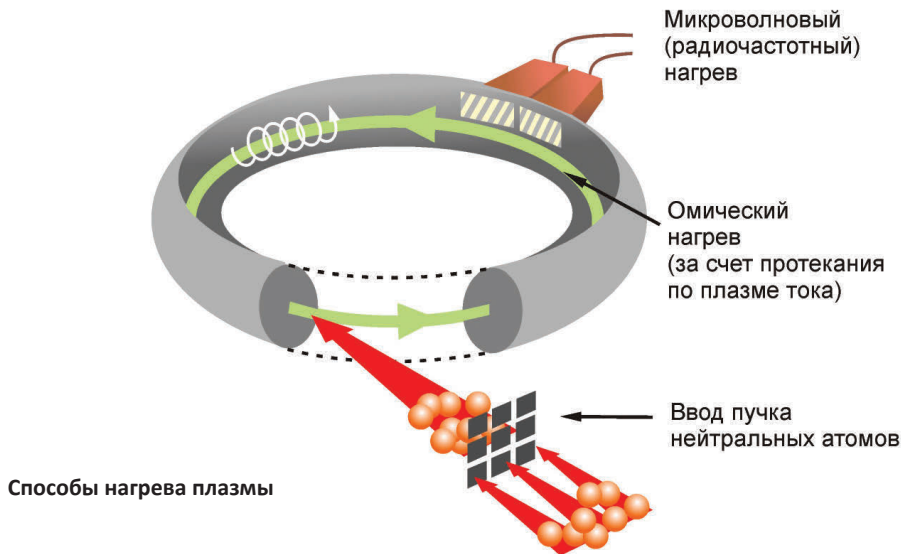


Принцип работы магнитной ловушки

Соответственно, одно из ключевых препятствий – удержание плазмы – можно обойти. Однако требуется еще нагреть смесь дейтерия и трития до нужной температуры. Для этого можно использовать целый ряд способов:

- нагревание плазмы путем пропускания через нее тока в несколько миллионов ампер. Сразу отметим, что этот способ подходит только для первичного разогрева;
- использование специальных аппаратов для ускорения атомов дейтерия и трития: влетая в плазму, они будут сталкиваться с ядрами и передавать им энергию, что приведет к повышению температуры;
- использование устройства, аналогичного микроволновой печи: микроволны разогревают плазму, вдобавок они вызывают в ней протекание тока, что еще больше увеличивает температуру.

После того, как термоядерная реакция, наконец, запустится, плазма сможет подогреть себя сама: образующиеся при термоядерном синтезе ядра гелия обладают очень высокой скоростью, и, сталкиваясь с ядрами дейтерия и трития, они передают им свою энергию – этого оказывается достаточно для поддержания необходимой температуры.



И все же, несмотря на значительные достижения в области термоядерной физики, ни одной группе ученых до сих пор не удалось организовать самоподогрев плазмы. Вдобавок существуют и трудности при подборе конструкционных материалов стенки реактора, которые должны выдерживать мощные потоки нейтронов и нередко случающиеся выбросы плазмы, – это главные проблемы, на решении которых сосредоточены основные усилия ученых и конструкторов.

Вопрос в том, какую выгоду мы рассчитываем получить, устранив все «узкие места»? О том, что термоядерный синтез дает больше энергии по сравнению с цепной реакцией деления, уже упоминалось выше. Но это не единственное преимущество разрабатываемого термоядерного реактора: его другие достоинства связаны с отличными показателями радиационной безопасности, которые намного выше, чем в случае современных ядерных энергоблоков, работающих на уране. Чем это обусловлено?

- Во-первых, плотность плазмы в миллионы раз ниже плотности атмосферы, вследствие чего рабочая среда реактора никогда не будет содержать в себе энергию, достаточную для развития серьезной аварии: при любой неполадке плазма моментально потухнет. Также, благодаря этому фактору, становится принципиально невозможным термоядерный взрыв.

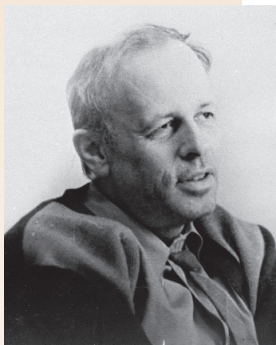
- Во-вторых, в процессе работы термоядерного реактора не образуются делящиеся материалы, из которых можно изготовить ядерное оружие (уран, плутоний).

