

ТЕРМОЯД: СКВОЗЬ ТЕРНИИ

Р. СВОРЕНЬ, специальный корреспондент журнала «Наука и жизнь».

ПРЕОДОЛЕВАЯ НЕМАЛЫЕ ТРУДНОСТИ, ЧЕЛОВЕЧЕСТВО ВСЕ ЖЕ ПРОДВИГАЕТСЯ К САМЫМ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫМ И БЕЗОПАСНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ УСТАНОВКАМ, ДЛЯ КОТОРЫХ К ТОМУ ЖЕ ЗЕМНЫЕ ЗАПАСЫ ТОПЛИВА БЕЗГРАНИЧНЫ

Собравшись в Москве в июне этого года, физики, инженеры, руководители промышленности и политические деятели Европейского союза, Японии, России, Канады, Казахстана, США и ряда других стран отметили знаменательное событие, которое наверняка войдет в историю не только научного, но и общечеловеческого прогресса. После более чем девяти лет совместной работы многих крупных исследовательских и промышленных центров создан технический проект первого в мире экспериментального термоядерного реактора. Проектирование осуществляется в рамках международной программы «Технический проект ИТЭР». (ITER — International Termonuclear Experimental Reactor — Международный Экспериментальный Термоядерный Реактор). Кстати, слово *iter* в переводе с латыни означает шаг. В данном случае шаг на пути к звездной энергии. Аббревиатура ИТЭР уже стала именем как самого про-

екта, так и будущего реактора. Собравшись на «Дни ИТЭР» в Москве, участники встречи обсудили не только заверченный ими проект и результаты испытаний изготовленных промышленностью основных экспериментальных узлов будущего реактора. В кулуарах встречи обсуждались и конкретные планы его постройки, в частности, возможные места для сооружения первого будущего термоядерной энергетики и организация работ на этом завершающем этапе.

СТРАТЕГИЯ СТРЕКОЗЫ

Жить, всякий знает, можно по-разному. Можно проводить свои дни беспечно, беззаботно, не думая о завтрашнем: что есть, то съел, не хватит — зайдем, день прошел и прекрасно. Эта стратегия не раз была представлена в художественной литературе, например, в известной басне «Стрекоза и муравей».

Можно жить и по-другому: полностью пожертвовать быстроубегающим нынешним днем, не отдавая подготовке к дню грядущему. И эту стратегию обрисовало нам писательское перо — вспомните припятанные на черный день плюшкинские сухари.

В малых масштабах, в жизни отдельного человека, семьи, подобные крайности встретить редко — люди в основном живут сегодняшним днем, но какую-то часть времени, сил, средств вкладывают в свое завтра. Тратят годы на образование, варят на зиму варенье,

В начале июня в Москве проходили «Дни ИТЭР» — представительная конференция, посвященная вопросам строительства первого в мире международного экспериментального термоядерного реактора. На снимке — группа участников семинара, работавших над подготовкой официальных переговоров о будущем реактора ИТЭР. В центре — академик Е. П. Велихов, второй справа — первый заместитель министра атомной энергии России В. Г. Виноградов.



зарабатывают пенсию, заводят сберкнижку. Но вот что удивительно — большие общественные структуры, целые страны и даже, бывает, все человечество целиком уходят в текущие свои дела, к будущему относятся беспечно, в стиле стрекозы из басни Крылова. Посмотрите, с какой легкостью мы кромсаем природу, не задумываясь о том, что дело вот-вот дойдет до непоправимого. С удивительной беспечностью мы наполняем мир многообразием новых химических соединений, не думая о том, как они сосуществуют с тонкими химическими машинами живой природы и во что могут превратить род человеческий. Обратите внимание, наконец, на то, с каким азартом мы черпаем из недр нефти, каждый раз подбадривая себя порцией оптимизма: «Ученые уверены, что нефти еще много, вполне хватит на 30 лет... Какое там на тридцать, по новейшим прогнозам, на сорок... Даже на пятьдесят — ура!»

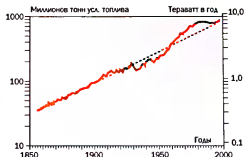
А ведь специалисты считают, что период становления новой энергетики не менее 50 лет, так что мы, возможно, уже опоздали.

Нельзя, конечно, сказать, что человечество совсем уже беспечно относится к вопросам энергетики в целом. Нет, нет — кое-что все же делается, чтобы иметь энергетическую подмену к моменту, когда на индикаторе мирового бензобака стрелка упадет до нуля. Но делается, как считают специалисты, намного меньше, чем можно было бы. И уж наверняка меньше, чем нужно.

Во всяком случае сегодня мировое сообщество тратит на подготовку к неотвратимо надвигающейся энергетической зиме в тысячи раз меньше средств, чем на совершенно пустое, бессмысленное дело — на вооружение. На то, чтобы народы, жители единого дома могли пугать друг друга, напоминая детей, которые играют в войну и еще ничего не знают о проблемах взрослой жизни.

ЭККУРСИЯ В ЗАКРОМА

Сейчас основную часть всей потребляемой энергии дает нам органическое топливо — нефть, уголь, газ. И в основном живем мы только за счет того, что природа в свое время создала молекулы этих углеводородов, что она, образно говоря, скала бесчисленные молекулярные пружины и они, распрямляясь, возвращают запасенную энергию. Происходит это так — в процессе горения, то есть соединяясь с отобранным из воздуха кислородом, органическая молекула выделяет микродолю тепла. А поскольку таких молекул много (в одном грамме нефти, например, миллиарды миллиардов), то при сжигании органического топлива можно получить немалую энергию. Именно эта нехитрая химия обеспечивает сегодня почти все наше

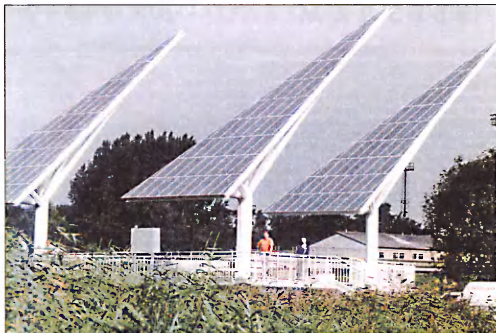


Потребление энергии в мире стремительно растет — на 2,3 процента ежегодно, то есть удваиваясь каждые 30 лет, и сегодня составляет около 8 тераватт в год (1 ТВт = 10^{12} Вт, тысяча миллиардов ватт). Количество произведенной энергии измеряют в массе условного топлива (прикидается, что 1 кг условного топлива при сгорании выделяет 29,3 МДж энергии; уголь дает чуть меньше, нефть и газ — больше). На производство такого количества энергии сегодня требуется затратить его почти миллиард тонн.

