

Торий – перспективный сырьевой ресурс атомной энергетики

Г. А. Пельмский¹, д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник

В. М. Котова², д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник

П. А. Чехович¹, д-р геол.-минерал. наук, зав. сектором
p.chekhovich@gmail.com

И. М. Капитонов¹, проф., д-р физ.-мат. наук

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

² ОАО ВНИИХТ

Даны обобщенный анализ сырьевых источников тория в мире и характеристика минерально-сырьевой базы тория в России. Рассмотрены возможности его использования в атомной энергетике применительно к реакторам разных типов. Дан краткий обзор технологий переработки торийсодержащих руд, извлечения тория из различных видов минерального сырья. Освещен опыт фабрикации топлива на основе тория. Приведены примеры мировой практики использования тория на АЭС.

Ключевые слова: торий, торийсодержащие месторождения, извлечение тория, монацит, лопарит, уран, атомная энергетика, реакторы ядерные, термоядерные, гибридные, топливный цикл, МАГАТЭ.

Введение

Ход развития современной энергетики показывает, что в ближайшем будущем ведущая роль в формировании ее сырьевой базы постепенно перейдет к твердым полезным ископаемым (ТПИ) — каменному углю и рудам радиоактивных элементов. Эти оценки основаны на том, что естественная среда обитания уже не в состоянии справиться с негативными последствиями техногенного воздействия. Традиционный способ получения энергии из углеводородного сырья, возможно, вскоре приведет к тому, что количество выбросов не сможет компенсироваться саморегуляцией в экологических системах. Несмотря на то, что сроки полного истощения рентабельных эксплуатируемых запасов нефти и газа, по всей видимости, отодвигаются на несколько десятилетий, неизбежное удорожание их добычи станет еще одним лимитирующим фактором в крупномасштабном использовании этих ресурсов. Сказанное означает, что ключевым компонентом в энергосистемах завтрашнего дня должны стать атомные электростанции (АЭС). В настоящее время их доля в энергобалансе составляет почти 16 %, а в некоторых странах (например, во Франции) ядерная энергетика уже является базовой отраслью, поскольку производит более половины электроэнергии.

Вместе с тем практика эксплуатации современных энергоблоков, работающих на основе открытого уран-плутониевого топливного цикла, продемонстрировала, что в существующем виде они исчерпали перспективы своего развития не только по экологическим и инженерно-техническим, но и по экономическим показателям. В частности, по оценкам экспертов, к 2010 г. на всех АЭС мира было наработано более 300 тыс. т облученного топлива, содержащего около 3 тыс. т плутония [25]. По сути, это означает, что ядерная энергетика отправляет на захоронение больше радиоактивности, чем извлекается из недр. Кроме того, за последние десятилетия (1979–2011 гг.) прямой и косвенный ущерб от тяжелых аварий на АЭС оказался соизмеримым с суммарными инвестициями в эту отрасль

[27, 34]. Эти и многие другие негативные факторы привели к тому, что начиная с конца 70-х годов прошлого столетия ядерная энергетика стала объектом нарастающей критики (часто не вполне обоснованной и компетентной) со стороны общественных экологических организаций и СМИ. В результате правительства ряда государств (Швеции, Италии, Бразилии, Германии) были вынуждены существенно сократить свои ядерные программы или даже полностью отказаться от них, вернувшись к традиционной энергетике либо переключившись на импорт электроэнергии и дополнительно инвестируя в технологии на основе возобновляемых источников. В странах, которые не отказались от использования ядерной энергетике, в этой ситуации возрождается интерес к использованию уран-ториевого топливного цикла. Он широко испытывался «на заре» атомного века в исследовательских реакторах, пока не выяснилась его бесперспективность в аспектах военного применения. Что же касается использования тория в энергетике, то, по общему мнению специалистов, он способен устранить многие негативные эффекты уран-плутониевого цикла: повысить безопасность эксплуатации реакторов, сократить оборот оружейных ядерных материалов и упростить контроль над ним, эффективно утилизировать потенциально опасные радионуклиды непосредственно в процессе сжигания топлива, минимизировать потребление природного сырья.

Проблемы энергетики и использование тория

В мировой практике торий фактически остается невостребованным, хотя его использование в ядерной энергетике неоднократно рассматривалось Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), при котором был специально создан Технический комитет по внедрению ядерного топлива на основе тория. Задачей Комитета являлось изучение состояния мировых ресурсов тория, активизация дальнейших исследований в области технологии тория в различных

типах реакторов, проведение фундаментальных исследований в области производства и воспроизводства топлива на основе тория [22, 23, 31, 32, 35, 39, 43].

Многие из государств – членов МАГАТЭ располагают значительными по объему ториевыми ресурсами, превышающими запасы урана. Торий как энергетическое сырье может значительно увеличить общий потенциал ядерной энергетики [6, 9]. В настоящее время интерес к торию как возможному ресурсу развития атомной энергетики возобновился. Это выразилось в увеличении количества научных разработок по освоению тория в целом – начиная от оценки сырьевой базы и заканчивая экономикой его использования.

Оценка значимости тория для атомной энергетики и масштабов его освоения включает решение следующих вопросов: разработку базового варианта развития атомной энергетики; определение места ториевого топлива в ее структуре; прогноз потребностей в ториевом топливе; оценку состояния сырьевой базы и возможностей удовлетворения потребностей; совершенствование технологий переработки сырья и получения конечного продукта.

Развитие российской ядерной энергетики планировалось по нескольким возможным вариантам. В будущем ее доля в энергетических системах страны может достигнуть 30 % их общей мощности. Декларируемые запасы урана позволяют ядерной энергетике России использовать тепловые реакторы до середины XXI в. После 2030 г. запланирована их замена более совершенными, но и более дорогостоящими реакторами на быстрых нейтронах (БН). В то же время вовлечение тория как ядерного топлива и использование ^{233}U позволяет продлить жизненный цикл тепловых реакторов. По расчетам специалистов, реакторы типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) современной конструкции не в состоянии обеспечить себя изотопом ^{233}U (аналог плутония в ториевом топливном цикле), поскольку расходует большое количество плутония на производство ^{233}U . Поэтому предполагалось, что быстрые реакторы должны взять на себя также функции подпитки системы изотопом ^{233}U [6, 9].

Разработать рекомендации по конкретным типам реакторов для реализации ториевого цикла в долгосрочной перспективе сложно. Простейшим решением является использование уже освоенных в СНГ типов реакторов (ВВЭР, БН). Однако за рубежом уже разработаны и реализованы на практике реакторы, предназначенные специально для использования ториевого топлива (табл. 1–3).

По сумме технических показателей и экономическим данным необходимо проанализировать системы иных типов реакторов. Весьма важной представляется разработка реактора на ^{233}U –Th топливе, обладающего улучшенными характеристиками по воспроизводству и требуемыми уровнями безопасности и экономичности. Специалистами Физико-энергетического института им. акад. А. И. Лейпунского (ФЭИ) разработаны сценарии начального вовлечения тория в ядерно-энергетическую систему России, показывающие, что привлечение быстрых реакторов для наработки делящегося изотопа ^{233}U позволит полностью решить задачу создания сбалансированной энергетики [5, 7].

При замыкании топливного цикла на ^{233}U –Th нужно ориентироваться на автоматизированное (дистанционное) получение топлива. По-видимому, линии по изготовлению топлива на основе ^{233}U могут базироваться на решениях, принимаемых для производства

Таблица 1. Легководные реакторы, работавшие с ториевым топливом на АЭС в США [5]

АЭС, реактор	Тип реактора по классификации МАГАТЭ	Мощность (тепл/эл.), МВт	Топливо	Период работы
Elk River	BWR	60/24	ThO ₂ – UO ₂ (93 % обог. U)	1964–1968
Indian Point	PWR	615/285	ThO ₂ – UO ₂ (93 % обог. U)	1962–1974
LWBR	PWR	237/60	ThO ₂ – $^{233}\text{UO}_2$	1977–1982

Таблица 2. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (HTGR), работавшие с ториевым топливом* на АЭС в США и Западной Европе [9]

АЭС, реактор	Мощность (тепл/эл.), МВт	Температура гелиевого теплоносителя, °C (вход/выход)	Период работы
<i>Экспериментальные реакторы</i>			
Dragon, Англия	20/0	350/710	1966–1975
Peach Bottom, США	115/40	377/750	1967–1974
AVR, Германия	46/15	270/950	1968–1988
<i>Реакторы-прототипы</i>			
Fort St. Vrain, США	837/330	400/785	1976–1989
THTR, Германия	750/300	270/750	1985–1989

*Топливный сердечник микросфер – (Th–U)O₂.

Таблица 3. Основные топливные характеристики российских реакторов при использовании ториевого топлива [6]

Тип реактора	Подпитка плутонием, т/год	Ежегодная выдача ^{233}U + ^{233}Pu , т/год	Содержание ^{232}U в выгружаемом уране, прт	Подпитка ^{238}U , т/год	Ежегодный возврат Pu, т
<i>Реакторы-наработчики ^{233}U</i>					
БН-800 с Th в боковом экране	1,86	0,18	–100		1,79
ВВЭР-1000 на PuO ₂ –ThO ₂ топливе	1,8	0,29	–3300		0,95
<i>Реакторы-потребители ^{233}U</i>					
ВВЭР-1000 на $^{233}\text{UO}_2$ –ThO ₂ топливе		0,48	–3000	0,85	
ВВЭР-1000 на $^{233}\text{UO}_2$ – $^{238}\text{UO}_2$ топливе		0,11	–3000	0,61	0,26
ВВЭР-1000 на $^{233}\text{UO}_2$ –PuO ₂ – $^{238}\text{UO}_2$ топливе*	0,36	0,11	–3000	0,40	0,37

*С оружейным плутонием.