- В-третьих, не происходит образования долгоживущих радиоактивных отходов. Это выгодно отличает термоядерный реактор от обычного, отходы которого нуждаются в контролируемом хранении в течение довольно длительного времени. Некоторое количество радиоактивных веществ все же будет генерироваться – из-за мощных нейтронных потоков, которые активируют материалы конструкций. Но их можно подобрать таким образом (и в атомной энергетике это уже сделано), чтобы образующиеся радиоактивные вещества быстро распадались. Кроме того, переход с дейтерий-тритиевого топлива на смесь дейтерия и гелия-3, при слиянии которых не выделяются нейтроны, позволит снять эту проблему.

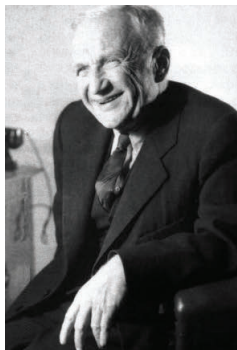
ТОКАМАКИ И СТЕЛЛАРАТОРЫ – БУБЛИКИ «ПРОСТЫЕ» И «МЯТЫЕ»

Теория термоядерных процессов, протекающих в недрах звезд, была разработана еще до начала Второй мировой войны. Однако поначалу ученые весьма скептически относились к идее реализации термоядерного синтеза на Земле, не говоря уже о полезном использовании термоядерной энергии.

Впервые реакция синтеза легких ядер была использована в термоядерном оружии (1953); казалось, что этот процесс можно использовать и в мирных целях. Однако высокотемпературная плазма, без которой реакция идти не может, оказалась слишком сложным объектом для «усмирения».



**Андрей Дмитриевич
Сахаров (1921-1989)**



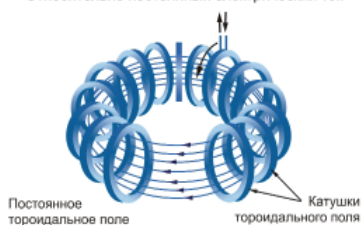
**Игорь Евгеньевич
Тамм (1895-1971)**



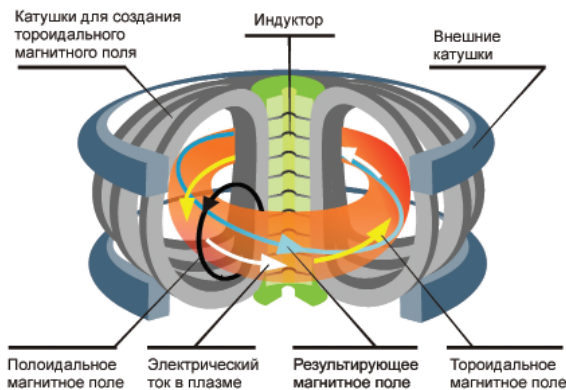
**Леонид Андреевич
Арцимович (1909-1973)**

Заслуга создания аппарата, в котором впервые удалось получить плазму с нужными параметрами, принадлежит советским ученым Сахарову и Тамму (ранее занимавшимся разработкой отечественной термоядерной бомбы). Этот аппарат называется ТОКАМАК – тороидальная камера с магнитными катушками. Плазма в нем удерживается в кольцевой вакуумной камере в форме бублика (тора) специально создаваемым тороидальным магнитным полем. Вдоль силовых линий этого поля движутся заряженные частицы, формирующие плазму. Катушки, намотанные на вакуумную камеру, создают магнитную ловушку, не позволяющую плазме вырваться наружу. Но плазму еще необходимо сжать, нагреть и удержать в равновесии. С этой целью через нее пропускают ток, который не только повышает температуру, но и создает вокруг нее «обхватывающее» (полоидальное) магнитное поле. При постепенном увеличении силы тока в камере возникает вихревое электрическое поле, которое ионизирует (то есть превращает в плазму) термоядерное топливо – газовую смесь дейтерия и трития. Дополнительный нагрев плазмы производится при помощи микроволнового излучения или «впрыска» нейтральных атомов дейтерия или трития.

