

«ГАЛАКТИКА»

Всемирная Потребительская Кооперация

Consumer «GALAXY» Cooperation

INTERNET: WWW.WORDER.ORG E-MAIL: INFO@WORDER.ORG

Тел: +79782139774, +79780914070.

ИНФОРМАЦИОННАЯ СПРАВКА

Русскоязычная электронная версия

Ториевый шанс

Авария на японской АЭС может стимулировать исследования в области более безопасной ядерной энергетики на основе тория.

Вот уже больше месяца сводки с японской атомной станции “Фукусима-1” напоминают фронтовые. Несмотря на все усилия, ученым и ремонтникам не удается остановить ядерные реакции в поврежденном реакторе и предотвратить дальнейшую утечку радиоактивных материалов в окружающую среду. Во многих странах мира всерьез рассматривается вопрос об отказе от атомной энергетики как слишком опасной либо об ограничении ее использования. Между тем еще в 50-е годы были предложены проекты более безопасных ядерных реакторов. В качестве “горючего” в них используется торий - слаборадиоактивный химический элемент, мировые запасы которого, как минимум, вчетверо превышают запасы урана. Полвека назад ториевая ядерная энергетика не выдержала конкуренции с урановой, поскольку из тория нельзя получить плутоний, который используется в ядерном оружии. Но теперь, после “Фукусимы”, ей предоставляется возможность для реванша.

Хорошо забытое старое

В 40-50-е годы, когда атомная энергетика делала свои первые шаги, ученые исследовали различные варианты управляемых ядерных реакций. Их интерес привлек и торий - тяжелый слаборадиоактивный металл, занимающий 90-е место в таблице Менделеева.

Сам по себе торий (вернее, самый распространенный его изотоп торий-232, из которого почти на 100% состоит природный металл) не поддерживает цепную ядерную реакцию и не может быть материалом для атомной бомбы. Однако при облучении тория нейтронами, его атомы, захватывая эти нейтроны, распадаются с выделением значительного количества энергии.

Кроме того, в результате ряда последовательных реакций с образованием промежуточных неустойчивых изотопов (торий-233 и протактиний-233 с полураспадом соответственно 22 минуты и 27 суток) из тория-232 получается уран-233, который сам по себе является хорошим ядерным топливом, подходящим для всех типов современных реакторов.

По сравнению с ураном торий обладает рядом преимуществ. Прежде всего, для загрузки в реактор пригоден природный торий, который, в отличие от урана, не нужно обогащать, проводя сложную и дорогостоящую операцию разделения изотопов. В ториевых реакторах можно перерабатывать оружейный плутоний, а также минимизировать использование урана-235, который является единственной доступной человечеству природной “ядерной спичкой”, способной запускать ядерную реакцию.

При этом если урановые стержни нужно извлекать из реактора уже после того, как в них использовано менее 10% содержавшегося “топлива”, торий можно использовать полностью, до завершения его преобразования в уран-233, который также можно применять для поддержания ядерной реакции. ***Вследствие этого одна тонна тория может дать столько же энергии, сколько 200 т. урана или 3,5 млн. т. угля.***

Оксид тория является более тугоплавким и устойчивым веществом, чем оксид урана, что открывает возможность для создания высокотемпературных реакторов на тории с рабочей температурой 700-800 градусов.

Такой реактор может работать с обычным парогенераторным оборудованием, для него не нужно сложных и небезопасных систем охлаждения (напомним, именно отказ этих систем и привел к аварии на “Фукусиме-1”), его КПД может достигать 50-55%, что почти вдвое выше, чем у традиционных урановых. Полученная тепловая энергия также может использоваться в различных химических процессах (получение аммиака, водорода, ряда углеводородных продуктов).

Вследствие того, что торий требует внешнего источника нейтронов для осуществления ядерной реакции, этот элемент более безопасен в эксплуатации. Нетрудно создать такую схему, при которой в случае аварии реакция просто автоматически прекращалась бы (правда, из-за особенностей ториевого цикла такой реактор все равно бы продолжал работу, пока промежуточные элементы не превратились в более устойчивый уран-233, но выделение энергии было бы значительно меньшим). Наконец, радиоактивные отходы, образующиеся в результате ядерных реакций, в случае использования тория гораздо менее опасны, чем традиционных урановых реакторов, да и образуется их в несколько раз меньше.

В 50-70-е годы в ряде стран мира (США, Великобритания, Индия, ФРГ, СССР и др.) проводились различные эксперименты с ториевыми и торий-урановыми реакторами. В 70-80-е годы американская компания General Atomics и немецкая Siemens даже создали опытные образцы энергетических реакторов мощностью 300 МВт с использованием ториевого топлива, однако на этом исследования в данной области практически полностью прекратились.

