

Тор, который принесет энергию

В книге «Фантастика и футурология» Станислав Лем сетует на то, что футурологи, занимаясь своими изысканиями, не имеют парадигмы, не имеют теории и поэтому эффективность их деятельности низка. Физик сказал бы: естественно — они изучают общество, не зная его законов и даже не пытаясь их найти. Найти эти законы в общем случае труднее, чем физические, — мало образцов и невозможен эксперимент. Один из методов, применимых в такой ситуации, — отправиться за законами к соседям. Биолог много полезного находит в закромах у химика, тот — у физика. Попробуем пойти по этому пути и мы.

Человек не потребляет энергию саму по себе. Однако она нужна ему для обогрева и охлаждения, для изготовления еды и питья (во многих регионах вода — просто чистая вода — уже является проблемой), для изготовления множества нужных ему (полезных, бесполезных и вредных) вещей. Не исключено, что когда-нибудь люди поумнеют и сократят производство бесполезного и вредного. Можно утешать себя и тем, что много не съешь и не выпьешь, но человек потребляет энергию «ради развлечения», когда отдыхает. Маркс сказал, что главное достояние человечества — свободное время. По мере прогресса доля этого свободного времени растет и растет связанное с этим потребление энергии. Человек путешествует, сотрясает воздух звуками, услаждает взор домашними кинотеатрами, городит фонтаны, иллюминации и т. п. и т. д. Человек тратит энергию.

Откуда дровишки?

Источники энергии на Земле известны, об этом пишут все. Рассуждают о том, на сколько лет хватит нефти и сколько будет стоить киловатт-час при возврате к углю. Прогнозами эти рассуждения назвать нельзя: футурологический прогноз — это ответ на вопрос, как будут жить люди. Перейдут на энергосберегающие технологии, поставят в окна тройные стеклопакеты, сделают гибридный автомобиль с уменьшенным в несколько раз потреблением бензина? Или будут сидеть в подземельях, общаться по Сети, видеть мир на экране монитора, есть хлореллу? На дефицит энергии можно реагировать по-разному.

В любом случае считать каждый киловатт не хочется, да и есть в этом что-то унижающее для человечества: имея мозги, образование и высокие технологии, зависеть от нескольких десятков человек, диктующих политику ОПЕК. Одно из главных достижений капитализма — это антимонопольное законодательство. К сожалению, оно есть не во всех странах, и главное — его нет во «всемирном масштабе». Вдобавок половину бюджета мирового терроризма обеспечивает нефть (вторую половину — наркотики). Если выдернуть из вены цивилизации

нефтяную иглу, многое, очень многое может измениться к лучшему.

Но откуда брать тогда энергию? Недостатки и ограничения атомной энергетики и «возобновляемых источников» известны. Иногда эти источники настолько просты и, кажется, близки... вот он, под ногами, неисчерпаемый источник энергии — глубины Земли. Вот второй — висит над головой, Солнце. «Много ли человеку земли надо?» — вопрошает классик. И физик немедленно отвечает — один квадратный метр. На него бесплатно падает сверху, через него бесплатно прет снизу энергия, потребляемая в среднем одним человеком. Но поди ж возьми ее... Так что все эти методы развиваются и совершенствуются, и не будь у человечества других возможностей, может, и заменили бы нефтяные скважины гидротермальными, а угольные шахты ветряками. Но пока как решение энергетической проблемы в целом актуально другое направление.

Отец, слышишь, рубит, а я отвожу

Маленькое отступление. Газеты и журналы много пишут о так называемой водородной энергетике. Что это такое? Это способ распределения энергии, доставки ее от места извлечения из

природного резервуара до места потребления. Поэтому «водородная энергетика» — не альтернатива ни нефти, ни углю, ни атому, ни ветряку... Это — почта, которая возит джоули. Разумеется, почта — дело важное, но еще важнее, сравнивая энергетические схемы, выбирая метод добычи-доставки-потребления, принимать во внимание сочетаемость метода добычи и метода доставки, рассматривать всю цепочку. Нефть хороша, в частности, тем, что из добытого (нефть) относительно легко получить возимое (бензин), а его относительно удобно потреблять в автомобиле. Электричество потреблять было бы еще удобнее, но его трудно возить. Зато удобно передавать по проводам. И так далее... Строя энергетические схемы, надо учитывать потери при каждом преобразовании и соображения экологии и безопасности.