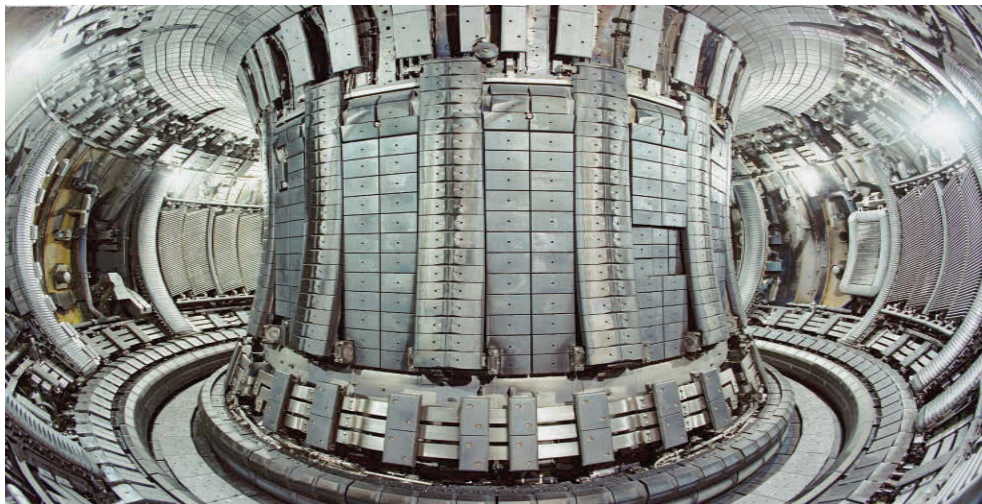
Относительно постоянный электрический ток



Плазма в токамаке



Принцип работы токамака



Камера крупнейшего в мире действующего токамака JET, Англия (фото с сайта jet.efda.org)

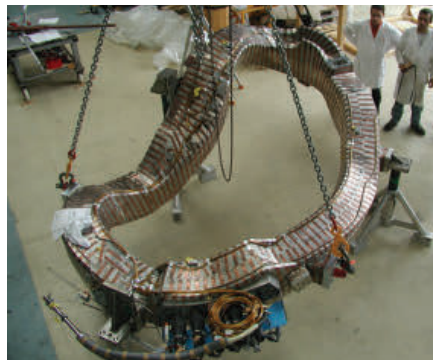
Первый токамак был запущен в Советском Союзе в 1955 году, а в 1968 году на аппарате Т-3 под руководством академика Л.А. Арцимовича плазму удалось разогреть до десяти миллионов градусов – температуры термоядерного синтеза, до этого недостижимой! После этого токамак стал рассматриваться, как ключ к осуществлению управляемой термоядерной реакции: идея была признана настолько удачной, что в 1985 году в Женеве по предложению нашей страны было принято решение о создании Международного экспериментального термоядерного реактора (ITER), основу которого составляет, по сути, большой токамак. Сейчас ITER находится в стадии строительства, местом его расположения выбран город Кадараш во Франции. Россия принимает в этом проекте значительное участие, изготавливая для будущего реактора уникальное высокотехнологичное оборудование.

Позднее был разработан совсем иной тип устройств, в которых так же, как и в токамаках, удалось получить высокотемпературную плазму. Они называются стеллараторами (от латинского *stella* – звезда). Их отличие от токамаков в том, что в стеллараторах плазма удерживается не за счет пропуска через нее тока, а с помощью

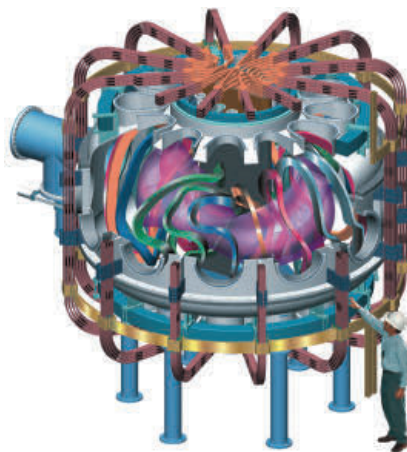
внешних магнитных катушек. Однако камеры и катушки для стеллараторов имеют слишком прихотливую форму, которая находится почти на пределе возможностей современной техники, поэтому их производство гораздо сложнее по сравнению с токамаками.