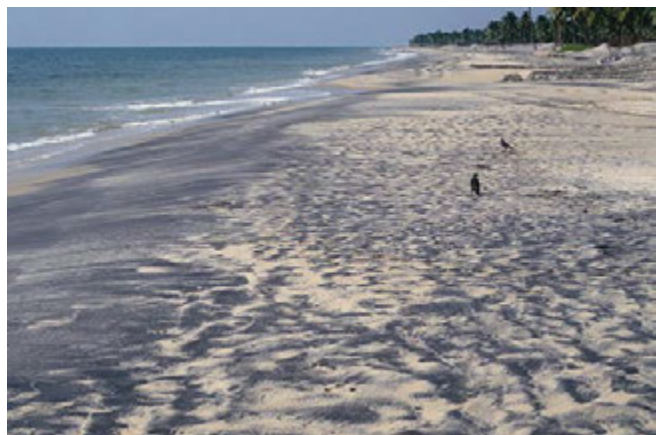
топлива из энергетического плутония, но технические и экономические проработки этого вопроса пока недостаточны. В сложившейся ситуации специалисты исходят из предположения, что весь природный торий (^{232}Th) должен расходоваться на создание начальных загрузок и подпитку активных зон или зон воспроизводства реакторов. Учитывая эпизодический характер перегрузки топлива и установленный регламентом 30-летний срок эксплуатации реактора, можно оценить максимальное ежегодное потребление тория в легководных реакторах в пределах 13 тыс. т. Анализ также показал, что все варианты с переходом ядерной энергетики на режим самообеспечения с применением физически безопасных реакторов могут быть реализованы с использованием тория в качестве дополнительного топлива в сочетании с утилизируемым плутонием [6, 9].

Складские запасы энергетического тория в нашей стране никогда не создавались. Не существует и сырьевой базы тория с утвержденными по промышленным категориям запасами, сопоставимыми по степени готовности с урановыми или редкометалльными, так как в течение более чем 40 лет, т. е. ни в советское время, ни в более поздние годы, не проводились специальные поисковые и поисково-разведочные работы на торий [2, 3, 24, 35–38]. В то же время практически все редкометалльные месторождения являются комплексными ториеносными. Использование тория в качестве ядерного горючего не потребует создания отдельной индустрии по добыче и переработке природного и техногенного сырья, если для переработки будут использованы руды с оптимальным соотношением тория и редких металлов (TR). Это снимет многие экологические проблемы, связанные с процессами добычи на месторождениях радиоактивных элементов.

Формы нахождения в природе.

Основные рудные минералы

Торий (лат. Thorium) — радиоактивный элемент III группы периодической системы Менделеева, первый член семейства актиноидов, химический символ Th,



Черные пески — пляжевая россыпь монацита на берегу Индийского океана. Индия, шт. Керала. Фото Yvon Maurice (Источник: <http://www.panoramio.com/>)

атомный номер 90, атомная масса 232,038. Торий был открыт в 1828 г. И. Я. Берцелиусом в сиенитах Норвегии и назван по имени бога грома в скандинавской мифологии — Тора. Природный торий состоит практически из одного долгоживущего изотопа ^{232}Th , который является родоначальником одного из радиоактивных рядов и имеет период полураспада $1,39 \times 10^{10}$ лет. Конечный продукт естественного радиоактивного распада тория — изотоп свинца ^{208}Pb .

По химическим свойствам торий близок к элементам IV группы периодической системы (Ti, Zr, Hf). С другой стороны, он принадлежит группе актиноидов и присутствует в качестве примеси более чем в 100 минералах. Наиболее характерными концентраторами тория являются монацит (3,5–10 %), ортит, титанаты, сфен, апатит. В небольших количествах торий присутствует в цирконе. По величине заряда и ионного радиуса торий очень близок к урану (U^{4+} , $r_i = 0,89 \text{ \AA}$), что объясняет их частое совместное нахождение в породах и минералах.

Торий является типичным литофильным элементом и встречается в природе только в кислородных соединениях (окислах, силикатах, фосфатах, карбонатах, фторкарбонатах) с преобладающим ионным типом связи. Торийсодержащие минералы в своем большинстве устойчивы в зонах окисления, поэтому в экзогенных условиях образуют промышленно значимые месторождения. Значительные содержания тория (до 13 % по массе) наблюдаются в сложных окислах титана, тантала, ниобия (пироклор, эшинит, эвксенит, самарскит, чевкениит и др.). Важнейшие собственные минералы — торит (содержание металла — до 77 %) и торионит (45–93 %).

Торий — характерный элемент верхней части земной коры: гранитного слоя и осадочной оболочки, где его среднее содержание составляет, соответственно, $1,8 \times 10^{-3}$ и $1,3 \times 10^{-3}$ % по массе. В земной коре его массовая доля равна 8×10^{-3} % — это примерно столько же, сколько свинца, и в несколько раз больше, чем урана. Торий — сравнительно слабомигрирующий элемент: в основном он участвует в магматических процессах, накапливаясь в гранитах, щелочных породах и пегматитах. Его способность к концентрации слабая. Особенно мало тория в природных водах: в пресной — 2×10^{-9} %, в морской — 1×10^{-9} %. Он очень слабо мигрирует в биосфере и гидротермальных процессах.

Общая характеристика месторождений и состояние запасов тория

Торий извлекается в качестве попутного компонента из комплексных полиметаллических руд обычно совместно с Nb, Ta, Zr, U, TR. Его содержание в этих рудах колеблется от сотых до десятых долей процента. Месторождения тория имеют в основном осадочное, осадочно-метаморфогенное, гидротермальное и скарновое

происхождение. В настоящее время основным источником тория являются монацитовые россыпи (морские и континентальные). Крупнейшие прибрежно-морские россыпи имеются в Индии (среднее содержание монацита в песках 0,75 %) и Бразилии (от 2 до 5 %). Самое известное месторождение ураноторианита находится на о. Мадагаскар. Мировые запасы тория (доступные для добычи) составляют 1,2 млн т. (табл. 4)

Концентрации монацита в россыпях выявлены в Украине (на юге Донецкой области монацит добывают из титаноциркониевых россыпей [17]), и в России.

На территории России активная добыча ториевых руд началась после окончания Великой Отечественной войны. В 1946 г. постановлением советского правительства в Министерстве цветной металлургии СССР было создано специализированное управление, задачей которого являлось руководство предприятиями по добыче ториевых руд, получению оксида и металлического тория для наработки изотопа ^{233}U в специальных ядерных реакторах. Проект предусматривал выплавку 70 т металлического тория к середине 1949 г. и производство солей тория до 130 т/год. В 1949 г. в Алданском районе Якутии на месторождении монацитовых песков с запасами тория более 1000 т была начата его добыча. В 1977 г. на химико-металлургическом заводе в Красноярском крае был создан участок по получению оксида тория и металлического тория, а с 1985 г., после реконструкции завода, освоен новый вид продукции — нитрат тория.

Запасы тория в странах СНГ на исходе прошлого столетия в целом оценивались в 1,7 млн т. Часть этих ресурсов (8,67 %) заключена в эндогенных месторождениях, обычно комплексных, крупных и уникальных по масштабам, с массовой долей тория в рудах, как правило, 0,01–0,1 %, редко — выше. Руды с содержанием от 0,1 до 2 % и более составляли в балансе ресурсов 4,4 %. На долю урановых месторождений с торием, содержащих убогие и бедные торием руды, в общем балансе приходится 3,1 %. В комплексных погребенных россыпях ресурсы тория составляют 5,8 %. Наряду с 241 месторождением на территории стран СНГ учтены еще 40 рудопроявлений с богатыми рудами, но невыясненными масштабами оруденения.

Возможным источником получения тория в России являются и печально известные монацитовые концент-

Таблица 4. Мировые запасы тория, доступные для добычи, тыс. т [40, 41]

Страна	По данным USGS* (2010 г.)	По данным МАГАТЭ (2007 г.)
США	440	400
Австралия	300	489
Бразилия	16	302
Канада	100	44
Индия	290	319
Малайзия	45	—
ЮАР	35	18
Венесуэла	—	300
Норвегия	—	132
Египет	—	100
Россия	—	75
Гренландия	—	54
Другие страны	90	33
Всего	1300	2610

*United States Geological Survey – Геологическая служба США.

раты, более 50 лет хранящиеся на складах предприятия ОГУ «УралМонацит»*, расположенных в 12 км от г. Красноуфимска (Свердловская область). Этот объект — своего рода памятник бесхозяйственности советской эпохи. Концентрат доставлялся сюда с месторождений России, Монголии, Китая и Вьетнама и складировался в бревенчатых пакгаузах постройки 1941–1942 гг. (ранее в них хранились стратегические запасы продовольствия), находившихся в ведении Главного управления материальных резервов Совмина СССР. Всего в 19 деревянных и в 4 дополнительно построенных металлических складах хранится 82 тыс. т концентрата (около 800 партий концентрата,

несколько отличающихся по химсоставу). Первоначально его предполагалось использовать для нужд атомной промышленности, но выбор уран-плутониевого цикла привел к утрате интереса к монациту, и о ценнейшем продукте надолго забыли. После 1991 г., когда Россия вместе с сырьевыми источниками редкоземельных элементов (РЗЭ) потеряла также часть предприятий, на которых это сырье перерабатывалось, перспектива красноуфимского монацитового резерва оказалась еще более неопределенной.

В 1997 г. собственник концентрата — правительство Свердловской области совместно с Минатомом России приняло решение о создании комплекса по переработке монацита. Предполагалось, что специально созданное акционерное предприятие в течение 20-летнего периода переработает монацитовый песок, выделит и разделит РЗЭ, начнет производство продукции с использованием редкоземельных металлов (РЗМ), а также произведет ториевое топливо для бридерного реактора БН-600 на Белоярской АЭС. Технология производства в Красноуфимске предусматривала вскрытие монацитового концентрата, разделение радиоактивных элементов тория и урана, получение суммарного дезактивированного редкоземельного концентрата, а также реабилитацию территории, где располагались склады с концентратом. В настоящее время прорабатывается вопрос о включении проекта по переработке монацитового концентрата в ФЦП «Развитие производства редких и редкоземельных металлов на 2012–2015 годы и перспективу до 2020 года» [8, 10, 16], а также в технологическую платформу «Освоение сырьевых и техногенных источников, создание про-

* До 1994 г. хранилище в разные годы значилось как предприятие п/я 118, предприятие «Каменный пояс», филиал предприятия п/я 6572, филиал комбината «Победа» Госкомрезерва РФ.