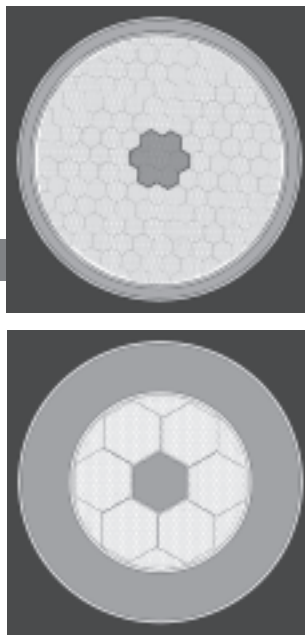
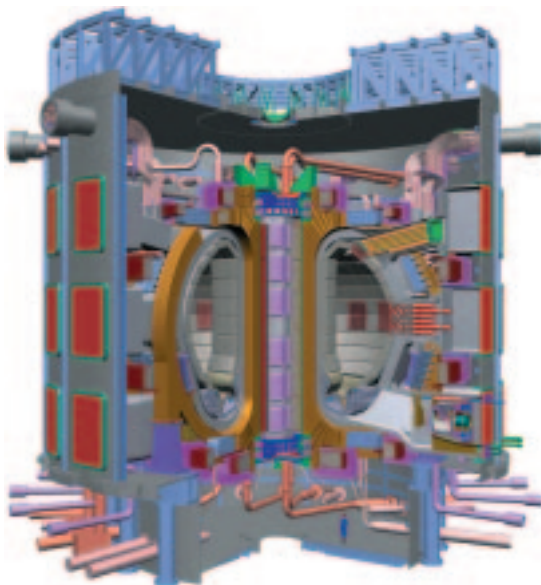
Но вместо того чтобы учесть эти соображения, люди, как правило, просто сотый раз излагают в пустоту свои доводы. Потому что большинство слушателей ничего не понимает в вопросе, а только ахает, те же, кто понимают, — излагают свое. А как было бы хорошо обязать крикунов сделать расчет и представить его. Ведь и соображения экологии, и безопасности можно выразить в деньгах (то есть в работе общества), которые нужны для уменьшения вреда и опасности до некоторого уровня. Что приведет к удорожанию энергии до соответствующей цифры. И вопрос решится. Но мы сейчас — не о почте, а об источнике.

Атомную энергию, что в реакторе, что в бомбе, человек получает, разделяя ядра тяжелых элементов на более легкие. Однако мир устроен так, что энергия, приходящая на нуклон, максимальна для железа (в учебниках это так и называется — железный максимум). А раз максимум посередине, то энергия будет выделяться не только при распаде тяжелых, но и соединении легких элементов. Этот процесс называется термоядерным синтезом, именно он идет в водородной бомбе и термоядерном реакторе. Пока не существующем.

Термоядерных реакций, реакций синтеза, известно много. Источником



Токамак: общий вид и сечение проводов



энергии могут быть те, для которых есть недорогое топливо. Причем возможны два принципиально разных пути запуска реакции синтеза. Кратко опишем оба, сравним их и займемся тем, который «выбрала жизнь».