К сегодняшнему дню существуют разнообразные формы стеллараторов, самые простые шутливо называют «мятыми бубликами», что действительно отвечает их внешнему виду. Следует признать, что стелларатор имеет ряд преимуществ перед токамаком: благодаря его особой форме время стабильного существования плазмы в нем не ограничено, поскольку магнитное поле можно не выключать годами. Срывов плазмы – серьезной проблемы для токамаков – в стеллараторах не существует, поэтому, работая с ними, можно не бояться разрушения стенок камеры. В связи с этим, несмотря на то, что стеллараторы были изобретены позже, они еще могут догнать и перегнать токамаки, став основой для альтернативного варианта термоядерного реактора.

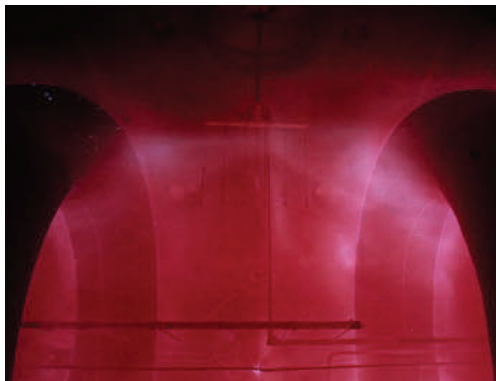
Тем не менее, для производства термоядерной энергии требуется обеспечить постоянный самоподогрев плазмы и ее надежное удержание, а сочетания этих условий пока не удалось достичь ни на токамаках, ни на стеллараторах – эти устройства пока потребляют энергию, но не спешат ее производить.



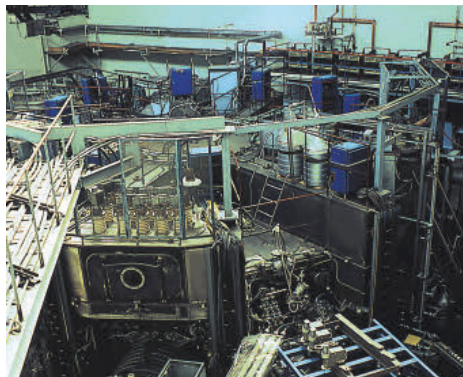
Катушка стелларатора



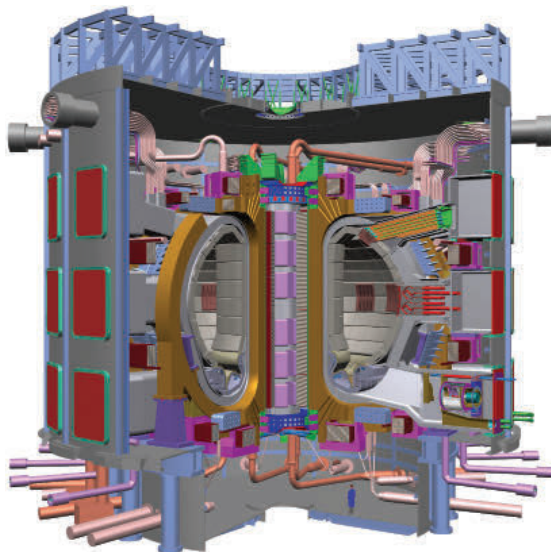
**3D-модель стелларатора
(с сайта Ок-Риджской национальной
лаборатории, США)**