изводственных мощностей редкоземельной и редкометалльной продукции в Российской Федерации». Проект по переработке складских запасов монацитового концентрата является важным составным элементом Уральского технологического кластера по получению и применению РЗМ, создаваемого Министерством промышленности и науки Свердловской области. Разработка проекта ведется совместно с Уральским отделением РАН, Уральским федеральным университетом, ГУП СО «УралМонацитТехно» и Госкорпорацией «Росатом» [26]. Предполагается также, что красноуфимский монацит может найти применение в производстве на территории особой экономической зоны (ОЭЗ) «Титановая долина» под Верхней Салдой. Переговоры по проекту создания комплекса по переработке монацитового концентрата на территории ОЭЗ уже ведутся с потенциальными партнерами из Японии, США, ряда европейских стран. При этом в числе продуктов переработки этого сырья указываются не только РЗМ, пользующиеся высоким спросом на мировом рынке, но и ториевый концентрат как стратегический ресурс для развития атомной энергетики на быстрых нейтронах [4].

Состав монацитового концентрата (рис. 1) изучался минералогами Уральского отделения РАН. Было установлено, что средняя объемная доля монацита в концентратах составляет 78–97 %. Концентрат в среднем содержит до 7,8 % ThO_2 и следующие РЗМ (%): La (13), Ce (23), Pr (3), Nd (11), Sm (1), Eu (0,1), Gd (0,6), Tb (0,4), Dy (0,2), Ho (0,05), Er (0,2), Tm (0,05), Yb (0,03), Lu (0,05), Y (0,8). Общим для всех изученных разновидностей монацита является преимущественно цериевый состав лантаноидов. Содержания изоморфных примесей тория как в пределах зерен, так и в разновидностях



Рис. 1. Монацит крупной фракции из проанализированных партий концентрата, отобранного в хранилище ОАО «УралМонацит» [14]

монацита оказались весьма изменчивыми. Вместе с содержанием тория меняются и содержание кремния, что связано с изоморфизмом монацита и хаттонита $\text{Th}[\text{SiO}_4]$. Были выявлены также зональное строение кристаллов по содержанию ThO_2 и тенденция уменьшения содержания тория к периферии кристаллов. Высокие концентрации ThO_2 (массовая доля до 25 %) и SiO_2 (до 4,25 %) на локальных участках обусловлены вростками хаттонита [16].

В связи с опасностью неблагоприятного воздействия на окружающую

среду в 2005 г. над обветшавшими хранилищами монацитового концентрата началось сооружение металлических ангаров. В настоящее время ангары сданы в эксплуатацию, вокруг территории возведено бетонное ограждение, устроены контрольно-пропускные пункты, по периметру объекта установлена система сигнализации и видеонаблюдения.

Промышленные типы месторождений тория и основные эпохи металлонакопления

Месторождения тория, как правило, комплексные: ториево-редкоземельные, ториево-редкометалльные, ториево-редкометалльно-редкоземельные, ториево-урановые. Среди них выделяются несколько типов собственно ториевых, составляющих три генетические группы [35]. Первая включает две рудные формации: *ториево-редкоземельно-редкометалльную* в агапитовых нефелиновых сиенитах натровой линии и *ториево-редкометалльно-редкометалльную* (с ураном) в карбонатах и метасоматитах щелочно-ультраосновных комплексов. Во вторую группу входят четыре формации: *редкоземельно-ураноториевая* в кварц-полевошпатовых метасоматитах калиевой линии, *ториево-редкометалльная* в кварц-полевошпатовых метасоматитах натриевой линии, *цирконий-торий-фосфорно-урановая* в эйситах и карбонатных метасоматитах и *торий-редкоземельная* в барит-флюорит-карбонат-кварцевых гидротермалитах (метасоматическая и жильная). Третья группа представлена двумя формациями, возникшими в результате экзогенного разрушения и перетолжения материала эндогенных месторождений: это главным образом *современные прибрежно-морские россыпи и коры выветривания*.

Ториевое рудообразование проявилось в течение докембрийского и фанерозойского мегациклов в позднем протерозое, среднем палеозое, верхнем палеозое-мезозое и в неоген-четвертичное время. Каждая из перечисленных эпох характеризуется своими ведущими типами рудных формаций.



Возведение защитного ангара над обветшавшим хранилищем монацитового концентрата (Источник: www.monazit.ru)

Эндегенная геохимическая концентрация тория в истории геологического развития имеет два максимума. Первый связан с раннепротерозойской гранитизацией и возникновением высокотермических гранитов на завершающих стадиях. Этот этап характеризуется наибольшим количеством рудопроявлений и накоплением тория в акцессорных минералах, реже — в форме самостоятельных минералов. Ториевое эндогенное рудообразование сопутствует эпигенетическим щелочным и субщелочным комплексам в зонах тектономагматической активизации, которые закономерно эволюционировали в направлении литофильной и щелочнометалльной дифференциации, существенно обогащаясь торием. Его ресурсы в протерозойских месторождениях связаны преимущественно с метаморфогенными калиевыми и натриевыми метасоматитами. Второй максимум приходится на середину фанерозоя (с девона по триас), когда сформировались многочисленные месторождения ториеносных карбонатитов, альбититов и гидротермальных месторождений. По масштабам ториевого оруденения пермо-триасовое время является ведущей ториеносной эпохой. Она представлена месторождениями в кварц-полевошпатовых метасоматитах натриевой линии (в альбититах) и в лопаритах плутогенного генезиса. Второй по значимости можно считать девонскую эпоху, третьей — неоген-четвертичную.

Проблемы освоения торийсодержащих месторождений

Уровень изученности территории России и стран СНГ в отношении тория значительно ниже, чем в отношении урана. Ситуация, однако, не выглядит безнадежной благодаря тому, что при широком опосредованном поиске территорий на другие полезные компоненты существует ряд источников накопления попутной информации: в частности, широкомасштабные геологические, геофизические, технологические работы на уран и редкие металлы.

С 1956 г. во ВНИИХТ проводились систематические исследования по оценке как конкретных месторождений, так и общей сырьевой базы тория, возможностей ее использования в рамках программ по развитию ядерной энергетики, выделению генетических и промышленных типов месторождений, созданию технологий переработки торийсодержащих руд, извлечению тория, конструированию тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) и другим проблемам. Из учтенных на территории РФ торийсодержащих комплексных редкоземельных

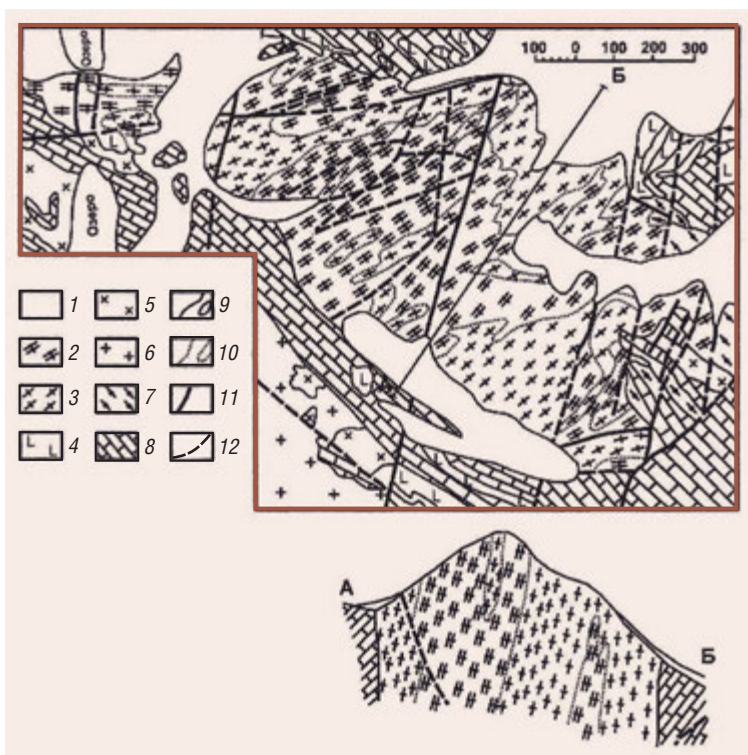


Рис. 2. Схематическая геологическая карта и разрез месторождения Улуг-Танзек, расположенного в Юго-Восточной Туве, в северной части нагорья Сангилен (составлены с использованием данных геологоразведочных работ):

1 — четвертичные отложения; 2, 3 — кварц-альбит-микроклиновые метасоматиты: полислюдистые (2) и рибекитовые (3); 4 — субщелочные граниты и кварцевые сиениты позднего палеозоя-мезозоя; 5 — диориты и кварцевые диориты раннего палеозоя; 6 — биотитовые и лейкократовые граниты позднего протерозоя; 7 — позднепротерозойские сланцы и гнейсы; 8 — позднепротерозойские мраморы и мраморизованные известняки; 9, 10 — геологические границы: установленные (9) и предполагаемые (10); 11, 12 — разрывные нарушения: установленные (11) и предполагаемые (12)