энергетическое пропитание — тепло и свет в домах, сталеплавильные печи и хлебозаводы, миллионы тракторов на полях и сотни миллионов автомобилей на дорогах. Еще раз напомним — все это начинается с химической реакции окисления углеводородов, с процессов в электронных оболочках атомов.

Тепловые электростанции с КПД около 30% не только сжигают ценнейшее органическое сырье — нефть, природный газ и уголь (вспомни слова Д. И. Менделеева: «Топить нефтью — все равно что топить ассигнациями»), но и выбрасывают в атмосферу тысячи тонн копоти, углекислого газа и соединений серы. Кроме того, продукты сгорания содержат радионуклиды, загрязняющие тысячи квадратных километров территорий вокруг каждой ТЭЦ.





Экспериментальная солнечная электростанция, построенная в Германии, вырабатывает 11 тысяч киловатт-часов электроэнергии в год. Эти огромные панели развивают мощность не более 3 кВт; ее может хватить для питания электричеством только одной квартиры или небольшого дома.

Есть у нас, у землян, и иные источники энергии. Самый, казалось бы, бесплатный — Солнце, в виде тепла и света отдающее Земле чуть ли ни в миллион раз больше киловатт, чем сегодня потребляет наше индустриальное общество. Но попробуй собери эти бесплатные киловатты — никаких денег не хватит. По мелочам выходит неплохо — микрокалькуляторы и иная маломощная электроника уже давно питаются электричеством, полученным с помощью света. Хорошие полупроводниковые панели превращают в электричество примерно 20 процентов попадающей на них солнечной энергии, и энтузиасты в своих гаражах уже строят автомобили и яхты на солнечной тяге (см. «Наука и жизнь» № 6, 2001 г.). Но накормить таким способом города и страны — совсем другое дело. Огромные панели занимают много места, и на их работу сильно влияют капризы погоды. Поэтому предлагается когда-нибудь запустить на высокую околоземную орбиту спутники с огромными, километровых размеров панелями солнечных батарей и оттуда, с орбиты, гнать энергию на Землю с помощью мощнейшего луча радиоволн. Но как это будет влиять на экологию планеты — до конца не ясно.

Пока же хорошо использовать солнечную энергию умеют только растения. Не случайно нынешних изобретателей так привлекает «старый способ» — сжигание древесины. Но так, чтобы получать в основном не тепло, а горючий газ, который можно будет вывозить с лес-

ных энергетических плантаций в баллонах или транспортировать по трубопроводам.

Кое-где в ощутимых масштабах энергию добывают, используя вторичные эффекты солнечной активности — ветер и круговорот воды, питающий реки. Есть в резерве еще и неосвоенные недра планеты — уже на глубине 100—200 километров ее температура измеряется сотнями градусов. Энергию подбрасывает нам заведенное миллиарды лет назад небесное перпетуум-мобиле — Луна. Вращаясь вокруг Земли, она создает на ней приливные волны, от которых только на побережье морей и океанов в принципе можно было бы собрать энергетический урожай, составляющий 10 процентов наших нынешних потребностей. Новую область крупномасштабной химической энергетики мог бы открыть водород, если дешево и безопасно добывать, хранить и сжигать его.

А еще есть в наших краях огромные запасы энергии, припрятанные природой в атомных ядрах, о чем мы вскоре поговорим особо. Одним словом, в целом источников энергии немало, проблема лишь в том, как эту энергию извлечь, как ее пустить в дело, затратив не слишком много сил. И не испортить при этом Природу — среду нашего обитания.

МАШИНА, РАБОТАЮЩАЯ В ДВУХ СОВЕРШЕННО РАЗНЫХ РЕЖИМАХ

Как было только что отмечено, энергией нас снабжают в основном атомы и молекулы. Горят дрова, взрываются в цилиндрах автомобильного двигателя пары бензина, сгорают газ в паровых котлах городской электростанции — во всех этих случаях определенные атомы в молекулах топлива соединяются с кислородом. При этом объединяются и перестраиваются некоторые их электронные орбиты, и в

Перспективным источником энергии сегодня во многих странах считаются ветроэлектростанции (ВЭС). Только в одной Германии построено свыше 700 гигантских «ветряков» суммарной мощностью более 100 МВт. Однако и эти «даровые» электростанции имеют целый ряд недостатков. Они сильно зависят от капризов погоды и все-таки небезвредны для окружающей среды.

результате такой перестройки новая молекулярная система выбрасывает во внешний мир то, что для нее оказалось лишним — порцию энергии. Для разных химических реакций это разная порция, но всегда не очень большая — несколько электрон-вольт. Напомним, что электрон-вольт (эВ) — это одна из единиц измерения энергии, так же как метр или дюйм — одна из единиц измерения длины. Энергия 1 эВ появится у электрона, если его ускорить в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 вольт. Более крупная единица — мегаэлектрон-вольт, 1 МэВ = 1 000 000 эВ. Лампочка небольшого карманного фонарика за минуту потребляет примерно сто миллиардов МэВ.

Не зная всех этих подробностей, человек тысячи лет использовал энергию горения. Глубокие исследования мира атомов и молекул позволили постепенно понять суть дела и в итоге открыли для энергетики принципиально новые возможности. В частности, в начале прошлого века стало выясняться, что энергетическая машина «Атом» может выдавать во внешний мир энергию, работая, так сказать, в двух совершенно разных режимах и используя при этом две разные силы — электромагнитную и ядерную.

В настоящее время известны всего четыре разновидности сил или взаимодействий: ядерные, электромагнитные, гравитационные и

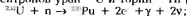


слабые. Другие нам пока не известны. Почему их именно четыре? Почему они такие, какие есть, а не другие? Почему действуют так, как они действуют, а не как-нибудь иначе? На подобные вопросы сегодня есть один ответ — так устроен мир, в котором мы живем (см. «Наука и жизнь» № 11, 2000 г.). Первые две силы из великолепной четверки нам хорошо известны — мы неоднократно видели их в работе. Это гравитация (бутерброд падает на пол) и электромагнитные силы (клички бумаги тянутся к натертой расческе, железные опилки — к магниту). Две другие силы нельзя обна-

СКОЛЬКО ТОПЛИВА НА ЗЕМЛЕ

Энергию, столь необходимую человечеству, сегодня получают в основном за счет сжигания углеродного топлива (1). Часть энергии (в ряде стран — немалую) дают атомные электростанции, работающие за счет деления радиоактивного изотопа урана ^{235}U , количество которого составляет только 0,71% от общей массы природного урана. Практически все остальное — его «негорючий» изотоп ^{238}U . Однако делящиеся изотопы урана и плутония (^{239}Pu) нетрудно

получить искусственно, облучая потоком нейтронов уран ^{238}U и торий ^{232}Th (2):



В качестве своего рода «побочных продуктов» реакции при каждом взаимодействии возникает гамма-излучение (γ) и вылетают электроны(e^-) и электронные антинейтрино ($\bar{\nu}$).