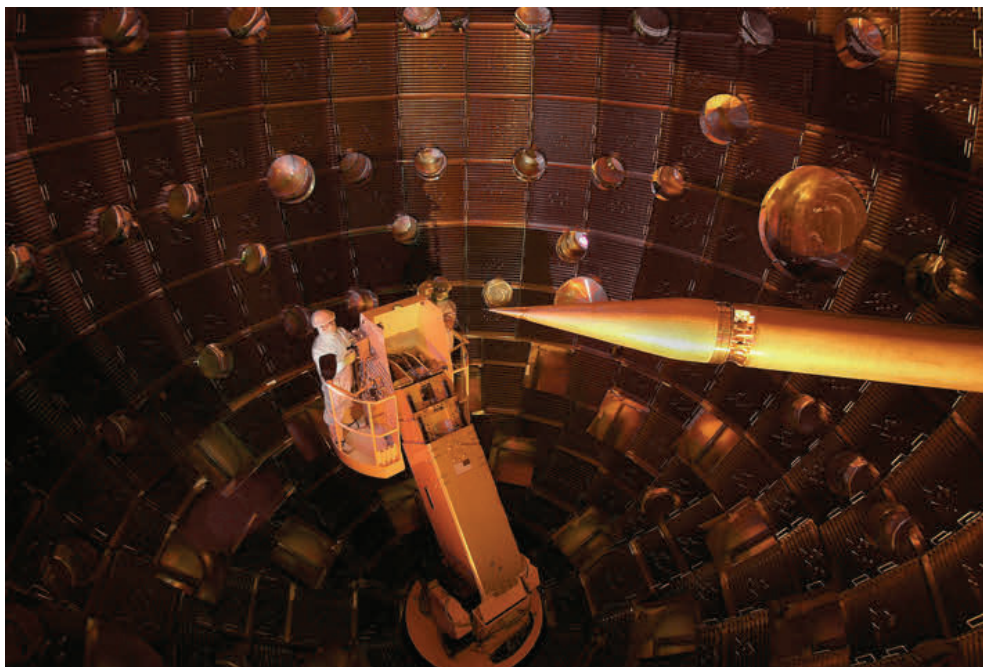
Свечение плазмы внутри токамака



Современный токамак T-15
в «Курчатовском институте», Москва



3D-модель строящегося экспериментального реактора Iter, Франция (с сайта iter.org)



**Мишенная камера, где будут происходить «микровзрывы», крупнейшего в мире лазера NIF.
Справа – держатель для заряда
(с сайта Ливерморской национальной лаборатории им. Э. Лоуренса, США)**

Есть еще и третий возможный вариант получения управляемой термоядерной реакции, и заключается он в создании термоядерных «микровзрывов» в особо прочной камере (так называемая технология инерционного термоядерного синтеза). Однако по ряду причин его нельзя назвать особо перспективным: ведь для работы такой установки нужны мощнейшие лазеры, пучки которых будут направлены на мишень из дейтерия и трития, охлажденных до 10 кельвинов, температуры, близкой к абсолютному нулю. Для получения необходимой мощности реактора эти лазеры придется включать несколько раз в секунду, ну а пока они дают по одному импульсу в несколько часов и потребляют огромное количество энергии.

КОГДА ДАСТ ТОК ПЕРВАЯ ТЕРМОЯДЕРНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ?



Внешний вид площадки
Iter (3D-моделирование).

Реактор разместится
в оранжевом здании,
остальные здания – вспомо-
гательные

Завершение строительства Iter – эксперименталь-
ного термоядерного реактора на основе токамака
– намечено на 2019 год. После этого ученые приступят
к экспериментам, направленным на изучение поведе-
ния высокотемпературной плазмы в различных режи-
мах. Дейтерий и тритий на начальном этапе вообще не
предполагается использовать. Плазма будет получена
из обычного изотопа водорода (H), иными словами, сна-
чала исследования будут проводиться без запуска тер-
моядерной реакции, чтобы не портить конструкцион-
ные материалы нейтронными потоками. Лишь в 2026
году планируется впервые запустить термоядерный