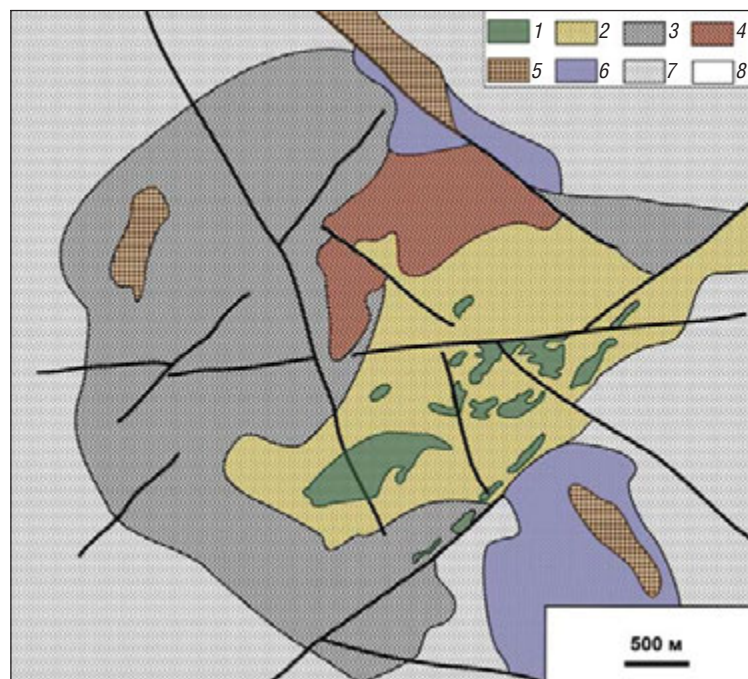


Рис. 3. Схематическая геологическая карта Кийского массива щелочных пород (Енисейский край) [18]:

1 — штокверковые зоны карбонатных прожилков с редкоземельной минерализацией; 2 — сиенит-порфиры с вкрапленностью карбонатов; 3 — нефелиновые сиениты; 4 — пироксеновые, амфибол-пироксеновые, нефелин-пироксеновые породы; 5 — кератофиры, кварцевые кератофиры, туфогенные породы; 6 — песчаники, известняки, аргиллиты верхнего кембрия; 7 — гранитогнейсы, кристаллические сланцы нижнего протерозоя; 8 — разрывные нарушения

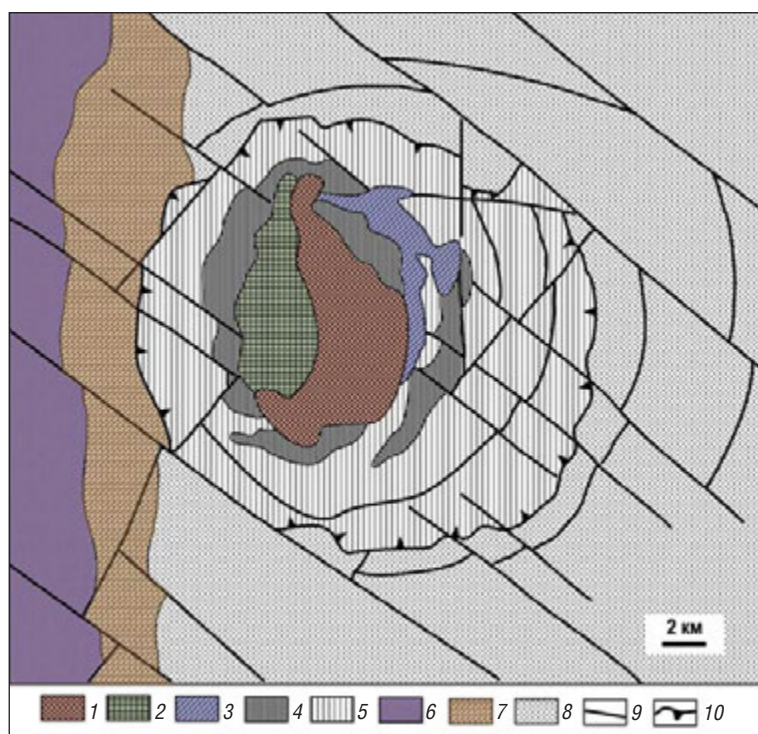


Рис. 4. Схематическая геологическая карта массива Томтор (Северо-Западная Якутия) со снятым покровом позднепалеозойских пород осадочного чехла [18, 29; с изменениями]:

1 – рудоносные карбонаты; 2 – безрудные карбонаты; 3 – карбонатитоиды; 4 – ийолит-мельтейгиты; 5 – нефелиновые и щелочные сиениты; 6 – кембрийские породы; 7 – томторская свита, венд; 8 – рифейские отложения; 9 – разрывные нарушения; 10 – граница массива Томтор

месторождений и рудопоявлений ресурсы тория были оценены на 180 объектах: это монацитовые россыпи четвертичного возраста, лопаритовые россыпи, эндогенные редкоземельные месторождения и рудопро-

явления, а также комплексные монацит-циркон-ильменитовые третичные и более древние ископаемые россыпи. В результате проведенных работ прогнозные ресурсы тория в россыпях на территории РФ оцениваются величиной до 1 млн т. При возобновлении специальных поисково-разведочных работ на торий структура сырьевой базы может существенно измениться за счет увеличения в балансе роли собственно ториевых месторождений.

Возможные современные и будущие источники тория наиболее хорошо изучены на Ловозерском (содержание Th в руде – 0,02 %) и Улуг-Танзекском (0,1 %) коренных месторождениях (рис. 2), а также на Кийском (0,4 %) месторождении в коре выветривания карбонатов (рис. 3). Пока недостаточно изучены криолит-редкоземельно-редкометалльное Катугинское и пироксено-монацитовое Томторское месторождения (рис. 4), где содержания тория находятся в пределах 0,0191–0,3044 % [24], а также торит-ксенотимовые месторождения Северо-Байкальского рудного поля, некоторые россыпи и техногенные образования (табл. 5). Из последних наиболее перспективным считается Туганское россыпное месторождение циркон-

ильменитовых песков, залегающее в основании кайнозойского чехла в юго-восточном обрамлении Западно-Сибирской плиты. Месторождение выявлено в 1950-х годах при поисках сырья для стекольного производства. К 1961 г. была проведена его геолого-экономическая оценка с подсчетом и утверждением запасов. В начале 1990-х годов на месторождении были уточнены вещественный состав и технологические свойства рудных песков, выявлены содержания рассеянных элементов в концентратах и минералах. Выяснилось, что запасы месторождения позволяют обеспечить переход на ториевый цикл всех 29 энергоблоков России и 40 энергоблоков стран СНГ.

На основе предшествующих исследований, зарубежного опыта, в том числе технико-экономических расчетов, выполненных главным образом в 1960-х и первой половине 1970-х годов Гиредметом, рядом предприятий Минсредмаша, Сибкадемпроектном, были разработаны кондиции и критерии оценки месторождений по содержанию тория в рудах. При этом учитывалась экономика зарубежных ториевых горно-рудных предприятий, цены на уран и извлекаемое из руд ядерное горючее – ^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U . Рассматривались также экономические и технологические данные по стоимости дезактивации и захоронения торийсодержащих полупродуктов и отходов переработки комплексных руд. Эти технико-экономические расчеты стоимости производства тория из руд комплексных

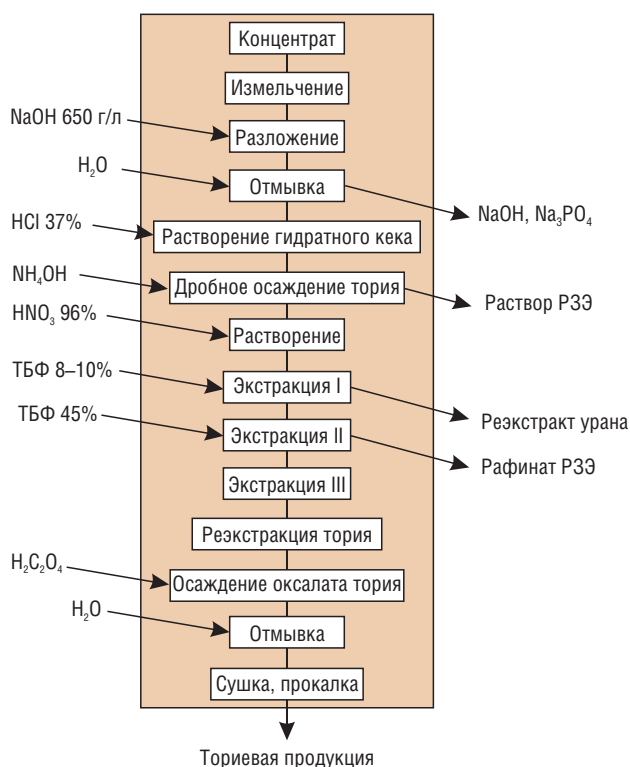


Рис. 5. Щелочно-экстракционная схема переработки монацита [12]

Таблица 5. Прогнозные ресурсы тория на территории России [3]

Группы месторождений по сортам руд по торью	Среднее содержание тория в рудах, %	Ресурсы в пересчете на металл, тыс. т				Число месторождений	Краткая характеристика ресурсов
		В месторождениях			Итого		
		эксплуатирувавшихся на Ta, Nb, U	потенциально промышленных на Ta, Nb, TR, U и др.	слабоизученных			
1. Эндогенные месторождения и рудопроявления: собственно ториевые, преимущественно гидротермальные							
Рядовых и богатых руд	0,1–0,2 до 1–2 и более	–	28	52	80	16	Мелкие и средние месторождения, слабоизученные
2. Комплексные месторождения с торием эндогенные: магматические, метасоматические, гидротермальные							
Рядовых руд	0,1–0,2	–	90		90	1	Кийское ториево-редкометалльное месторождение
Бедных руд	0,05–0,1	–	405	115	520	14	В том числе месторождение Улуг-Танзекское
Убогих руд	0,01–0,05	102	180	638	920	35	В том числе ранее эксплуатировавшееся Ловозерское месторождение
3. Комплексные месторождения с торием экзогенные: погребенные третичные и более древние монацитсодержащие россыпи разных типов							
Убогих и рядовых руд	0,05–0,1	–	20	80	100	38	Разведывались на титан и цирконий
Всего	–	102	723	885	1710	104	–

редкоземельно-редкометалльных месторождений (Ловозерского, Кийского, Улуг-Танзекского) базировались на принципе отнесения расходов по горному цеху и технологическому переделу на основные компоненты. Цена тория складывалась из затрат на передел ториевого промпродукта. В связи с этим стоимость конечных продуктов была невысокой.