Наилучшим образом эти реакции проходят в ныне действующих реакторах-размножителях на быстрых нейтронах (бридерах), а в будущем, если потребуются, их можно будет проводить в blankets термоядерных реакторов (3).

	Реакция	Элемент	Среднее содержание в литосфере (г/т)	Среднее содержание в океане (г/т)	Удельная энергия (Дж/кг)	Общие ресурсы Земли (Дж)
1	$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 4,2 \text{ эВ}$	Уголь, нефть, газ	—	—	$\sim 3 \cdot 10^7$	$\sim 5 \cdot 10^{21}$
2	$n + \text{U} \rightarrow \text{осколки} + 200 \text{ МэВ}$ $n + \text{Th} \rightarrow \text{осколки} + 200 \text{ МэВ}$	^{235}U ^{233}U	$4 \cdot 10^{-5}$ 10^{-5}	$1,5 \cdot 10^{-5}$ $< 5 \cdot 10^{-6}$	$0,82 \cdot 10^8$ $0,82 \cdot 10^8$	$\sim 3 \cdot 10^{20}$ $\sim 8 \cdot 10^{19}$
3	$\text{D} + \text{D} \rightarrow$ $\rightarrow \text{He} + n + 3,3 \text{ МэВ}$ $\rightarrow \text{T} + p + 4,0 \text{ МэВ}$ $\text{D} + \text{T} \rightarrow \text{He} + n + 17,6 \text{ МэВ}$ $p + \text{T} \rightarrow \text{He} + \gamma + 19,2 \text{ МэВ}$	D ^3Li ^3He	$1,5 \cdot 10^{-5}$ $5 \cdot 10^{-5}$ $7,3 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$ 10^{-5} —	$0,9 \cdot 10^8$ $2,9 \cdot 10^{11}$ $4,9 \cdot 10^{11}$	$\sim 2 \cdot 10^{20}$ $\sim 10^{20}$ $\sim 10^{20}$

ружить столь же просто, они действуют лишь в атомном ядре, причем на очень малых расстояниях — меньше триллионной доли миллиметра. Это третья по счету ядерная, или иначе — сильная, сила и четвертая по счету — слабая сила (название не самое удачное: она на много порядков сильнее гравитации).

Ядерные силы стягивают, или, как часто говорят, склеивают, тяжелые частицы атомного ядра — протоны и нейтроны. И для такого склеивания, стягивания протонов и нейтронов в единое ядро силы нужны немалые. Достаточно вспомнить, что у протонов есть положительный заряд, а одноименные заряды, как известно, взаимно отталкиваются. Причем на малых внутриядерных расстояниях протоны расталкиваются особенно энергично, ядерные силы должны быть действительно очень сильными, чтобы ядра не разваливались и мир был стабильным, устойчивым.

Вместе с тем в каких-то случаях и в атомных ядрах могут происходить изменения, в том числе и такие, после которых от ядерных сил требуется меньше усилий и их избыток уходит из ядра в виде порции энергии. В принципе происходит то же самое, что и при химических реакциях, при изменениях в электронной структуре атомов — атом меняет свое состояние, и это сопровождается выделением уже не нужной ему энергии. Но только изменения в атомных ядрах, изменения с участием могучих ядерных сил сопровождаются несравнимо большим выделением энергии, чем дают химические процессы, то есть процессы в электронных оболочках, где в основном действуют не очень мощные (в сравнении с ядерными) электромагнитные силы.

В этом одно из главных достоинств атомной, или, лучше сказать, ядерной, энергетики — каждый участвующий в деле атом выдает в милли-

оны раз больше энергии, чем при химических реакциях. Второе достоинство — запасы ядерного топлива достаточно велики, а для ядерного синтеза, где энергию получают в основном из ядер водорода и топливом может служить обычная вода, — практически безграничны.

СТАКАН ВОДЫ ВМЕСТО БОЧКИ БЕНЗИНА

Существуют два поставщика ядерной энергии — деление, распад атомных ядер и создание, синтез нового ядра из двух слившихся более простых ядер. Реакции деления, в частности деление атомных ядер урана, используется в современных, так сказать, традиционных атомных электростанциях. Их в мире уже работает больше четырехсот общей мощностью почти 350 гига watt ($1 \text{ ГВт} = 10^9 \text{ Вт}$), что составляет более 4 процентов мировой энергетики. А в некоторых странах они производят весьма заметную часть электроэнергии — во Франции, например, 75 процентов, в Бельгии — 58, в Японии — 35, в США — 20, в России — 14.

Что же касается синтеза, то здесь реально речь пока идет об одном виде ядерных реакций — о слиянии двух ядер водорода, точнее его изотопов, в одно ядро, в ядро гелия. Каждое такое слияние двух водородных ядер в расчете на единицу массы дает во много раз больше энергии, чем деление уранового ядра, и при этом не сопровождается появлением радиоактивных отходов. Наконец, еще одно достоинство — водорода чрезвычайно много и на Земле, и во Вселенной. Не случайно при сотворении мира Природа выбрала именно водородный синтез для своих энергетических агрегатов — для звезд. Так, в частности, вся гигантская энергия, которую выдает наше Солнце, в том числе тепло и свет, попадающий на Землю (0,0000001 процен-

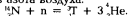
Из таблицы видно, что запасы сырья для ядерной энергии синтеза (лития, из которого получают тритий) примерно в 30 раз превышают запасы урана и тория, пригодных для получения энергии деления. К тому же на тритии будут работать термоядерные реакторы только первого поколения. Уже сейчас идет работа по созданию реактора на безнейтронных реакциях синтеза, например на ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p + 12,8 \text{ МэВ}$) и других легких ядрах. А все органическое топливо Земли — нефть, газ и уголь — может дать только одну стомиллионную часть этой энергии. При современной мощности мировой энергетики запасов органического топлива, в первую очередь угля, хватит лет на двести, а сырья для ядерной энергетики — на тысячелетия.

ОТКУДА БЕРУТСЯ ТРИТИЙ И ДЕЙТЕРИЙ

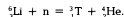
Изотоп водорода, содержащий два «лишних» нейтрона — тритий ${}^3\text{H}$, или T , имеет период полураспада 12,26 года. Количество природного трития на Земле не превышает четырех килограммов. Но поскольку на его реакции с дейтерием основано действие тер-

моядерного оружия, современные запасы трития исчисляются десятками килограммов. Откуда же он берется?