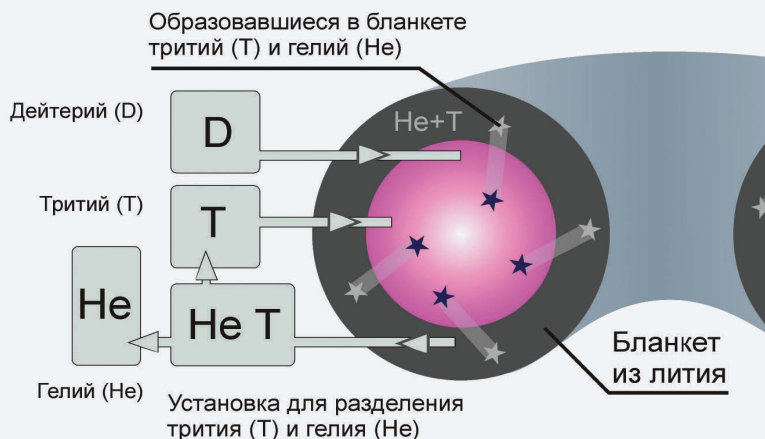


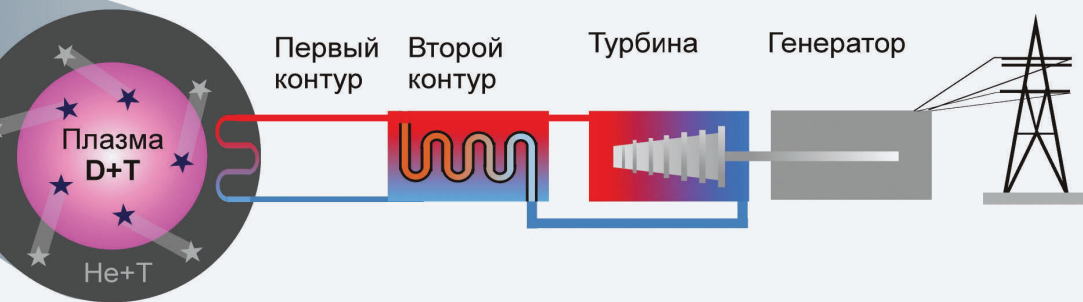
Схема производства электроэнергии с помощью термоядер-
ного реактора: внутри камеры токамака в дейтерий-трети-
евой плазме идет реакция синтеза с образованием гелия и
выделением нейтронов. Нейтроны уносят 80% энергии, вы-

синтез. А пока на Iter будут испытывать плазму, на специальном стенде в Японии параллельно будут проводить эксперименты, направленные на изучение стойкости различных материалов к мощному облучению нейтронами.

При условии успешного окончания исследовательской работы реактор даст первый ток в 2037 году. К этому времени предполагается накопить достаточный опыт для создания следующих поколений реакторов.

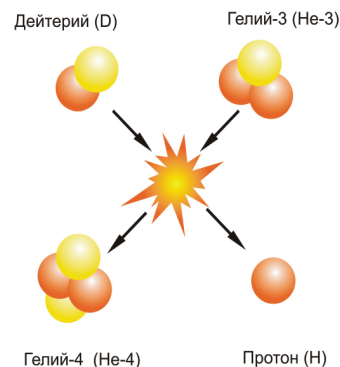
Как бы там ни было, запуска первой в истории термоядерной электростанции ждать придется долго – по самым оптимистичным оценкам, до 50-х годов. В соответствии же с более осторожными сценариями, начало коммерчески выгодного использования термоядерной энергии будет отнесено на последние десятилетия XXI века.

В перспективе термоядерные реакторы не будут работать на дейтерий-тритиевой смеси. Чтобы избавиться от нейтронов, активирующих и снижающих прочность стенки реактора, тритий уберут из смеси, заменив его на гелий-3. Правда, возникает очередная «небольшая» проблема: реакция с гелием-3 потребует достичь миллиардных температур в плазме. Пока это находится за гранью возможного, но существует определенная уверенность в том, что спустя полвека развитие технологий позволит получить и такие температуры.



деляющейся в ходе реакции, и попадают в бланкет, в составе которого есть литий. При этом под действием нейтронов бланкет нагревается за счет передачи ему энергии нейтронов, а литий превращается в тритий, необходимый для поддержания термоядерной реакции, и гелий. Тепло бланкета передается теплоносителю первого контура (газу или жидкому металлу), который, в свою очередь, передает его теплоносителю второго контура – воде. Вода испаряется, пар вращает турбину, генератор вырабатывает электричество.