Во ВНИИХТ в разное время разрабатывались технологии получения тория из различных видов сырья. Ряд технологий был внедрен в производство: в частности, получение тория при переработке монацита и лопарита. Предложены схема вскрытия лопаритового концентрата в различных вариантах и технология экстракционного извлечения тория из сульфатно-нитратных пульп и нитратных растворов, образующихся при его вскрытии, с получением дезактивированных до санитарных норм нитратных растворов РЗЭ и высокопроцентного концентрата тория, пригодного для получения металла ядерной чистоты. Технология переработки монацитового концентрата (рис. 5) до ядерно-чистого тория с использованием каустической соды применялась в течение 10 лет — до 1971 г. На Московском заводе полиметаллов получали из монацита торий ядерной чистоты в виде металла, фторида, нитрата и оксалатов (последние использовались для производства торированного вольфрама). В настоящее время технология получения тория из монацита нуждается в проверке и модернизации в связи с изменившимися требованиями по чистоте продукта и экономическими условиями его получения. Процесс извлечения тория и редких земель из монацита находится в развитии. В течение последних 5 лет ведутся интенсивные работы по переработке монацитового концентрата [24].

Торий в ядерной энергетике

На возможность реализации уран-ториевого топливного цикла ученые обратили внимание еще в начале 40-х годов прошлого века. Исследовательские и конструкторские работы проводились в Германии, Индии, Японии, России, Великобритании и США [14, 19, 21]. Первые испытания ториевого топливного цикла были осуществлены в Oak Ridge National Laboratory (Национальная лаборатория в Ок-Ридже) в США в 1960-х годах. В реакторе использовался высокотемпературный солевой расплав тетрафторида тория. Финансирование проекта было прекращено в 1976 г. В Германии в течение 750 недель (с 1969 по 1988 г.) на экспериментальной АЭС работал исследовательский реактор AVR (Jülich)** мощностью 15 МВт — первый немецкий высокотемпературный реактор (HTR) с на-



AVR (Jülich). Германия, Северный Рейн-Вестфалия

** Аббревиатура от нем. Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich GmbH — Объединение «Исследовательский реактор Юлих».

сыпным бланкетом. 95 % всего периода эксплуатации реактор работал на ториевом топливе, общая масса которого в смеси с высокообогащенным ураном составила 1360 кг. В 1967–1974 гг. в США на АЭС Peach Bottom на уран-ториевом топливе работал HTR мощностью 110 МВт. На станции Fort St. Vrain с 1976 по 1989 г. действовал единственный в США коммерческий реактор на ториевом топливе проектной электрической мощностью 330 МВт. Топливные элементы для него изготавливались из карбида тория и карбида $\text{Th}/^{235}\text{U}$ в виде микросфер. В реакторе было использовано почти 25 т тория. Глубина выгорания составила 170000 МВт·сут/т. Этот реактор был сконструирован на базе немецкого AVR и представлял собой высокотемпературный реактор (1300°) с графитовым замедлителем и гелиевым охлаждением.

Наиболее широкие и успешные исследования в этом направлении ведет Индия. Их начало связано с именем Хоми Бхабха, основавшего в 1954 г. Индийский департамент по атомной энергии и в последующем сформулировавшего ядерную программу строительства АЭС с тяжеловодными ядерными реакторами PHWR (*Pressurised Heavy Water Reactor*), в которых тяжелая вода D_2O используется в качестве теплоносителя и замедлителя. Ключевым пунктом программы являлось использование тория [20]. Программа предусмат-



Укладка топливных элементов на АЭС Fort St. Vrain

ривала три этапа: на 1-м — в реакторе вырабатывается плутоний, на 2-м — плутоний смешивается с ураном, который используется как топливо в реакторе-размножителя на быстрых нейтронах типа FBR (*Fast Breeder Reactor*), на 3-м — преобразование ^{232}Th в ^{233}U . Этот процесс требовал разработки и освоения дополнительных технологий. Вовлечение в ядерно-ториевый цикл является важной задачей для Индии, поскольку она имеет ограниченные запасы природного урана, но является одним из мировых лидеров по запасам тория. В 1996 г. в г. Калпаккаме (шт. Тамилнад) в качестве источника нейтронов был запущен экспериментальный исследовательский реактор Kamini мощностью 30 кВт, работавший на ^{233}U , полученном путем предварительного облучения ThO_2 на бродерном реакторе мощностью 40 МВт. Первым в мире реактором, в котором для выравнивания мощности в активной зоне использовался не обедненный уран, а торий [14], был первый энергоблок АЭС «Какрапар» (шт. Гуджарат).

Главной трудностью при использовании тория в качестве ядерного горючего является образование в побочных реакциях изотопов с высокой активностью («загрязнителей»), в первую очередь ^{232}U — сильного α - и γ -излучателя с периодом полураспада 73,6 года. Из-за накопления ^{232}U радиационная опасность ториевого топлива растет, что создает дополнительные проблемы при обращении с отработанным ядерным топливом ториевых реакторов, в частности при рециклировании урана. Кроме того, в уран-ториевом цикле набор продуктов деления несколько отличается от такового в уран-плутониевом цикле, что требует модификации традиционной схемы переработки отработанного топлива. В то же время, согласно современным представлениям, в ториевом реакторе в меньших количествах, чем в урановом, накапливаются плутоний и минорные актиниды, а также долгоживущие продукты деления. В пользу ториевых реакторов можно привести еще целый ряд факторов:

1. Торий в 3–4 раза более распространен в земной коре, чем уран.
2. Природный торий состоит из одного изотопа, и его вовлечение в топливный цикл, в отличие от урана, не требует трудоемкого разделения изотопов.
3. Торий имеет некоторые, более привлекательные ядерные свойства по сравнению с ураном.
4. Ториевые топлива обладают некоторыми благоприятными физическими и химическими свойствами, улучшающими эксплуатацию реактора.
5. Благодаря наличию в продуктах передела высокоактивного изотопа ^{232}U упрощается контроль над несанкционированными перемещениями ядерных материалов.
6. В отличие от плутония, ^{233}U может быть легко денатурирован путем смешения его с природным или обедненным ураном.

7. Ядерные реакторы на ториевом топливе более безопасны, чем на урановом, поскольку не обладают запасом реактивности, поэтому никакие разрушения аппаратуры реактора не способны вызвать неконтролируемую цепную реакцию.

Недостатки ториевых реакторов сводятся к следующему:

1. Торий — рассеянный элемент, не образующий собственных руд и месторождений, добыча его намного дороже, чем урана.

2. Вскрытие монацита для извлечения тория — процесс сложный и весьма дорогостоящий.

3. Механические свойства тория усложняют процесс изготовления из него необходимых изделий.

4. В отличие от урана, естественный торий не содержит делящихся изотопов и, чтобы достигнуть критичности, необходимо добавлять делящийся материал — ^{233}U , ^{235}U или плутоний.

5. Хотя ториевое топливо производит намного меньше долгоживущих трансуранов, чем топливо на основе урана, некоторые долгоживущие актиниды оказывают длительное радиологическое воздействие, особенно ^{231}Pu .

Основной недостаток ториевого цикла очевиден: он намного дороже уранового и технологически не до конца проработан. В связи с этим будущее ядерной энергетики зависит от успехов в разработке реакторов и топливных циклов нового поколения, которые должны иметь высокую безопасность и быть экономически конкурентоспособными. Исследования в этом направлении ведутся в Индии, США, Германии, России.

Коллективом сотрудников ВМА им. Н. Г. Кузнецова и СПб ГУАП предложено провести поэтапную замену существующих атомных реакторов жидко-солевыми реакторами нового поколения на основе уран-ториевого топливного цикла [11]. Реакторы такого типа на тепловых нейтронах на основе циркулирующего в контуре солевого расплава фторидов были созданы в США в середине прошлого века. Один из них с 1965 г. успешно работал в течение 5 лет. Топливом-теплоносителем (ТТН) являлся расплав фторидов лития, натрия, бериллия, ^{235}U и ^{232}Th с температурой плавления 470°C . Однако финансирование всех работ по жидко-солевым реакторам за рубежом было свернуто, так как выяснилось, что при наработке делящегося изотопа ^{233}U появляется интенсивное жесткое γ -излучение. Несколько эскизных проектов для больших энергетических жидко-солевых реакторов было создано в СССР. В последнее время ГУП «НПО Радиевый институт» (г. Санкт-Петербург) и рядом других организаций разработаны передовые, достаточно дешевые технологии получения коррозионно-, радиационно- и термостойких материалов на основе новых типов керамических материалов, покрытых и модифицирован-

ных углеродом, с широким спектром свойств, а также новые рецептуры расплавов ТТН. Использование новых материалов и технологий позволит решить проблемы радиационной, химической и термической стойкости элементов жидко-солевых (безТВЭЛЬных) реакторов, которые рассматриваются как альтернатива твердопливному реакторным системам, поскольку допускают регулирование топливного состава в процессе работы реактора. Благодаря этому, а также возможности очистки топлива от осколочных элементов-поглотителей нейтронов в ходе эксплуатации контура эти реакторы имеют низкий запас реактивности и отрицательный температурный коэффициент реактивности, что обеспечивает их ядерную безопасность. Подобные установки эффективно использовать на водном транспорте (надводном и подводном).