Маленький быстрый или большой медленный

Первый путь — «взрывной»: некоторая энергия тратится на приведение очень небольшого количества вещества в необходимое исходное состояние, происходит реакция синтеза, выделившаяся энергия преобразуется в удобную форму. Собственно, это будет водородная бомба, только весом в миллиграмм. В качестве источника исходной энергии использовать атомную бомбу нельзя — она не бывает «маленькой». Поэтому предполагалось, что миллиметровая таблетка из дейтерий-тритиевого льда (или стеклянная сфера со сжатой смесью дейтерия и трития) будет облучаться со всех сторон лазерными импульсами. Плотность энергии на поверхности должна быть при этом достаточно высокой. А достаточно высокая — это такая, при которой давление внешнего слоя на внутреннюю часть таблетки запускает реакцию синтеза. Кроме

того, импульс должен быть настолько коротким, чтобы вещество, превратившееся за наносекунду в плазму с температурой в десять миллионов градусов, не успевало бы разлететься, а давило бы на внутреннюю часть таблетки. Внутренняя часть сжимается до плотности, в сто раз большей, чем плотность твердых тел, и нагревается до ста миллионов градусов. Для реакции синтеза — самое оно.

Второй путь. Исходные вещества можно нагреть относительно медленно, они превратятся в плазму, а потом в нее можно любым способом вводить энергию, вплоть до достижения условий начала реакции. Для протекания термоядерной реакции на смеси дейтерия с тритием и получения положительного выхода энергии (когда энергия, выделившаяся в результате реакции, будет больше энергии, затраченной на ее осуществление) необходимо создать плазму с плотностью 10^{14} частиц/см³ (10^{-5} атм.), нагреть примерно до 100 млн. градусов (чтобы ядра могли сблизиться, несмотря на кулоновское отталкивание) и поддерживать это состояние не менее секунды (критерий Лоусона). В этом втором способе главная проблема — устойчивость плазмы. За секунду она много раз успеет расширяться, коснуться стенок камеры и охладиться.

По ситуации на сегодня плазма выиграла четвертьфинал у лазера — международное сообщество приступает к строительству демонстрационного реактора. Этот реактор не будет настоящим источником энергии, но он спроектирован так, что после него — если

все нормально заработает — можно приступить к строительству «энергетических», то есть предназначенных для включения в энергосеть, термоядерных реакторов. Тогда в полуфинале будет один участник. Странная ситуация, скажи бы любители спорта. Но, кажется, неизбежная, и вот почему: самые крупные физические проекты (ускорители, радиотелескопы, космические проекты) становятся такими дорогими, что двое игроков оказываются не по карману даже объединившему свои усилия человечеству. Кстати — такое изменение политико-технической идеологии (коряво, а как иначе сказать?), наверное, тоже важно для прогнозирования будущего.

Какое-то время казалось, что у обоих направлений есть шансы. Почему победила плазма? Научные и технические проблемы имелись в избытке и на том направлении, и на другом. Но лазерное требовало хорошего взаимодействия специалистов из множества несвязанных областей. И на лазерном же направлении было менее эффективно международное взаимодействие, потому что... как бы это помягче сказать... сверхмощные лазеры некоторое время рассматривались как возможное оружие. Причем те, кто занимался лазерами по обе стороны океана, не очень-то спешили рассеять радужные надежды генералов и политиков. Деньги на исследования надо ведь где-то брать, не правда ли? Но вернемся к реактору.

Странный трансформатор

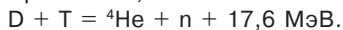
Победителя четвертьфинала зовут токамак. Из всех сайтов в интернете, на которых он упоминается, на 15% можно найти его имя, написанное ошибочно. Чтобы больше не ошибались, поясним, что токамак — это ТОроидальная КАмера МАГнитная, но «родители», давая имя, заменили Г на К, чтобы не возникало ассоциаций с чем-либо «магическим». Такие были времена. Теперь иногда пишут, что имелись в виду «МАГнитные Катушки». История часто переписывается.