В природе тритий образуется при бомбардировке нейтронами космического излучения атомов азота воздуха:



А в реакторах деления тритий получают за счет взаимодействия с нейтронами ядер лития:



Эта реакция проходит гораздо интенсивнее, чем природная, поэтому и количество трития удастся поддерживать на должном уровне.

Дейтерий ${}^2\text{H}$, или D , стабилен, в природе имеется, хотя и в очень малых количествах — 0,015% общего количества водорода. Обыкновенная вода рек, озер, морей и океанов хранит его в молекулах D_2O — «тяжелой воды». Масса дейтерия в два раза больше массы водорода, поэтому скорости химических реакций между веществами, их содержащими, могут отличаться раз в 5 — 10. Эту особенность и используют для выделения дейтерия, применяя многоступенчатый электролиз воды, «выпаривание» жидкого водорода и другие методы.

Реакторы будущего могут использовать энергию синтеза ядер, протекающую по четырем основным схемам с участием дейтерия (D), трития (T), нейтронов (n) и протонов (p). Наиболее перспективной считается первая, в которой из 17,6 МэВ энергии 3,5 МэВ уносит ^4He , а 14,1 МэВ — нейтрон. В последней реакции основная доля энергии приходится на гамма-излучение (γ).

та общей солнечной мощности), рождается из ряда ядерных реакций синтеза. Поняв это, вполне естественно было подумать о том, чтобы воспроизвести водородный синтез в земных условиях — заставить маленькое прирученное Солнце щедро кормить нас энергией. Тогда уже не нужно будет опасаться энергетического голода — водород можно брать из воды, а ее у нас немерено. К тому же ядерные реакции — это вам не слабосильное горение, водородный синтез позволит из стакана обычной воды, в которой есть и молекулы D_2O , получить столько энергии, сколько дает сгорание целой бочки бензина.

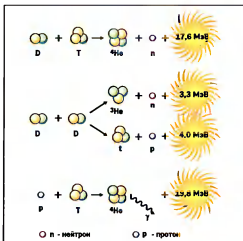
НЕВИДИМЫЕ МИРУ СЛЕЗЫ

Крылатое выражение «невидимые миру слезы» вполне можно отнести к многолетним попыткам использовать водородный синтез в большой энергетике. Широкая публика часто слышала о том, что в этой области проводятся интересные исследования, строятся экспериментальные установки, что наука весело и успешно приближается к намеченной цели. Но мало кто знает, с какими сложными, порой, казалось, неразрешимыми проблемами сталкивались физики и инженеры, как много появилось на их пути совершенно неожиданных препятствий, как дорого приходилось платить чуть ли ни за каждое продвижение вперед. Достигнутый сегодня рубеж — технический проект термоядерного реактора — не только итог многолетних усилий многих тысяч профессионалов высочайшего уровня. Это на самом деле еще и напоминание о мужестве ученых и инженеров, умеющих держать удар и разумно рисковать, преодолевать, казалось бы, непреодолимое и, сделав ставку на математический прогноз, начинать работы стоимостью в миллионы долларов, взяв на себя ответственность за результат.

Невозможно рассказать обо всех задачах, которые решались и еще только решаются на пути к энергетическому реактору ядерного синтеза. Но о некоторых из них полезно знать даже человеку, не имеющему возможности вникать в детали, — это поможет почувствовать масштабы проблемы.

Получать энергию от ядерного синтеза научились почти полвека назад, но лишь в виде неуправляемой лавины — в водородной бомбе. А энергетике нужен не взрыв, а ровное «горение», непрерывное выделение энергии. Иначе говоря, энергетике нужен управляемый термоядерный синтез, сокращенно УТС.

Настал, видимо, момент пояснить значение приставки «термо» в слове «термояд», которая присутствует в названии проекта ИТЭР. Чтобы получить ядро гелия из двух ядер водорода, нужно с огромной силой столкнуть эти ядра. Тогда они смогут преодолеть взаимное электрическое отталкивание (не забудьте: ядро водорода — это протон, частица с положительным электричес-



ким зарядом) и сблизиться до чрезвычайно малого расстояния 10^{-13} см, когда уже начинают действовать ядерные силы.

Процесс синтеза обычно осуществляют в газообразном водороде, нагретом до очень высокой температуры: чем выше температура, тем больше средняя энергия хаотически движущихся частиц газа. Правильнее, пожалуй, сказать иначе: температура — это мера интенсивности движения частиц, мера их скорости и, следовательно, их кинетической энергии. Чем выше температура, тем больше ядра имеют энергию, позволяющую преодолеть электрическое расталкивание и сблизиться для последующего слияния в ядро гелия.

Для эффективного ядерного синтеза нужно нагреть водородный газ до температуры в сотни миллионов градусов. Для получения большой энергии при синтезе ядер гелия используют изотопы водорода — тяжелый водород дейтерий и сверхтяжелый — тритий. Однако для упрощения мы будем там, где это возможно, называть эти изотопы просто водородом. И еще одно терминологическое замечание — при высокой температуре атомы сбрасывают свои электронные оболочки и вместо водородного газа, состоящего из нейтральных атомов, образуется плазма — в целом квазинейтральная смесь свободных атомных ядер и свободных электронов.

Итак, для ядерного синтеза водородный газ нужно очень сильно нагреть, попутно превратив его в водородную, а точнее дейтерий-тритиевую, плазму. С ростом температуры возрастает вероятность слияния водородных ядер, а значит, и эффективность процесса — выход высвобождающейся энергии. Здесь, правда, есть немало тонкостей. Температуру, в частности, можно снизить, не потеряв эффективности, если увеличить давление водородного газа, но при этом возникает ряд новых проблем. В лабораторных установках для термоядерного синтеза плазма имеет температуру 50—100 миллионов градусов, а в ИТЕРе она будет поддерживаться на уровне 150—200 миллионов. В недрах Солнца ядерный синтез идет при температуре 20 миллионов градусов, но там водород очень сильно сжат гравитационными силами — огромной солнечной массой.

(Окончание следует.)

ТЕРМОЯД: СКВОЗЬ ТЕРНИИ К ЗВЕЗДАМ

В июне этого года в Москве прошли «Дни ИТЭР», собравшие участников международной программы «Технический проект ИТЭР», экспериментального термоядерного реактора. Программа была успешно завершена в июле, и начались переговоры о строительстве самого реактора, в первую очередь о выборе места для его сооружения и о создании Международного института ИТЭР, предназначенного для организации строительства и эксплуатации реактора.