Нобелевский лауреат по физике (1984 г.) проф. Карло Руббиа (Carlo Rubbia) разработал принципиально новую конструкцию — субкритический реактор с ускорительной системой (ADTR — Accelerator Driven Thorium Reactor), в котором в качестве основного топлива используется торий, в качестве теплоносителя — жидкий свинец. Для инициирования процесса деления ученый предложил использовать ускоритель протонов с энергией пучка от 800 МэВ до 1 ГэВ. Высокоэнергетические пучки частиц стимулируют ядерные реакции, в результате протекания которых реактор вырабатывает энергию, достаточную как для питания ускорителя частиц, так и для передачи в энергосеть [1]. Для получения нейтронов, необходимых для запуска реакции, в ADTR предложено использовать аналогичный ускоритель, расщепляющий ядро и иницирующий процесс деления. В 2010 г. компания Aker Solutions (Норвегия) купила патент у К. Руббиа и приступила к проектированию реактора ADTR мощностью 600 МВт, который будет размещаться под землей, что освобождает от необходимости сооружения мощного железобетонного купола. Особенность тория — отсутствие самоподдерживающегося деления — конструкторы реактора использовали для обеспечения безопасности ториевой АЭС с ADTR. Так как реакция с выделением тепла идет только благодаря бомбардировке тория протонами, выключение протонного ускорителя приводит к мгновенной остановке реактора. Преимуществами ADTR также являются длительный цикл работы топливного элемента, что снижает утечки материала, высокая безопасность и отсутствие необходимости обогащения топлива. Подземное расположение реактора позволяет использовать его как «печь» для сжигания опасных актинидов (уран, плутоний, америций, кюрий и др.) и тем самым избежать опасного и дорогостоящего процесса утилизации ядерных отходов.

Активное внедрение ториевых реакторов в энергетику позволит создать относительно чистые и мощные источники энергии, необходимые человечеству.

По теме

Российские физики из Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» отмечают, что $(\text{Th}-^{233}\text{U}-\text{Pu})$ топливный цикл индийских реакторов АНВР обладает повышенной уязвимостью с точки зрения нераспространения ядерных материалов. Исследование в программе GETERA показало, что предложенная российскими учеными альтернативная $(\text{Th}-^{233}\text{U}-^{238}\text{U})$ топливная композиция для реактора АНВР при уменьшении шага решетки и увеличении содержания выгорающего поглотителя позволяет вовлечь Th в цикл с меньшими рисками распространения, так как: в загружаемом топливе нет Pu ; в предложенном топливном цикле во всех зонах присутствует ^{238}U , что делает невозможным химическое выделение ^{233}U , а в индийских реакторах как раз слабо защищены зоны с $(\text{Th}-^{233}\text{U})\text{O}_2$ загрузкой; масса Pu в ОЯТ меньше, чем в индийских АНВР.

Источник: Щеренко, А. И. Альтернативный топливный цикл реактора АНВР / А. И. Щеренко, Н. И. Гераскин, В. А. Юферева : мат-лы науч. сессии НИЯУ МИФИ-2011 // Физико-технические проблемы ядерной энергетики. 2011. Том 1. С. 63.

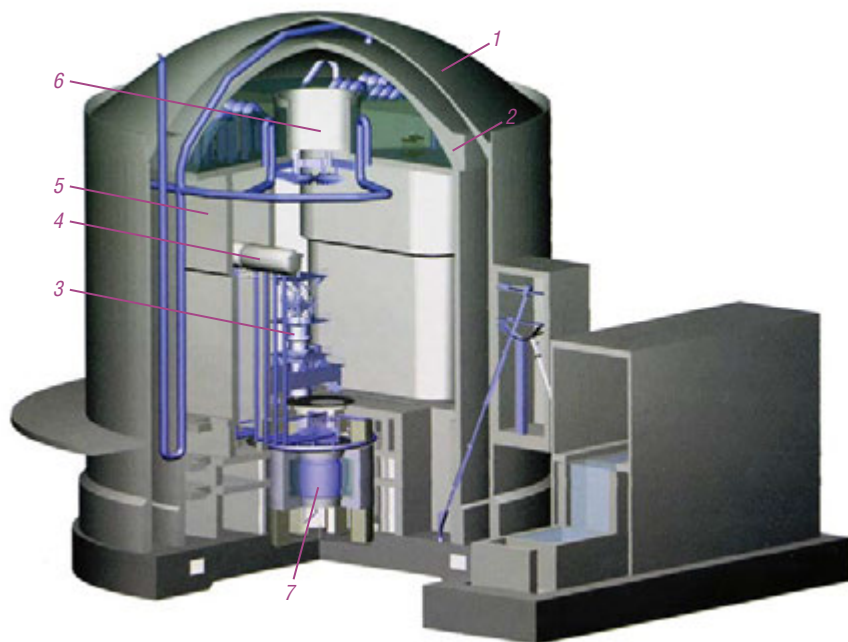
ИНТЕРЕСНЫЕ ДАННЫЕ

Рис. 6. Конструкция АНВР:

1 – внешний герметичный корпус; 2 – внутренний герметичный корпус; 3 – топливозагрузочный агрегат; 4 – паровой барабан; 5 – колонны теплоотводящих патрубков; 6 – вентиляционные патрубки; 7 – активная зона

После присвоения в 2003 г. в США национальной программы в области ториевой энергетики статуса федеральной интерес к данной проблеме в других странах несколько расширился. В настоящее время в Индийском атомном научно-исследовательском центре Бхабха (BARC) разработан тяжеловодный реактор АНВР (*Advanced Heavy Water Reactor*), предназначенный для использования тория в качестве ядерного топлива в промышленных масштабах и позволяющий нарабатывать ^{233}U без внешней подпитки делящимися материалами^{***}. Электрическая мощность АНВР составляет 300 МВт. Теплоносителем является кипящая легкая вода, замедлителем — тяжелая вода [15, 20]. АНВР — вертикальный реактор с трубами под давлением (рис. 6). В его конструкции предусмотрен ряд пассивных защитных систем, а топливо оказывает меньше влияния на окружающую среду, нежели урановое или уран-плутониевое. Средняя проектная глубина выго-

рания топлива в АНВР составляет 38 ГВт·сут/т. Реактор самодостаточен по ^{233}U при условии работы в замкнутом ядерно-ториевом цикле. Почти 2/3 проектной мощности АНВР будет обеспечиваться за счет тория. Данный реактор хорошо изучен и близок к конструктивной стадии [5]. Руководство BARC заявляет, что реактор будет построен уже к концу текущего десятилетия.

Ториевое топливо выгодно использовать только при его глубоком выгорании. Достичь этого на ранних этапах развития мировой атомной энергетики не удавалось из-за проблем с конструкционными материалами. В настоящее время глубина выгорания более 40 ГВт·сут/т успешно достигается в различных проектах легководных реакторов, что открывает возможности для загрузки тория в реакторы с легкой водой и получения целого ряда преимуществ перед урановым топливом.

Использование тория в сочетании с существующими, хорошо развитыми реакторными технологиями может обеспечить решение сложного комплекса проблем роста ядерной энергетики в ряде регионов мира. Торий увеличивает шкалу выбора для глобального ядерного развития и в то

же время снижает риски бесконтрольного распространения делящихся материалов.

Развитие ториевого топливного цикла требует значительных усилий и станет коммерчески доступным в долгосрочной перспективе, когда будут созданы новые технологии в области производства и переработки ядерного топлива, которые обеспечат необходимую экономическую конкурентоспособность при требуемой производительности.

Перспективы использования тория в ядерной энергетике

В настоящее время для ядерной энергетики используются три основных изотопа: ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu . Они делятся под действием нейтронов любых энергий, прежде всего — тепловых нейтронов (т. е. практически с нулевой энергией), что обеспечивает высокую вероятность деления. В природе встречается только ^{235}U , но в малых количествах (в естественной смеси изото-

^{***} Индийский тяжеловодный реактор с ториевой зоной воспроизводства был отмечен среди инновационных проектов на межотраслевой межрегиональной научно-технической конференции «АСММ-Регионам-2010», организованной ИБРАЭ РАН, ГК «Росатом» и РАН при поддержке Совета Федерации ФС РФ и Министерства регионального развития РФ. — Прим. ред.

пов урана его — всего 0,7 %), поэтому для использования в реакторах его необходимо обогащать по крайней мере до нескольких процентов. Основной естественный изотоп урана ^{238}U (99,3 % в естественной смеси) делится лишь быстрыми нейтронами (с энергией больше 1 МэВ), что менее удобно. Это же относится и к естественному торию ^{232}Th . Два других изотопа ядерной энергетики, делящиеся тепловыми нейтронами (^{233}U и ^{239}Pu), в природе отсутствуют, но их в необходимом количестве можно наработать в реакторах на быстрых нейтронах (>1 МэВ) по схемам $n + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ и $n + ^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{Pa} \rightarrow ^{233}\text{U}$, что открывает возможность воспроизводства ядерного горючего в цепной реакции деления. Именно в этом состоит ценность тория как потенциального сырья для ядерной энергетики [6, 13].

Использование тория (и последовательно ^{233}U) возможно во всех существующих и будущих реакторах. Включение торий-уранового (Th-U) горючего в топливные циклы существующих легководных и тяжеловодных реакторов обычно требует определенной модификации их инженерных систем. Есть два главных пути использования Th-U горючего в реакторах: без переработки (т. е. в открытом топливном цикле) и с переработкой использованного ядерного топлива (т. е. в закрытом топливном цикле). Первый путь (эксперимент был осуществлен в США) требует больших затрат энергии и времени на обработку ТВЭЛов, заполненных продуктами распада тория. Второй путь сводится к облучению тория в реакторе, последующему извлечению ^{233}U , изготовлению новых топливных стержней из Th-U и помещению их в другие реакторы. Все это станет особенно актуальным, когда объем ядерной энергии, благодаря глобальному развитию, многократно возрастет. Следовательно, разумно продолжать и поддерживать развитие ториевых делительных систем как некую альтернативу [31–33, 35, 37, 38].

Согласно прогнозу ежегодного потребления тория для использования его в ядерных реакторах вплоть до 2100 г. (рис. 7, а), он, возможно, будет добываться в больших масштабах для нужд ядерной энергетики с 2050 г. К концу текущего столетия годовое потребление тория может достичь 20 тыс. т, или примерно 10 % годового потребления урана (около 200 тыс. т). По наименее оптимистичному сценарию годовое потребление тория и урана снизится примерно в 4 раза.

По прогнозу для оптимистического сценария развития мощностей всех реакторных систем в XXI в. (рис. 7, б) активная разработка гибридных fusion-fission систем, включающих как реакции термоядерного синтеза, так и реакции деления ядер, может начаться в 2030–2050 гг. Предполагается, что потребление урана достигнет максимума (~140 тыс. т/год) в 2040–2060 гг., но затем упадет до 30 тыс. т/год к 2100 г.