О истории проекта рассказывать не будем — просто потому, что об этом

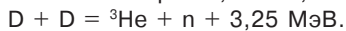
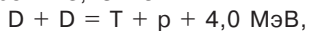
уже написано достаточно много. Устройство выглядит так: тороидальная камера надета на сердечник трансформатора, плазма в камере является, по сути дела, обмоткой трансформатора. Вторая обмотка — это обычная обмотка того же трансформатора. Из камеры откачивают атмосферу, потом в нее напускают смесь газов, содержащих те атомы, которые будут участвовать в синтезе. Затем по первичной обмотке трансформатора пропускают импульс тока, такой, чтобы во вторичной «обмотке» — то есть в газе — произошел пробой и началось протекание тока. При протекании тока плазма нагревается, но одним этим методом не удастся нагреть ее выше 20 млн. градусов (с ростом температуры сопротивление плазмы и выделение тепла уменьшаются). Ток, который протекает по плазме, создает свое магнитное поле, оно сжимает плазму, увеличивая ее температуру и концентрацию. Но этого еще недостаточно для достижения критерия Лоусона, поэтому плазму нагревают дополнительно. Это можно делать электромагнитным излучением с частотой от 10 Мгц до 10 Ггц, потоком нейтральных атомов с высокой энергией — около 0,1 МэВ или сжатием внешним переменным магнитным полем.

Еще раз о дровах

Легче всего происходит слияние ядер изотопов водорода — дейтерия D и трития T. Ядро дейтерия содержит один протон и один нейтрон. Дейтерий есть в воде — примерно один атом на 6500 атомов водорода. Ядро трития состоит из протона и двух нейтронов. При синтезе ядер дейтерия и трития образуются гелий He с атомной массой, равной четырем, нейтрон n, и выделяется энергия — 17,6 МэВ:

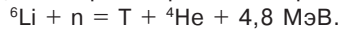


Другой вариант — слияние двух ядер дейтерия. Оно происходит по двум каналам примерно с одинаковой вероятностью: в первом образуются тритий, протон p и выделяется 4 МэВ, во втором — гелий с атомной массой 3, нейтрон и 3,25 МэВ:



Скорость реакции D + T в сотни раз выше, чем для реакции D + D. Поэтому, используя реакцию D + T, значительно легче достичь условий, когда выделившаяся термоядерная энергия превзойдет затраты на организацию процессов слияния. Возможны и реакции синтеза с участием других элементов — лития, бора и др. Однако эти реакции протекают с нужной скоростью при таких температурах, которые мы даже не будем называть, чтобы не пугать читателей.

Как сказано выше, тритий нестабилен (период полураспада 12,4 года), но его предполагается получать на месте, из изотопа лития и получающихся в реакторе же нейтронов:



Одновременно этот же литий (система, его содержащая, называется бланкетом) нагревается и может служить теплоносителем в первом, радиоактивном контуре. Далее он передает тепло второму контуру, в котором водичка испаряется, далее как обычно — турбина, генератор, провода, ласковый свет настольной лампы, и читатель с химией и всей этой жизнью в руках.

Лед и пламень

Проблема заключается в том, что слиянию ядер препятствуют электрические силы расталкивания. Поэтому для синтеза необходимо преодолеть кулоновский барьер, то есть совершить работу против сил расталкивания, собрав ядрам необходимую энергию. Существуют три возможности. Первая — разогнать в ускорителе пучок ионов и бомбардировать ими твердую мишень. Этот путь неэффективен — энергия расходуется на ионизацию атомов мишени, а не на сближение ядер. Второй путь — направить навстречу друг другу два ускоренных пучка ионов. Этот путь неэффективен из-за низкой концентрации ядер в пучках и малого времени их взаимодействия. Другой путь, по которому и направились физики, покудив у очередного камня с полустертой надписью: «На лево пойдешь... направо пойдешь...», — нагрев вещества до высоких температур (порядка 100 млн. градусов). Чем выше температура, тем выше средняя кинетическая энергия частиц и тем большее их количество может преодолеть кулоновский барьер.