Профессионалы считают, что в ИТЭРе будет, наконец, получено «горение плазмы» — самоподдерживающаяся термоядерная реакция. Сделан еще один важный шаг на долгом и трудном пути к термоядерной электростанции, к звездным энергетическим процессам.

Р. СВОРЕНЬ, специальный корреспондент журнала «Наука и жизнь».

УКРОЩЕНИЕ НЕУКРОТИМОГО

Стремление получить высокотемпературную плазму натолкнулось сразу на несколько очень сложных проблем. Во-первых, надлежало ее нагреть до многих миллионов градусов. Во-вторых, чтобы сохранить высокую температуру плазмы, нужно изолировать ее от стенок реактора, создать своего рода плазменное облако. В-третьих, это облако необходимо сделать абсолютно устойчивым, чтобы оно висело в пространстве, не смещаясь и ни к чему не прикасаясь.

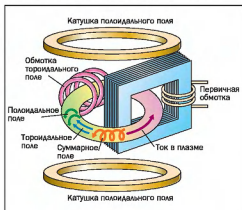
Один из подходов к решению этих проблем сначала появился на листке бумаги в виде несложных схем и математических уравнений. Вскоре идея была реализована в установках, получивших наименование ТОКАМАК — от слов «тороидальная камера с магнитной катушкой». В плазменном сгустке создавали электрический ток, и при этом, как у всякого тока, у него появлялось собственное магнитное поле — сгусток плазмы как бы сам становился магнитом. И тогда с помощью внешнего магнитного поля определенной конфигурации подвешивали плазменное облако в центре камеры, не позволяя ему соприкоснуться со стенками.

В упрощенном виде сама камера для термоядерного синтеза в ТОКАМАКах — тороидальная, то есть по форме напоминала бублик. Из камеры откачивают воздух, чтобы посторонние атомы не вмешивались в процесс, а затем в нее вводят дейтерий-тритиевую смесь. Снаружи расположены катушки, подключенные к переменному электрическому напряжению. Подобно первичной обмотке трансформатора, они создают кольцевой ток в водородной плазме. В газе всегда есть свободные ионы и электроны, которые начинают двигаться в камере по кругу, как в короткозамкнутой вторичной трансформаторной обмотке. Этот ток нагревает газ, количество ионизированных атомов растет, одновременно увеличивается сила тока и повышается температура плазмы. А значит, количество водородных ядер, слившихся в ядро гелия и выделивших энергию, становится все больше.

Подобную простую схему и имели в виду физики, когда почти пятьдесят лет назад в Москве, в Институте атомной энергии, построили первый в мире ТОКАМАК и начали первые эксперименты. Очень скоро выяснилось, что реальность вносит в теорию свое дополнение, с виду тоже очень простое: сгусток нагретой водородной плазмы, подвешенный в магнитном поле, оказался неустойчивым. Он довольно быстро, за тысячные доли секунды, распадался и вываливался на стенки камеры.

Оказалось, что к неустойчивости приводит комбинация нескольких сложных физических процессов. Здесь были различные виды колебаний и волн в плазме, возникающие в ней местные магнитные поля, блуждающие температурные неоднородности и масса других

Принципиальная схема ТОКАМАКа. Вакуумная камера в форме тора заполнена смесью изотопов водорода и свободных электронов. Она охватывается стальной сердечник, играя роль вторичной обмотки трансформатора. На первичную обмотку подается переменное напряжение, индуцирующее в камере электрический ток — движение электронов. Сталкиваясь с атомами, электроны высокой энергии ионизируют их — сила тока возрастает. В камере возникает плазма. На камеру надеты обмотки тороидального поля, которые сжимают плазму в шнур. Поле полоидальных катушек удерживает плазменный шнур в центре камеры, не давая ему коснуться стенок.



Окончание. Начало см. «Наука и жизнь» № 8, 2001 г.



Академик Евгений Велихов, председатель Совета программы ИТЭР: «Можно радоваться тому, что проект ИТЭР готов, что мы завершили эту гигантскую работу. Но думать нужно главным образом о том, как, не затягивая дела, построить этот реактор».

официальное согласие правительства на строительство реактора ИТЭР в нашей стране на выбранной нами прекрасной площадке в районе озера Онтарио, недалеко от Торонто».



Профессор Дэвид Болвин (США): «Два года назад мы вышли из программы ИТЭР, но, к счастью, не захлопнули за собой дверь. Нынешняя новая администрация на собственном опыте поняла, насколько серьезными могут стать энергетические проблемы, и такое понимание в итоге может поддержать тех, кто считает, что нужно вернуться в эту программу».



Доктор физико-математических наук Ирина Тажибаева (Казахстан): «Мы счастливы, что Правительство нашей республики изыскало средства на участие в работах и наш Национальный ядерный центр сможет внести вклад в реализацию проекта ИТЭР».



Доктор Питер Барнард (Канада): «Мы отправлялись в Москву с тяжелым настроением, но буквально за час до вылета оно резко изменилось — было получено



Профессор Масаджи Иошикава (Япония): «Можно назвать много достоинств термоядерной энергетики, но для широкой публики сегодня особенно важно то, что термояд — самый экологически чистый и наиболее безопасный способ производства электроэнергии в больших масштабах».

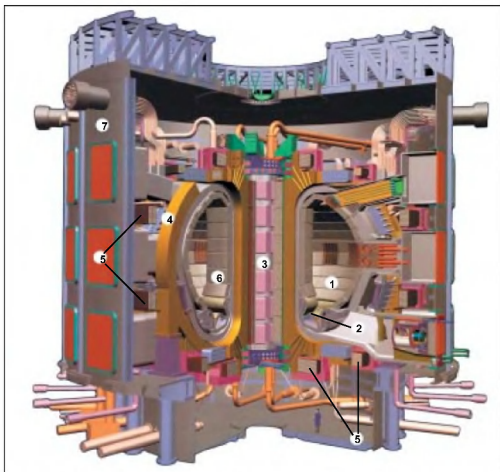
неожиданностей. Открывшийся плазменный хаос начали исследовать крупнейшие физики — М. А. Леонтович, Л. А. Арцимович, Р. З. Сагдеев, Д. Д. Рютов, Б. Б. Кадомцев, Е. П. Велихов, В. Д. Шафранов, Б. А. Трубников и многие, многие другие. Постепенно возникла ясность, а вместе с ней появлялись практические рекомендации по повышению устойчивости плазмы. Вот одна из них: уменьшить кольцевой ток в плазме и использовать для дополнительного нагрева мощные излучатели радиоволн сверхвысокой частоты — гиротроны. Кроме того стало ясно, что время устойчивого удержания плазмы возрастает с увеличением размеров установки. Крупнейшая отечественная машина ТОКАМАК-15 уже имеет тороидальную вакуумную камеру с внешним диаметром «бублика» более пяти метров. Крупные исследовательские ТОКАМАКИ были построены в России, Японии, США, Франции, Англии. А несколько лет назад специалисты пришли к выводу,

что оставшиеся нерешенные проблемы нужно исследовать на установке, максимально приближенной к реальному энергетическому термоядерному реактору. Это понимание и привело к работам по созданию ИТЭРА.