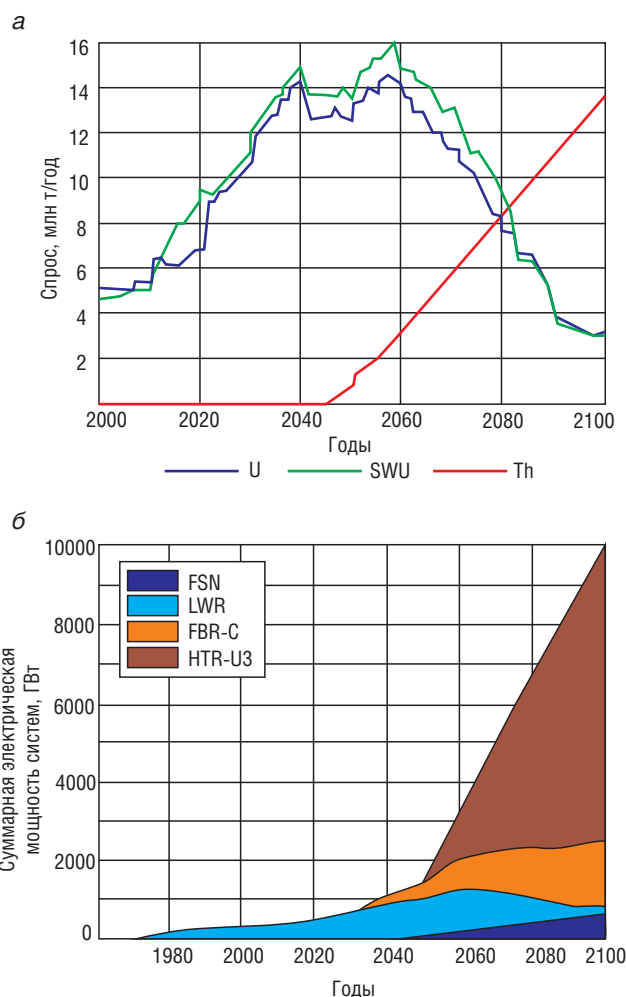


Рис. 7. Прогнозы ежегодного спроса на природный и обогащенный уран, природный торий (а) и мирового производства ядерной энергии с использованием реакторов различных типов (б) для сценария с высоким темпом роста энергопотребления при условии использования гибридных систем с термоядерными источниками нейтронов [41]

Условные обозначения: U — природный уран; SWU — обогащенный уран; Th — природный торий; HTR — высокотемпературные реакторы; FBR — реакторы-размножители на быстрых нейтронах; LWR — легководные реакторы; FSN — гибридные системы с термоядерными источниками нейтронов

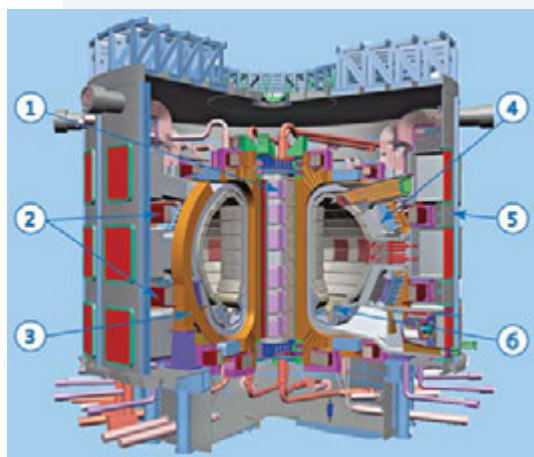
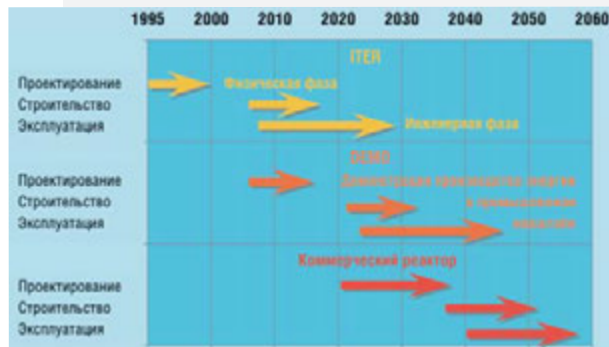
(см. рис. 7, а). Напротив, спрос на торий, начиная с 2040–2050 гг., начнет непрерывно расти и достигнет к 2100 г. 140 тыс. т/год. Но так как доля нейтронных источников термоядерного синтеза (FSN) в рассматриваемых гибридных fusion-fission системах невелика (<10 %), они будут строиться в ограниченном числе стран, например, в тех странах, где будут размещены международные центры топливного ядерного цикла [30, 40, 42].

Заключение

Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года [28], главной целью энергетической политики страны является максимально эффективное использование природных энергетических ресурсов и потенциала энергетического сектора для устойчивого роста экономики, повышения качества жизни населения страны и укрепления ее внешнеполитических позиций.



Строительная площадка ITER. Кадараш, Франция. 2011 г., сентябрь. Фото: Altivue/ITER Organization



Модель термоядерного реактора ITER в разрезе (иллюстрация: Angela Wong): 1 – центральный соленоид (индуктор); 2, 3 – катушки, соответственно, полоидального и тороидального магнитного поля; 4 – вакуумная камера; 5 – криостат; 6 – дивертор
Источник: <http://www.iter.org/album/construction/pf#459>

По теме

ВАЖНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Мировым термоядерным сообществом определены три этапа разработки энергетики на основе термоядерных реакций синтеза: 1 – техническая демонстрация с осуществлением мощной термоядерной реакции и отработкой технологий, присущих будущему термоядерному реактору – создание ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor; русскоязычный вариант ИТЭР – интернациональный термоядерный экспериментальный реактор); 2 – создание реактора для производства энергии в промышленном масштабе – DEMO; 3 – создание коммерческого реактора (см. диаграмму).

Первый шаг в энергетике будущего уже сделан: полномасштабный экспериментальный термоядерный реактор ITER строится на юге Франции в исследовательском центре Кадараш (Cadarache). Его пуск намечен на конец текущего десятилетия. Хотя ITER является исследовательским реактором ядерного синтеза, он должен продемонстрировать осуществимость промышленных электростанций такого рода (по проектным параметрам ITER моделирует энергетический термоядерный реактор), а также возможность коммерческого использования термоядерного реактора.

ITER – уникальный международный проект современности, пример беспрецедентного международного сотрудничества ведущих мировых научных держав ради достижения общей глобальной цели (символично само название проекта: аббревиатура ITER совпала по написанию с латинским *iter* – путь, и официально признано имеющим именно это смысловое значение). Техническая проработка реактора была осуществлена совместными научными, техническими и финансовыми усилиями России, Евросоюза, США и Японии. В сооружении реактора принимают участие также КНР, Индия и Республика Корея.

Россия является инициатором проекта ITER и занимает одну из ключевых позиций в его реализации. Это объясняется колоссальным научно-технологическим потенциалом нашей страны в области термоядерных исследований. В 1950 г. академики А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм предложили использовать магнитное поле для удержания плазмы. Позднее выдающиеся российские ученые под руководством акад. Л. А. Арцимовича разработали и реализовали концепцию термоядерной установки ТОКАМАК (аббр. тороидальная камера магнитная катушка) для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий, необходимых для протекания управляемого термоядерного синтеза. Именно эта установка положена в основу реактора ITER (см. рисунок). Существенными техническими отличиями от первых ТОКАМАКов являются наличие дивертора (устройство для очистки плазмы от примесей), вытянутое по вертикали поперечное сечение плазмы и использование сверхпроводников для создания магнитных полей в реакторе. Вклад России в международный проект заключается в изготовлении и поставке высокотехнологичного оборудования, основных систем реактора, что составляет 10 % стоимости сооружения реактора по техническому проекту. Как участник проекта Россия владеет полным комплектом проектной документации по реактору.

Трехступенчатая система защиты реактора ITER обеспечивает высокий уровень безопасности: при любых авариях уровень воздействия на окружающую среду не требует эвакуации населения.

Проект DEMO должен стать следующим шагом в промышленном освоении термоядерной энергии, а первый демонстрационный термоядерный энергетический реактор-токамак DEMO – основой для проектирования первой коммерческой термоядерной электростанции.

В последние годы РФ лидирует по добыче сырой нефти (12 % мировой торговли) и свыше 4/5 ее объема экспортирует в страны Европы. Доля России на европейских рынках составляет около 30 %. РФ занимает первое место в мире по запасам природного газа (23 % мировых). Обладая уникальной газотранспортной системой, она играет важную роль в обеспечении поставок центральноазиатского газа в страны Европы и страны ЕвразЭС (Европейско-Азиатское экономическое сообщество). Россия удерживает второе место в мире по запасам каменного угля (19 % мировых). Обстановка с состоянием запасов и добычей традиционных видов горючих ископаемых в стране вполне благополучная, чего нельзя сказать об атомной энергетике и ее сырьевой базе.

Доля России в мировой атомной энергетике составляет всего 5 %, хотя ей принадлежит 15 % мирового рынка реакторостроения, 45 % мирового производства

обогащенного урана, 15 % мирового рынка конверсий отработанного топлива и 8 % мировой добычи природного урана. Развитие отечественной атомной энергетики затормозилось в связи с двумя «запроектными» авариями – на Чернобыльской АЭС и на предприятии «Маяк» на Южном Урале. Тормозом являлось также недостаточное финансирование этого важного направления в энергетике государств-членов ЕвразЭС. На 1 января 2007 г. на их территории находилось 48 реакторов: в России – 31, Украине – 15, Армении – 1, Литве – 1 (ныне закрыт). Более 20 реакторов в странах Восточной Европы работают на тепловыделяющих элементах, изготовленных в России по долгосрочным контрактам.