Падение интереса к торию было обусловлено рядом объективных и субъективных причин. Прежде всего, фундаментальным недостатком тория была его непригодность для производства ядерного оружия. В 50-е годы в США проводились опыты по использованию урана-233 в ядерных бомбах, однако предпочтение было в итоге отдано более эффективному плутонию. Львиная доля средств на НИОКР в результате выделялась на исследования, связанные с урановым циклом, что позволило достаточно быстро создать и оптимизировать соответствующие технологии. Появление эффективных и относительно безопасных легководных реакторов, доступность и невысокая цена уранового ядерного топлива привели к тому, что энергетики отказались от рассмотрения альтернативных вариантов, не сулящих быстрой отдачи. Как говорится, от добра добра не ищут.

Вследствие этого адекватной технологии изготовления ториевых или торий-урановых топливных элементов так и не было создано. Не была решена и главная, пожалуй, проблема ториевого цикла. В ходе реакций, помимо урана-233, непременно образовывалось небольшое количество (порядка десятых долей процента) урана-232 - короткоживущего изотопа, распад которого приводил к появлению очень опасных радиоактивных “обломков”.

Реакторы General Atomics и Siemens обладали массой “детских болезней”, вызванных именно неотработанностью процессов. Окончательно же исследования в области ториевой энергетики “похоронила” катастрофа на Чернобыльской АЭС.

После 1986г. ассигнования на развитие “мирного атома” были резко сокращены, а все долгосрочные альтернативные проекты просто закрыты.

Единственной страной, где ториевые исследования все еще продолжались, была Индия. Обладая большими запасами тория (около 300 тыс. т, второй показатель в мире после Австралии), Индия еще в 50-е годы разработала оригинальную трехступенчатую программу развития атомной энергетики, в которой предполагалось задействовать эти ресурсы.

Так как Индия не подписала договор о нераспространении ядерного оружия, до недавнего времени ее атомная отрасль развивалась изолированно, а поставки урана в страну были запрещены. Не обладая значительными запасами урана, индийские атомщики предложили использовать имеющиеся скудные ресурсы этого ядерного топлива в реакторах первого уровня, где вырабатывался бы делящийся материал (уран-235 или плутоний-239). Его планировалось использовать в качестве источника нейтронов для ториевых реакторов второй стадии, а на них, в свою очередь, получался уран-233, который использовался бы в качестве ядерного топлива в реакторах третьего поколения.

Первую стадию своего плана Индия успешно реализовала, построив к настоящему времени более 20 ядерных реакторов, а вот со второй произошла заминка.

В 90-е годы индийские атомщики вышли из международной изоляции, что и объясняет снижение интереса к торю. Пока что достижения в этой области ограничиваются экспериментальным реактором мощностью 13 МВт на АЭС “Калпаккам”, где осуществляется выработка урана-233 из тория.

Однако в начале прошлого десятилетия ториевые разработки вышли из состояния “комы”. В настоящее время рассматриваются два перспективных направления, которые могут стать основой будущей ториевой ядерной энергетики.

Новые горизонты

Одну из перспективных технологий предложил нобелевский лауреат Карло Руббиа из Европейского центра по ядерным исследованиям (CERN). По его проекту предлагается использовать ториевое ядерное топливо, а в качестве “запала” применять ускоритель протонов. Попадая в атомы тория, протоны с высокой энергией вызывают их распад с выделением нейтронов, которые используются для стимулирования ядерных реакций. В качестве теплоносителя используется свинец.

По расчетам К. Руббиа, этот реактор будет генерировать достаточную энергию, чтобы не только питать ускоритель протонов, но и выдавать определенную мощность в сеть. При этом установка достаточно безопасна, поскольку выключение протонного ускорителя приводит к прекращению работы реактора (не считая распада промежуточных элементов).

В 2010г. норвежская компания Aker Solutions приобрела патент у К. Руббиа и уже приступила к проектированию реактора ADTR (субкритический реактор с ускорительной системой). Мощность установки оценивается в 600 МВт, ее стоимость, по предварительным данным, может превысить \$3 млрд с учетом всех предварительных исследовательских работ.

Реактор планируется разместить под землей, что даст возможность обойтись без мощного железобетонного защитного купола. Предполагается, что на одной загрузке ториевого топлива он сможет проработать несколько лет.

Однако КПД реактора К. Руббиа будет не очень высоким из-за использования энергоемкого ускорителя протонов, который будет забирать часть мощности.