Кстати, неустойчивость плазмы — серьезная проблема не только ТОКАМАКОВ, но практически и всех других установок для термоядерного синтеза. О некоторых из них уже давно пора сказать несколько слов.

СЕМЬ КРАСНЫХ СТРЕЛ АТАКИ

Лет двадцать назад был придуман эффективный рисунок, отображающий основные методы, с которыми связывались надежды на решение проблемы управляемого термояда. Саму задачу представлял круг с надписью «УТС», в который, как на карте военного наступления, с разных сторон упиралось больше десятка красных стрел с соответствующими надписями.



Сегодня таких стрел было бы нарисовано меньше. Какие-то методы не вышли еще из сферы теоретических поисков, для других не видно пока реальных способов практического применения. Специалисты, скорее всего, оставили бы на карте семь красных стрел атаки.

1. ТОКАМАК. О нем уже говорилось выше, но одно дополнение все же необходимо. Оно будет сделано в самом конце, после оглашения всего списка.

2. Стелларатор. Здесь, как и в ТОКАМАКЕ, плазма тоже подвешена в магнитном поле, но тока в ней нет. Греют плазму в основном мощным радиоизлучением, а держат ее только сложной формы магнитные поля, созданные внешними катушками.

3. Открытая ловушка, или, иначе, пробокотрон. В цилиндрическую вакуумную камеру, запертую магнитными пробками, точно выбрав направление, впрыскивают атомы, которые тормозятся в водородном газе и превращают его в горячую плазму. Удерживают ее магнитные поля сложной конфигурации.

4. Плазменный фокус. В вакуумной камере между двумя электродами создается мощный импульс тока, который быстро нагревает плазму и дает всплеск ядерного синтеза. Плазма, как и в предыдущих случаях, связана с маг-

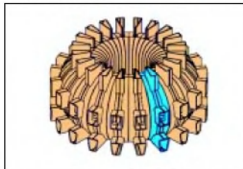
Так выглядит в разрезе термоядерный реактор ИТЭР. Его вакуумная камера 1 снабжена дивертором 2 — устройством, искажающим магнитное поле так, что оно превращается в ловушку для «отходов производства», которые непрерывно откачиваются в процессе работы. Роль перичной обмотки играет центральный соленоид 3, катушки тороидального поля 4 охватывают камеру, а полоидального 5 — окружают ее. Камера со всех сторон покрыта бланкетом 6, играющим роль поглотителя нейтронов и теплоизолятора. Весь реактор помещен в кожух-криостат 7; сверхпроводящая магнитная система охлаждается жидким гелием до температуры 4,5 К и окружена слоем жидкого азота с температурой около 70 К.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ИТЭР

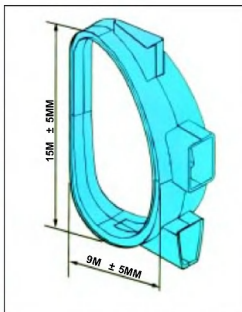
Для магнитного удержания плазмы служат 18 обмоток тороидального поля (ОТП). Управляют положением и формой плазменного шнура 6 обмоток полоидального поля (ОПП) и набор корректирующих катушек. Индуктивное наведение тока в плазме осуществляется с помощью центрального соленоида (ЦС). Обмотки тороидального поля и центрального соленоида выполнены из сплава Nb_3Sn , полоидального поля и корректирующих катушек — из $NbTi$; все они охлаждаются жидким гелием до температуры 4,5 К. Общий вес магнитной системы вместе с каркасом из нержавеющей стали — 8700 тонн.



Секция вакуумной камеры в цехе завода-изготовителя. Размеры этой гигантской детали должны быть выдержаны с точностью до пяти миллиметров.



Так будет выглядеть вакуумная камера в собранном виде.



нитным полем, но синтез идет в импульсах микросекундной длительности.

5. Лазерный термояд. Водородный синтез происходит в миллиметровых размерах шариках, наполненных дейтерием или дейтерий-тритиевой смесью в твердом либо газобразном состоянии. Шарики один за другим падают в рабочее пространство установки, где по ним поочередно со всех сторон ударяют мощные лазерные лучи. Они на лету сильно нагревают и сжимают шарик-мишень, в котором, как в водородной бомбе, происходит термоядерный микровзрыв и выделяется значительная энергия (см. «Наука и жизнь» № 11, 1999 г.). Стрела «Лазерный термояд» разветвляется на четыре самостоятельные

В апреле 2000 года при испытании магнитной системы на стенде было получено поле с индукцией 13 тесла при токе 46 килоампер и с запасенной энергии 640 мегаджоулей. Катушки-вставки центрального соленоида в этом поле успешно выдержали 10 тысяч циклов заряд—разряд при подъеме поля со скоростью 0,4 Тл/с и его снижении 1,2 Тл/с, что превышает проектные значения для ИТЭРА. Именно прогресс в технике сверхпроводников и позволил осуществить сам этот реактор.

Прежде чем будут изготовлены магнитные катушки термоядерного реактора, работоспособность высокоточных сверхпроводников проверяют на моделях в условиях, идентичных возникающим в ИТЭРе. Модельная катушка центрального соленоида (МКЦС) состоит из двух цилиндрических модулей основной обмотки, вставленных один в другой, и сменных однослойных катушек-вставок. На снимке: укладка слоя сверхпроводящей обмотки из сплава Nb₃Sn внутреннего модуля МКЦС на фирме Lockheed Martin (США).

Наружный модуль модельной катушки центрального соленоида, изготовленный компанией Toshiba (Япония).

стрелки — наряду с лазерными лучами в таком инерционном синтезе пытаются использовать мощные пучки электронов, легких и тяжелых ионов.