Плазма живет в магнитном поле. Постоянное поле можно было бы создать постоянным магнитом, хотя здесь есть ограничения. Но в данном случае вопрос о постоянном магните не возникает, потому что поля нужны переменные. Значит — электромагнит. В нем есть обмотка, у обмотки есть сопротивление, а при протекании по ней тока выделяется тепло. Когда это происходит в плазме, тепло идет в дело, а в обмотке — все наоборот. И тепло надо отводить (сгоревшая изоляция неэкологична...), и энергию на пропихивание тока по обмоткам приходится тратить. Причем с токамаком ситуация такова, что на работу электромагнитов тратилась бы заметная доля полученной энергии. Обидно, Вань! Причем эта ситуация в новой энергетике возникает не первый раз.

Когда собирались делать магнитогиродинамический генератор, тоже возникла проблема питания магнита. Решение известно: сверхпроводимость. Осталась мелочь — воплотить в металл. Но... Приведем один частный пример.

К вопросу о проводах

«В качестве прототипа конструкции провода S-12 использован композит Sn-P. В сверхпроводнике S-12 семь многоволоконных модулей с периферийным источником олова размещены в танталовом диффузионном барьере с внешней стабилизирующей медью. Волокна сверхпроводящего провода S-12 содержали 2 ат. % титана, введенного в них усовершенствованным методом «искусственного легирования». Термическая обработка провода S-12 с целью формирования соединения Nb_3Sn проводилась в вакууме по многоступенчатому режиму. Поперечное сечение провода S-12 после окончательной термической обработки представлено на рисунке... В результате различных улучшений, реализованных в конструкции сверхпроводника S-12, по сравнению с проводом Sn-P, была получена высокая плотность критического тока... Повышение токонесущей способности объясняется формированием особо мелкозернистой структуры слоев соединения Nb_3Sn в сверхпроводнике S-12 с размером зерен порядка 50–60 нм.

В обмотках пологого поля магнитной системы ITER предполагается использовать «кабели в кондуите» крупного сечения, выполненные с применением NbTi сверхпроводников. Они выполняются из многостадийно ствистированных сверхпроводящих стрендов, помещенных в кондуит из нержавеющей стали... Из высокочистых гомогенных NbTi сплавов с применением режимов выдавливания при низких температурах и скорости изготовлены образцы проводов с диаметром волока 10 мкм... В процессе данной работы должны быть опробованы различные конструкции проводов диаметром 0,75 мм с диаметром волокон 6–7 мкм, в том числе и с низким коэффициентом заполнения по NbTi сплаву — менее 20 %, а с целью уменьшения уровня потерь в конструкцию провода вводятся резистивные барьеры из медноникелевых сплавов. Для уменьшения потерь на спаривание стрендов в кондуите отрабатывается технология нанесения на поверхность стрендов никелевого покрытия...».

Этот отрывок из одной статьи «про провода» приведен здесь не для того, чтобы вас напугать. А чтобы показать — в узенькую-узенькую щелочку — нутро вопроса. Ведь за каждым словом в этом отрывке — не маленькая работа. Каж-



дый названный элемент, каждый размер, каждое время обработки, температуру, скорость волочения — все надо выбрать из десятков вариантов. Что будет, если десять умножить на десять и еще несколько раз на десять?..

Любой крупный технический проект собирает в себе — и не в кучу, а в систему — тысячи и миллионы научных и инженерных задач. Если вам хоть немного известно об этом, то вы можете представить себе ту пирамиду решений, вершиной которой Человек однажды дотянулся до Луны... И которой он завтра дотянется до новой энергии. Изобретательное мы все-таки животное.

Чисто не там, где метут, а там, где не сорят

Разумеется, это демагогия. Стационарное количество грязи зависит от соотношения скоростей данных процессов. Но при ограниченной скорости подметания — а она всегда ограничена — действительно имеет смысл уменьшить скорость загрязнения. Для токамака чистота плазмы — вопрос ее, плазмы, жизни и смерти: примеси прекращают реакцию горения. Попадают они в плазму со стенок тора (запускаемые в объем рабочей камеры можно очистить). А стенка камеры работает в таких хороших условиях, что проблема ее изготовления получила собственное имя: «проблема первой стенки». Ибо все, что лезет из плазмы — нейтроны, протоны, ионы и излучение от инфракрасного до гамма-излучения, — все достается ей. В результате стенка разрушается, то есть просто перестает существовать, а по ходу дела все продукты разрушения попадают в плазму. Решения проблем стойкости и «невредности» находятся, увы, в противоположных направлениях. Ибо чем тяжелее ион, тем он вреднее (допустимые концентрации тантала и вольфрама в сто раз меньше, чем углерода), а большинство стойких материалов создано именно на основе тяжелых металлов. Одно время большие надежды возлагались на углеродные материалы и композиты