США, Индии и Китае в последние годы рассматривается вариант, впервые предложенный американским физиком Элвином Вайнбергом еще в 60-х годах.

В этом реакторе типа LFTR (Liquid Fluoride Thorium Reactor) предлагается отойти от применения твердых топливных элементов и использовать в качестве теплоносителя расплавы солей - фторидов, в которых хорошо растворяются оксиды тория и урана. В таком реакторе рабочее давление составляет всего около 0.1 атм, что практически исключает возможность аварии вследствие разрыва корпуса (конечно, при условии, что его материал не поддастся коррозии).

Солевой расплав имеет температуру порядка 540 градусов, что дает возможность использовать все преимущества высокотемпературного реактора.

При этом система обладает способностью к саморегуляции. Если расплав перегревается, он расширяется в объеме, в результате в поле действия источника нейтронов (топливный элемент из плутония или урана-235) попадает меньше атомов тория, и реакция замедляется. При охлаждении смесь, соответственно, сжимается, что позволяет ускорить реакцию. Таким образом, ториевый реактор не требует наличия сложной системы управления, как на традиционных АЭС.

Проект позволяет организовать непрерывный вывод продуктов деления из зоны реакции и подпитку его свежим топливом. Это означает, что расплав с повышенным содержанием продуктов деления тория можно перекачать в отстойник, где будет происходить преобразование исходного материала в уран-233, который можно будет химическим путем отделить от непрореагировавшего тория и использовать в качестве ядерного топлива во второй активной зоне реактора. Впрочем, есть проекты, предусматривающие только одну активную зону с использованием в качестве ядерного топлива сначала тория, а потом - урано-ториевой смеси.

В ториевом реакторе весьма интересно решена проблема безопасности. Под корпусом реактора планируется установить бак, заткнутый "пробкой" из той же смеси фторидов, поддерживаемых в твердом состоянии благодаря непрерывному охлаждению. В случае отключения электроэнергии, как при аварии на "Фукусиме", охлаждение прекращается, "пробка" расплавляется, и смесь стекает в бак, где ядерная реакция прекращается из-за отсутствия источника нейтронов, а расплав остывает.

Важным преимуществом реактора LFTR является возможность создания установок небольшой мощности - вплоть до единиц мегаватт. По мнению эксперта канадской компании Accelerating Future Майкла Анисимова, такие небольшие реакторы, размещенные под землей, можно использовать в качестве "городских" или "районных" электростанций, способных работать годами при минимальном присмотре.

По оценкам М. Анисимова, стоимость 1-мегаваттного реактора составит около \$250 тыс, а для его работы будет достаточно всего 20 кг тория в год. Компания, установившая такой реактор, могла бы один раз в несколько лет проводить его обслуживание, выгружая использованное топливо и загружая новое.

В 2011г., всего за полтора месяца до катастрофического землетрясения в Японии, в Китае объявлено о запуске новой программы по созданию ториевой ядерной энергетики. Исследования будут проводиться под эгидой национальной Академии наук.

Через пять лет планируется создание рабочего прототипа, который мог бы генерировать энергию стоимостью не более 6.8 центов за 1 кВтч, а к 2030г. предполагается создание первой действующей ториевой АЭС.

О необходимости ускорить исследования в области ториевой энергетики в прошлом году было объявлено и в Индии. А после аварии на “Фукусиме” о тории заговорили и многие другие отраслевые специалисты.

Пробуждение интереса к торию объясняется несколькими причинами.

Во-первых, ториевые реакторы типа LFTR (похоже, эта технология пока считается наиболее перспективной) значительно безопаснее, чем традиционные урановые. Им не угрожают разрывы трубопроводов высокого давления охлаждающих систем из-за отсутствия таковых. В них можно полностью избежать использования воды, которая может разложиться на кислород и взрывоопасный водород. Они дают меньше радиоактивных отходов. Наконец, ториевый реактор, в отличие от уранового, не может “пойти в разнос”.

Во-вторых, тория в мире гораздо больше, чем урана. Именно опасность исчерпания резервов последнего является одним из весомых стимулов для развития ториевой энергетики в Китае и Индии, где в ближайшие четверть века планируется построить по несколько десятков ядерных реакторов.

В-третьих, потенциально использование тория может дать миру дешевую энергию. По расчетам М. Анисимова, стоимость энергии, генерируемой небольшими ториевыми реакторами, может составлять менее 1 цента за 1 кВтч - меньше, чем на любом другом энергоблоке.

Конечно, прежде чем строить ториевые реакторы, нужно решить массу проблем, начиная с создания целой отрасли по добыче тория и получения концентрированного оксида или чистого металла и заканчивая ураном-232 с его радиоактивными продуктами деления. Особые требования предъявляются и к корпусам, и трубопроводам, которые должны выдерживать температуру в сотни градусов и корродирующее действие раскаленного расплава солей при непрерывной работе на протяжении нескольких лет.