6. Мюонный катализ. В дейтерий-тритиевый газ вводят мю-мезоны (мюоны) — частицы с таким же отрицательным зарядом, как у электрона, но в 200 раз более тяжелые. С участием мюонов в большом количестве образуются напоминающие атом конструкции — мюон вращается вокруг двух сблизившихся, но пока еще независимых ядер дейтерия и трития. Этот «тяжелый электрон» находится на орбите, весьма близкой к ядрам, и сильно «сжимает» их своим электрическим полем. Ядра сливаются, выделяя порцию энергии, и такой процесс с одним мюоном повторяется более ста раз. Так что мюон действует как катализатор — облегчает и ускоряет ядерный синтез, снижает необходимую для него температуру.

7. Галатей. Традиционные магнитные ловушки, перечисленные выше, имеют одно общее свойство: плазма и магнитное поле в них «перемешаны». Это приводит к нескольким неприятным явлениям, одно из которых — неустойчивость плазменного шнура. Заряженные частицы плазмы движутся в поле по спиралям, образуя круговые токи. Собственные магнитные поля токов направлены противоположно полям внешним, и при их взаимодействии возникает сила, выталкивающая плазму из поля.

В устройствах, называемых галатеей, магнитное поле образует своего рода «корку», или «забор», который отбрасывает вылетающую частицу внутрь плазменного шнура. Для этого внутри плазменного объема нужно подвесить сверхпроводящие кольца, по которым циркулирует электрический ток. Один из вариантов такого «магнитотермоядерного реактора» был предложен А. Д. Сахаровым в 1950 году (см. «Наука и жизнь» № 12, 2000 г.).

Есть и другие, еще более экзотические проекты. Предлагается, например, осуществлять термоядерную реакцию, сталкивая пучки ионов дейтерия в коллайдере (см. «Наука и жизнь» № 1, 2000 г.).

А теперь обещанное дополнение касательно ТОКАМАКА. От всех других установок и методов этот вариант проведения управляемой термоядерной реакции отличается прежде всего тем, что он в основном уже вышел из сферы сомнений и поисков. Благодаря накопленной за пятьдесят лет исследований обширной базе физических и инженерно-технических данных он вплотную подошел к стадии экспериментального реактора. Это, видимо, и вдохновило международное сообщество на создание ИТЭРа.

В постройке экспериментального термоядерного реактора принимают участие большинство развитых стран мира. На снимке: завершается проверка деталей ИТЭРа (диверторов), сделанных в США и Японии.



Атомы водорода вводятся в камеру ТОКАМАКА, предварительно приобретя энергию 1 МэВ в системе линейного ионизатора, ускорителя и нейтронизатора.



ВЕЛОСИПЕД ЛУЧШЕ ИМЕТЬ ЛИЧНЫЙ, А РЕАКТОР — ОБЩИЙ

Такой грандиозный проект, как ИТЭР, — дело сложное, небystрое и дорогое. К тому же плазменная система, имеющая практически бесконечное число степеней свободы, в принципе не может быть рассчитана до конца. Предсказать ее поведение со стопроцентной точностью невозможно. Этим она отличается даже от самых больших ускорителей заряженных частиц, целиком основанных на хорошо известных законах электродинамики. Даже богатой стране нет никакого смысла делать его в одиночку — результатом будут знания и опыт, которые все равно станут общим достоянием и в национальную экономику сразу ничего не внесут. В то же время, объединив усилия, можно резко ускорить продвижение к своему работающему термояду и снизить собственные затраты. Поэтому в 1992 году было подписано соглашение о совместном техническом конструировании реактора ИТЭР под эгидой МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии). А его концептуальное проектирование по инициативе нашей страны началось на четыре года раньше. В команду проектировщиков ИТЭРа вошли специалисты Европейского союза, России, США и Японии. В 1999 году США вышли из четверки. Сами американские физики объясняли это трудностями финансирования и недостаточным вниманием администрации США к энергетике. Но сейчас в Москве американцы несколько раз отмечали, что после недавних серьезных энергетических проблем в Калифорнии, самом богатом штате, администрация меняет свое отношение к делу, и США ушли из ИТЭРа, не захлопнув дверь навсегда. В то же время как самостоятельный участник проекта после официального предложения своей территории под строительство ИТЭРа в программу вошла Канада. До этого она вместе с Казахстаном была ассоциированным членом итеровской команды и работала в рамках команды Евротома (а Казахстан — команды России).

Дуже несколько фактов и цифр, взятых из Технического проекта, завершение которого недавно отметили «Дни ИТЭР» в Москве, позволяют представить себе эту огромную и сложную машину. Здесь же мы скажем, что высота вакуумной камеры — 15 метров (пятнадцатый этаж), а внешний диаметр — более 12 метров. Само же здание кубической формы, со стороной более 70 метров, где разместится реактор со всеми вспомогательными системами, поднимется над землей как минимум на двадцать жилых этажей.

Одна из главных деталей ИТЭРа (если это сооружение можно считать деталью) называется «бланкет», в переводе на русский «одеяло». Бланкет со всех сторон охватывает кольцо плазмы, и рожившиеся при синтезе основные носители энергии — 14-излучные нейтроны — отдают ее бланкету, сильно нагревая его. В бланкете находятся теплообменники, по которым пропускают воду. Полученный пар вращает паровую турбину, а она — ротор генератора. Так могла бы в общем виде выглядеть схема термоядерной электростанции.

До электрогенератора в ИТЭРе дело пока еще не дойдет (хотя здесь и нет принципиальных

трудностей), но эксплуатация реактора позволит прояснить детали процесса, необходимые для постройки термоядерной электростанции.

Каждый участник проекта взял на себя часть немалого финансового бремени и создал свою, как ее называли, домашнюю команду, которая имела особое задание. При этом нужно помнить, что технический проект реактора — это не только рулоны чертежей, вернее, не только бесчисленные компьютерные файлы. Практически это первый глобальный проект, созданный в «электронном виде». Большинство решений принималось впервые и требовало экспериментальной проверки. Поэтому прототипы почти всех узлов были изготовлены, исследованы, одобрены экспертами и лишь после этого вошли в проектную документацию. Так что, как говорится, дело за малым — остается из нескольких предложений (Франция, Япония, Канада) выбрать строительную площадку, распределить доли финансовых затрат между участниками и построить ИТЭР в течение ближайших восьми лет — таковы расчетные темпы строительства. Ну а дальше — новые поиски, исследования, испытания. И в итоге — проект опытно-промышленной термоядерной электростанции (ТЯЭС), на которой станут отработываться все вопросы получения энергии для будущих поколений человечества. Другой энергетики пока не предвидится.

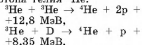
ЕСЛИ БЫ ВО ВРЕМЕНА ПУШКИНА...