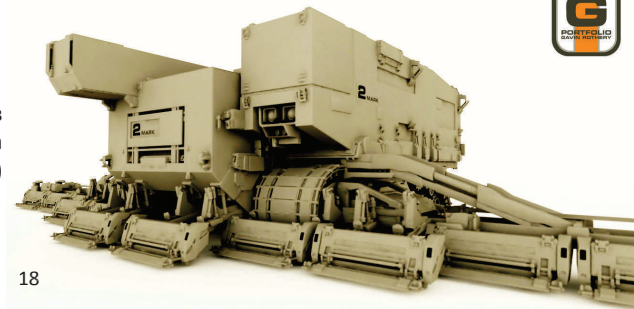
Другая проблема, связанная с тем же гелием-3 – трудность его получения. Несмотря на то, что его достаточно много, этот изотоп слишком рассеян, поэтому на сегодняшний день гелий-3 добывают из земной атмосферы в очень небольших количествах – всего по несколько десятков граммов в год. Существует альтернативная возможность: гелий-3 входит в состав солнечного ветра, поэтому он может накапливаться на поверхности планет и спутников, не имеющих атмосферы. В лунном грунте (реголите) гелий-3 постепенно накапливался в течение миллиардов лет, в результате чего содержание гелия-3 в тонне лунного грунта возросло до 0,01 г, а это, в свою очередь, означает, что на Луне можно добыть до 500 тысяч тонн этого изотопа (в атмосфере Земли – всего лишь около 35 тысяч тонн); максимальные оценки дают до 10 миллионов тонн. Фантастичность проекта заключается в том, что для получения одной тонны гелия-3 необходимо переработать 100 миллионов тонн лунного грунта. Например, участок лунной поверхности площадью 20 км² придется «прокопать» на глубину 3 м, то есть пока бессмысленно учитывать в расчетах «лунный» гелий. Поэтому в ожидании тех времен, когда добыча полезных ископаемых на Луне станет реальностью, ученые разработали сравнительно дешевый способ производства гелия-3 из лития-6, который широко распространен в природе, в реакторах АЭС.



Протон - оранжевый, нейтрон - желтый.

Реакция дейтерия и гелия-3

Машина для добычи гелия-3 из
фильма «Луна 2112» (с сайта
gavinrothery.com)



На сегодняшний день термоядерная энергетика является предметом ожесточенных споров. Позиции противников ее развития, в принципе, можно понять: ведь с момента получения высокотемпературной плазмы на первом токамаке прошло уже несколько десятков лет, а существенных прорывов с тех пор так и не случилось. Дело движется очень медленно, и перспективы туманны, поскольку никто не может гарантировать со стопроцентной уверенностью, что все проблемы будут решены.

Но следует помнить, что в данном случае борьба идет не только за строительство экономически эффективной электростанции с термоядерным реактором. Помимо этого, проект подразумевает обширный объем фундаментальных исследований, направленных на изучение высокотемпературной плазмы и процессов синтеза легких ядер. Развивая эту ветвь, ученые, по сути, углубляют и расширяют знания о законах природы, и эти знания непременно пригодятся в будущем. Достаточно вспомнить, что исследования явления радиоактивности в начале XX века тоже представляли собой «чистую» науку, почти не имевшую практического приложения. Сегодня нет такой отрасли науки и промышленности, в которой не использовались бы радиоактивные вещества или радиация. Поэтому можно быть почти полностью уверенным: в том или ином виде решение проблемы управляемой термоядерной реакции будет найдено.

Интернет - ссылки

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»	www.rosatom.ru
Сайт международного проекта Iter	www.iter.org
Российский «Проектный центр ИТЭР»	www.iterfr.ru
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» - мировой центр исследований на токамаках, токамаки Т-10 и Т-15	www.kiae.ru
Государственный научный центр Российской Федерации - Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ), участник российско-итальянского проекта по созданию термоядерного реактора «Игнитор»	www.triniti.ru
Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе Российской Академии Наук, сферический токамак «Глобус-М»	www.ioffe.ru
Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ) – изучение инерционного термоядерного синтеза, установка «ИСКРА-6»	www.vniief.ru
Сайт крупнейшего в мире действующего токамака JET	www.jet.efda.org
Сайт крупнейшего в мире действующего стелларатора LHD	www.lhd.nifs.ac.jp
Сайт NIF – крупнейшего лазера для запуска инерционного синтеза	lasers.llnl.gov