Пока ториевая ядерная энергетика остается в мире редкой экзотикой. По состоянию на сегодня, только Китай и Индия намерены проводить исследования в этой области, и первых практических результатов, очевидно, следует ожидать не скоро.

В СССР исследования в области ториевой атомной энергии проводились в Курчатовском институте. Продолжались они даже в 90-е годы. Более того, российским ученым принадлежит базовый патент на способ управления ториевым реактором и тепловыделяющую сборку для его осуществления. Однако его срок истекает в 2013г., а никаких практических шагов в этой области так и не было сделано и не предвидится в обозримом будущем. Тем не менее, Россия входит в первую мировую десятку по запасам тория, а в начале 50-х была налажена даже его промышленная добыча. Технологии по получению металлического тория и его соединений не утрачены до сих пор.

К тому же Украина располагает месторождением монацитовых песков (монацит - самый распространенный минерал тория, содержащий до 10% металла) - титано-циркониевые россыпи на юге Донецкой области.

Даже после “Фукусимы” человечество вряд ли откажется от ядерной энергии.

Но использование тория в перспективе может сделать ее более дешевой и безопасной.

Впервые торий выделен Й. Берцелиусом в 1828 году из минерала, позже получившего название торит (содержит силикат тория). Торий был назван его первооткрывателем по имени бога грома Тора в скандинавской мифологии.

Торий почти всегда содержится в минералах редкоземельных элементов, которые служат одним из источников его получения. Содержание тория в земной коре 8 - 13 г/т, в морской воде 0,05 мкг/л. В магматических породах содержание тория уменьшается от кислых (18 г/т) к основным (3 г/т). Значительное количество тория накапливается в связи с пегматитовыми и постмагматическими процессами, при этом его содержание увеличивается с повышением количества калия в породах.

Основная форма нахождения тория в породах в виде основной составной части уран-ториевых, либо изоморфной примеси в акцессорных минералах. В постмагматических процессах в определённых благоприятных условиях (обогащённость растворов галогенами, щелочами и углекислотой) торий способен мигрировать в гидротермальных растворах и фиксироваться в скарновых уран-ториевых и гранат-диопсидовых ортитсодержащих месторождениях. Здесь главными минералами тория являются монацитовый песок и ферриторит. Накапливается торий также в некоторых грейзеновых месторождениях, где он концентрируется в ферриторите либо образует минералы, содержащие титан, уран и др. Входит в состав, в виде примесей, наряду с ураном, в почти любые слюды, (флогопит, мусковит и др.) - породообразующих минералов гранита.

Поэтому граниты некоторых месторождений (ввиду слабой, но при длительном воздействии на человека опасной радиации) запрещено использовать в качестве наполнителя для бетона при строительстве.

Торий содержится в основном в 12 минералах. На 2012 г. известны 30 изотопов тория и еще 3 возбуждённых метастабильных состояния некоторых его нуклидов.

Только один из нуклидов тория (торий-232) обладает достаточно большим периодом полураспада по отношению к возрасту Земли, поэтому практически весь природный торий состоит только из этого нуклида. Некоторые из его изотопов могут определяться в природных образцах в следовых количествах, так как входят в радиоактивные ряды радия, актиния и тория.

Наиболее стабильными изотопами являются ^{232}Th (период полураспада составляет 14,05 миллиардов лет), ^{230}Th (75 380 лет), ^{229}Th (7340 лет), ^{228}Th (1,9116 года).

Оставшиеся изотопы имеют периоды полураспада менее 30 дней (большинство из них имеют периоды полураспада менее 10 минут).

При получении тория торийсодержащие монацитовые концентраты подвергают вскрытию при помощи кислот или щелочей. Редкоземельные элементы извлекают экстракцией с трибутилфосфатом и сорбцией. Далее торий из смеси соединений металлов выделяют в виде диоксида, тетрахлорида или тетрафторида.

Металлический торий затем выделяют из галогенидов или оксида методом металлотермии (кальций-, магний- или натрийтермии) при 900-1000 °С:

электролизом ThF_4 или KThF_5 в расплаве KF при 800 °С на графитовом аноде.

Применение.

Торий имеет ряд областей применения, в которых подчас играет незаменимую роль. Положение этого металла в Периодической системе элементов и структура ядра предопределили его применение в области мирного использования атомной энергии.

Очищенный торий.