Если бы во времена Пушкина сказать людям, что через несколько десятилетий в их дома по тонким металлическим ниткам придет какое-то электричество и зажжет яркие лампы вместо свечей, этому вряд ли кто-нибудь поверил. А ведь именно так и случилось — уже в конце XIX века электричество стало реальной работающей силой, хотя незадолго до этого даже образованные граждане считали его не более чем предметом лабораторных фокусов. Лишь немногим больше столетия отделяет эту справедливую по тем временам репутацию от нынешних мощнейших электростанций и покрывших планету электрических сетей, от электропоездов, дуговых металлургических печей, телефонов и телевидения. Что-то похожее может произойти и со столь нужным человечеству неисчерпаемым источником энергии — управляемым термоядерным синтезом, УТС.

Есть верный признак того, что дело УТС движется к успеху — в мировой прессе стали появляться публикации о приоритете, в частности о том, кто первый придумал добывать энергию из горячей плазмы. В связи с этим уместно вспомнить, что первый документ с описанием подобной идеи — письмо служившего на Дальнем Востоке сержанта Олега Александровича Лаврентьева (ныне доктор физико-математических наук, работает в Харьковском физико-техническом институте), которое он в 1949 году отправил Сталину. В письме несколько наивно, но в принципе разумно предлагалось получать термоядерную энергию, удерживая плазму с помощью полей, правда не магнитных, а электрических. Письмо переслали профессиона-

ГЕЛИЙ И БЕЗНЕЙТРОННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

В качестве одного из перспективных направлений энергетики будущего специалисты рассматривают безнейтронные реакции сгорания, проходящие с участием изотопа гелия ${}^3\text{He}$:

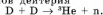
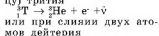


Эти реакции не сопровождаются появлением потока нейтронов высокой энергии, и, следовательно, реакторы для их проведения будут проще, легче и безопаснее из-за отсутствия наведенной радиоактивности в конструкциях. Однако здесь есть одно «но»: ${}^3\text{He}$ на Земле практически не встречается.

Природный гелий состоит из смеси двух изотопов — ${}^4\text{He}$ и ${}^3\text{He}$, причем на долю последнего приходится только 0,000138%. Такое в

высшей степени неравномерное распределение связано с тем, что ${}^4\text{He}$ образуется при альфа-распаде урана (U), тория (Th) и других природных радионуклидов (напомним, что альфа-частица и есть ядро гелия). В толще гранита, содержащей около трех граммов урана и пятнадцати граммов тория, образуется только миллиграмм ${}^4\text{He}$ почти за восемь миллионов лет. Однако за время существования Земли в коре планеты его накопилось немало. Природные газы содержат до 7% этого изотопа и служат единственным источником его промышленной добычи. А так называемый гелиевый метод — отношение масс $\text{He}/(\text{U} + \text{Th})$ в минералах — используется для определения их абсолютного возраста.

Изотоп ${}^3\text{He}$ появляется в результате бета-распада (реакция, при которой ядро испускает электрон и нейтрино, меняя заряд на единицу) трития



Так как дейтерия на Земле в целом мало, а трития практически нет вообще, то и ${}^3\text{He}$ обнаруживается в мизерных количествах. Зато на поверхности космических тел, лишенных атмосферы, где проходит интенсивные реакции с потоками солнечных нейтронов высокой энергии, этот изотоп образуется весьма активно. В метеоритном шесте и в лунных породах его содержание колеблется от 17 до 32%. Уже подсчитано, что в обозримом будущем станет экономически выгодно добывать ${}^3\text{He}$ на Луне и доставлять его на Землю для использования в термоядерных реакторах синтеза.

лам, уже занимавшимся проблемой термояда. А. Д. Сахаров впоследствии подтвердил приоритет оригинальности идей самостоятельного физика о возможности мирного использования термоядерных реакций.

Если перевести взгляд из прошлого в будущее, то придется честно отметить, что, по прогнозам, управляемый термояд еще 20—30 лет будет оставаться предметом исследований, экспериментальных установок, проектов и популярных статей в газетах и журналах. Но, по прогнозам же и даже по просчитанным планам, через несколько десятилетий термояд должен стать работающей реальностью.

Символом УТС можно считать картину, обобщенную когда-то многие издания. На берегу океана (моря, озера, реки) стоит электростанция, топливом для которой служит вода. Именно вода: в некоторой части ее молекул вместо водорода всегда есть тяжелый водород — дейтерий, необходимый для реакций синтеза. Расход воды невелик — несколько цистерн могут сутки кормить электричеством большой город, такой, скажем, как Рязань, Одесса или Бостон. (Еще раз напомним наглядный пример: при «сжигании» дейтерия, содержащегося в литре воды из крана, выделяется столько же энергии, сколько ее имеется в 400 литрах бензина.) Да и то реально расходуется лишь ~0,016% всей массы воды (атомы дейтерия), а остальные ~99,84% возвращаются в водоем. Полное же количество дейтерия в океане составляет около $4 \cdot 10^{13}$ тонн. Его хватит для производства 10^{20} киловатт-лет электроэнергии. Так что, похоже, человек нашел для себя безвредный и практически неисчерпаемый энергетический источник. Но, конечно, нашел не так, как дрова, нефть или уголь, не наткнулся слу-

чайно. Физики выявили этот источник, рассмотрели его у природы, извлекли из полной неясности и неизвестности, прорисовав важнейшие детали в нашей картине мира.

Картина мира, открытая наукой, особенно физикой последнего столетия, — величайшее достижение человеческого разума, изменившее все наше миропонимание. Поэтому вполне справедливо известное «что-то физики в почете», тем более, что именно физики первыми встали стеной против смертельно опасного «что-то лирики в загоне». И вот еще что примечательно — пребывание в мире высоких материй удивительным образом сочетается у физиков с умением извлекать из них практические результаты, то, что реально работает на человека. Именно из физики пришли к нам персональные компьютеры и идеи генетического кода, гигантские воздушные лайнеры, понимание механизмов кровоснабжения и цветные телевизоры. Сегодня на наших глазах, взяв на себя главную заботу и главную ответственность, физика небистро, но планомерно, шаг за шагом, продвигается к решению еще одной задачи, жизненно важной для человека и человечества, — к созданию энергетического изобилия.

ЛИТЕРАТУРА

В журнале «Наука и жизнь» о ТОКАМАКах были опубликованы статьи:

Плотников А. «Термояд» в плазменном шнуре. — № 3, 1971 г.

«ТОКАМАК-7» — еще один шаг к реактору. — № 3, 1980 г.

Александров А., докт. физ.-мат. наук, Елесин Е., докт. физ.-мат. наук. Лед и пламень. — №№ 11, 12, 1987 г.

Панкратов С. ТОКАМАК — новый шаг. — № 4, 1989 г.