на основе карбидов, боридов и нитридов. Рассматривались пористые и профилированные (с ребрами или иглами) стенки. И вообще, трудно сказать, что не рассматривалось, но в итоге сейчас выбран бериллий.

Зеленые и спекуляции

Не поймите меня неправильно, союз «и» не означает знака равенства. Но большинство разговоров об экологии, опасности, безопасности и т. д. ведут люди, которые в сути дела не понимают ничего и мешают понимать другим. Зато на страхе делаются и большие деньги, и политические карьеры. Сколько крика стоит о клонировании — а многие ли из кричавших знают, что это такое? Сколько крика было о ввозе радиоактивных отходов — многие ли взяли и посчитали на бумажке плюсы и минусы? Чтобы не оказаться в этой толпе, технически трезво оценим вредность и опасность токамака.

Вредность как таковая у токамака отсутствует — так же, как и у атомного реактора. Никаких вредных веществ — ни химических, ни радиоактивных — он не выделяет. Заметим попутно, что разговоры о безумной вредности станций на угле и другом органическом топливе требуют уточнения. Если говорить о существующих — да, их выбросы вредны. Но в принципе очистить отходящие газы можно, хотя это увеличит стоимость энергии. Вот это и должно обсуждаться — сколько мы готовы платить и за что именно? В идеале политика, который выходит на трибуну без калькулятора, надо отправлять обратно, за парту.

Теперь насчет опасности. Вся историю токамака главной его физической (не технической) проблемой была устойчивость — плазменный шнур изгибался и расширялся. Подбором конфигурации магнитного поля устойчивость плазмы удалось увеличить настолько, что стала возможной техническая реализация. Но что произойдет, если все-таки реактор разрушится?

Ответ таков: если говорить о последствиях аварии с разрушением, токамак существенно менее опасен, чем

атомный реактор, и не намного более опасен, чем станция на угле. Во-первых, атомный реактор содержит в себе запас горючего на годы нормальной работы. Это большой плюс для подводной лодки и космического полета, да и рельсы меньше истираются — не надо топливо возить. Но это же создает принципиальную возможность крупной аварии. А в токамаке запаса нет. Во-вторых, поскольку при реакции синтеза выделяется больше энергии, то при сравнимой мощности сами количества веществ будут меньше — плазма в токамаке «весит» меньше ста граммов, а сколько весит активная зона реактора? И наконец, тритий имеет маленький период полураспада и сам по себе не ядовит. С тем, что булькает в атомном реакторе, можно не сравнивать.

В инженерном проекте ИТЭР приведен анализ аварийных ситуаций с оценкой возможных выбросов радиоактивности. Максимально возможный выброс не превосходит 50 г по тритию, 25 г по продуктам коррозии и 40–100 г по пыли, образующейся в плазменной камере. При аварии суммарные дозы облучения на границе площадки станции оказываются в 2–10 раз ниже допустимой для населения дозы, так что даже эвакуации не потребуются.

В заключение процитируем постановление Правительства РФ от 21 августа 2001 г. N 604 «Об утверждении федеральной целевой программы «Международный термоядерный реактор ИТЭР». Итак, «Российская Федерация не выходила с предложением о размещении строительства реактора ИТЭР на своей территории, поэтому какое-либо его влияние на состояние окружающей среды в нашей стране полностью исключено». Интересно — это у них такая психология или это просто популизм?