Торий-232 - чётно-чётный изотоп (чётное число протонов и нейтронов), поэтому не способен делиться тепловыми нейтронами и быть ядерным горючим.

Но при захвате теплового нейтрона ^{232}Th превращается в ^{233}U по схеме:
 $^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{Th} - (\beta^-) \rightarrow ^{233}\text{Pa} - (\beta^-) \rightarrow ^{233}\text{U}$.

Уран-233 способен к делению подобно урану-235 и плутонию-239, что открывает более чем серьёзные перспективы для развития атомной энергетики (уран-ториевый топливный цикл, реакторы на быстрых нейтронах). В атомной энергетике применяются карбид, оксид и фторид тория (в высокотемпературных жидкосолевых реакторах) совместно с соединениями урана и плутония и вспомогательными добавками.

Так как общие запасы тория в 3-4 раза превышают запасы урана в земной коре, то атомная энергетика при использовании тория позволит на сотни лет полностью обеспечить энергопотребление человечества.

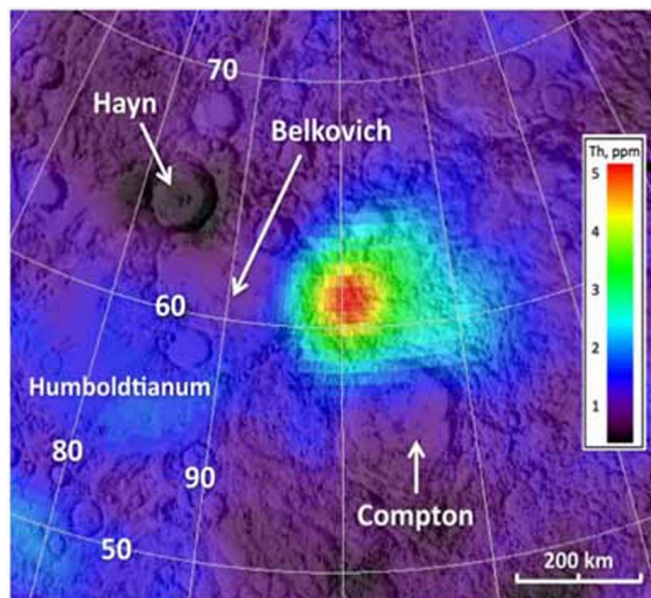
Кроме атомной энергетики, торий в виде металла с успехом применяется в металлургии (легирование магния и др.), придавая сплаву повышенные эксплуатационные характеристики (сопротивление разрыву, жаропрочность). Отчасти торий в виде окиси применяется в производстве высокопрочных композиций как упрочнитель (для авиапромышленности). Оксид тория из-за его наивысшей температуры плавления из всех оксидов (3350 К) и неокисляемости идёт на производство наиболее ответственных конструкций и изделий, работающих в сверхмощных тепловых потоках, и может быть идеальным материалом для облицовки камер сгорания и газодинамических каналов для МГД-электростанций. Тигли, изготовленные из окиси тория, применяются при работах в области температур около 2500-3100 °С. Ранее оксид тория применялся для изготовления калильных сеток в газовых светильниках.

Торированные катоды прямого накала применяются в электронных лампах, а оксидно-ториевые - в магнетронах и мощных генераторных лампах. Добавка 0,8-1 % ThO_2 к вольфраму стабилизирует структуру нитей ламп накаливания. Ксеноновые дуговые лампы почти всегда имеют торированные катод и анод, поэтому незначительно радиоактивны. Оксид тория применяется как элемент сопротивления в высокотемпературных печах. Торий и его соединения широко применяют в составе катализаторов в органическом синтезе.

Цена тория уменьшилась до 73,37 \$/кг (2009), по сравнению с 96,55 \$ (2008).

Торий постоянно присутствует в тканях растений и животных. Коэффициент накопления тория (то есть отношение его концентрации в организме к концентрации в окружающей среде) в морском планктоне - 1250, в донных водорослях - 10, в мягких тканях беспозвоночных - 50-300, рыб - 100. В пресноводных моллюсках его концентрация колеблется от $3 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-5}$ %, в морских животных от $3 \cdot 10^{-7}$ до $3 \cdot 10^{-6}$ %.

Торий поглощается главным образом печенью и селезёнкой, а также костным мозгом, лимфатическими узлами и надпочечниками; плохо всасывается из желудочно-кишечного тракта. У человека среднесуточное поступление тория с продуктами питания и водой составляет 3 мкг; выводится из организма с мочой и калом (0,1 и 2,9 мкг соответственно). Торий малотоксичен, однако как природный радиоактивный элемент вносит свой вклад в естественный фон облучения организмов.



Залежи тория на Луне.