К 2020 г. в РФ планируется ввести в эксплуатацию, как минимум, 37 атомных реакторов для достижения суммарной установленной мощности 53,2 ГВт [28]. При этом рост производства электроэнергии возрастет до 362 млрд кВт·ч. Прогнозируемый рост электроэнер-

По теме

ИНТЕРЕСНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Гибридный термоядерный реактор – разрабатываемая разновидность термоядерного реактора, в котором для выработки энергии будут использоваться не только реакции синтеза легких ядер (обычно дейтерия и трития), но и реакции деления. Бланкет такого реактора состоит из двух зон: в 1-ю зону помещаются делящиеся вещества (уран или торий), во 2-ю – литийсодержащие вещества для воспроизводства сгоревшего в плазме трития. Термоядерные нейтроны, рождающиеся в плазме с энергией 14,1 МэВ, проникают через первую стенку в бланкет с делящимися веществами, где происходит поглощение нейтронов с образованием либо ^{239}Pu – из ^{238}U , либо ^{233}U – из ^{232}Th . Одновременно в бланкете выделяется энергия, примерно равная 140 МэВ на один термоядерный нейтрон. Таким образом, в гибридном термоядерном реакторе можно получать примерно в 6 раз больше энергии, чем в чисто термоядерном реакторе при прочих равных условиях, поэтому первый многие специалисты рассматривают как альтернативу второму. Кроме того, по мнению сторонников этой концепции, гибридный реактор может иметь более простую конструкцию, так как производство быстрых нейтронов не требует столь высоких температур и давлений, и самое главное – процесс расщепления в нем ядерного топлива будет гораздо чище и экологичнее, чем в современных реакторах на тепловых нейтронах ввиду образования намного меньших количеств долгоживущих высокорadioактивных отходов, требующих надежного захоронения на десятки и сотни тысяч лет. Отходы гибридных реакторов сохраняли бы свою радиоактивность в пределах 100 лет, так как под воздействием быстрых термоядерных нейтронов долгоживущие изотопы превращались бы в нуклеотиды с более коротким периодом полураспада. Наконец, гибридный реактор мог бы работать не на уране, а на тории, который дешевле урана и значительно (в 5 раз) превосходит его по запасам на планете, а определенные особенности тория обеспечат более высокую безопасность эксплуатации реактора по сравнению с любой традиционной конструкцией.

Противники, однако, указывают на слабую проработанность этой концепции и подчеркивают, что лишь более детальные исследования позволят реалистично оценить ее перспективность. К тому же гибридный реактор, сочетающий две отнюдь не дешевые технологии, может оказаться непомерно дорогостоящим.

Тем не менее в ряде стран к этому проекту проявляют повышенный интерес, особенно на фоне труднодостижимых и долго ожидаемых результатов в разработке термоядерного реактора. Поэтому некоторые эксперты не исключают, что первый гибридный реактор может быть создан на несколько десятилетий раньше, чем чисто термоядерный: примерно к 2030 г. (Источник: <http://report.ru/13933-gibridnyj-reaktor-kak-alternativa-termoyadernogo.html>).

Так, группой ученых из Университета Техаса (University of Texas at Austin) предложена конструкция подкритической гибридной установки синтеза-распада. В ней работающий на реакции синтеза источник нейтронов CFNS (Compact Fusion Neutron Source) помещен в ядерный реактор, в который в качестве топлива загружают трансурановые отходы классических легководных АЭС. Нейтроны будут бомбардировать отработанное ядерное топливо и тем самым ускорять в нем процесс трансмутации (превращения элементов). По типу плазмодерживающей системы эта установка относится к токамакам, но, в отличие от других созданных или разрабатываемых реакторов синтеза, CFNS имеет значительно меньшие размеры, сочетающиеся с высокой мощностью (100 МВт) и, соответственно, очень плотным потоком нейтронов (см. рисунок). Помимо этого, CFNS отличается оригинальной конфигурацией магнитных катушек.

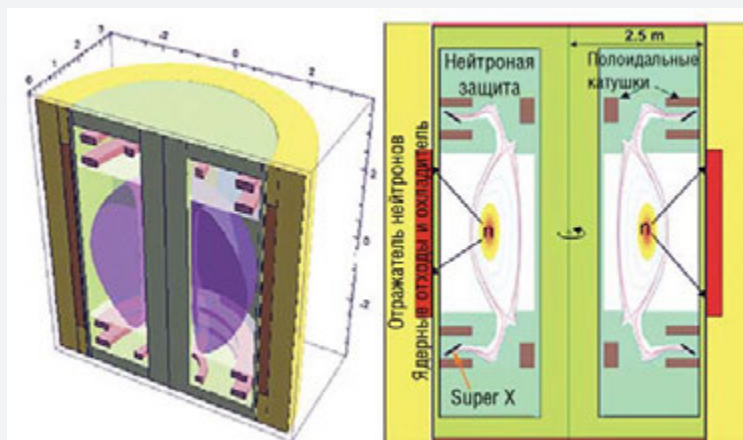


Схема CFNS

Ноу-хау американских специалистов является дивертор Super X, послуживший ключом к построению системы трансмутации FFTS (Fusion-Fission Transmutation System). По способности воспринимать без разрушения сильные потоки энергии от сердцевины реактора синтеза дивертор Super X превосходит аналоги в 5 раз. Это предопределило компактность установки, которая, как сообщают ее создатели, способна перерабатывать отработанное топливо от 10–15 легководных реакторов обычных АЭС. Сочетание классических реакторов с гибридными FFTS, как подсчитали американские специалисты, позволит решить проблему отработанного ядерного топлива не за столетия (как в случае развития перерабатывающих реакторов на быстрых нейтронах), а за десятилетия: такой комплекс сможет уничтожить 99 % трансурановых отходов АЭС. И в довершение этой перспективы, как уверяют авторы системы, комплекс FFTS с CFNS будет одновременно и дешевле, и эффективнее прочих установок для трансмутации, разрабатываемых ныне в рамках ряда проектов. При этом они рассматривают FFTS как промежуточный этап перехода человечества от ядерной к термоядерной энергетике (Источник: <http://www.membrana.ru/article/3309>).

гии на АЭС потребует значительного увеличения производства обогащенного урана для выпуска ТВЭЛов. По добыче урана Россия в 2004 г. занимала 4-е место в мире после Канады, Австралии и Казахстана, но в 2005 г. ее опередили Нигер и Намибия. К 2035 г. Россия планирует довести производство урана до 15000 т/год. Однако уже сейчас нам не хватает собственного урана для удовлетворения текущих потребностей, даже при условии умеренных темпов развития АЭС, стабилизации экспорта ТВЭЛов и весьма оптимистических сроках опознания и освоения месторождений в новых ураноносных регионах. К 2035 г. только на территории РФ возникнет дефицит урана в размере 76628 т. Достаточное количество природного урана может быть получено только при условии поставок из-за рубежа, объемы которых небесконечны. Единственный способ улучшить сложившуюся ситуацию – сделать решительные

шаги к освоению ториевого цикла в атомной энергетике. Имеющиеся сырьевые ресурсы и перспективные инженерно-технические разработки дают России хороший шанс продвинуться в этом направлении.

С целью создания промышленной сырьевой базы тория необходимо разработать и осуществить комплексную программу по изучению и использованию природных и техногенных источников тория, в частности руд редкоземельных месторождений, накопленных в отвалах и отходах текущей переработки. Для обеспечения перспективных разработок по ториевому циклу необходима новая оценка потенциальных сырьевых источников тория, степени их готовности к использованию, технологий переработки сырья и получения готовой продукции.

Создание минерально-сырьевой базы тория требует значительных средств и не сулит немедленной от-

дачи. Как правило, с момента открытия месторождения твердых полезных ископаемых до ввода его в эксплуатацию проходит от 10 до 25 лет, а иногда и более. Экономическая целесообразность эксплуатации месторождения определяется затратами на его освоение, стоимость же всех других геологических работ (картирование, поиски, разведка) никак не учитывается.

Трудности создания полноценной сырьевой базы ярко видны на примере урана, в который вкладывались не поддающиеся теперь оценке огромные капиталовложения, но вопреки всем надеждам и ожиданиям страна по-прежнему испытывает острейший недостаток в новых, экономически рентабельных источниках этого сырья. **РОН**



Список литературы

1. Безопасные АЭС будут работать на тории // разд. Энергетика / CNews : КПК-версия. – URL : http://rnd.cnews.ru/tech/news/top/index_science.shtml?top/2010/08/31/406847. = Bezopasnye AJeS budut rabotat' na torii // razd. Jenergetika / CNews : КПК-версия – URL : http://rnd.cnews.ru/tech/news/top/index_science.shtml?top/2010/08/31/406847.
2. Котова, В. М. Ториево-редкометальное сырье и перспективы его использования в ядерной энергетике XXI века / В. М. Котова // Минеральное сырье : науч.-метод / ВИМС. – М., 2000. – № 6. – С. 91–99. = Kotova, V. M. Torievo-redkometal'noe syr'e i perspektivy ego ispol'zovanija v jadernoj jenergetike NHI veka / V. M. Kotova // Mineral'noe syr'e : nauch.-metod / VIMS. – М., 2000. – № 6. – С. 91–99.
3. Котова, В. М. Минерально-сырьевая база тория и перспективы ее использования в ядерной энергетике России XXI века / В. М. Котова // Uranium on the verge of centuries: resources, production, demand : abstracts / International uranium geological symposium. Moscow, 2000. – С. 23. = Kotova, V. M. Mineral'no-syr'evaja baza torija i perspektivy ee ispol'zovanija v jadernoj jenergetike Rossii NHI veka / V. M. Kotova // Uranium on the verge of centuries: resources, production, demand : abstracts / International uranium geological symposium. Moscow, 2000. – С. 23.
4. Красноуфимский монацитовый концентрат могут израсходовать в «Титановой долине» // АПИ. – <http://www.apiural.ru/news/economy/62773/>. – 2011. – 8 февраля. = Krasnoufimskij monacitovyj koncentrat mogut izrashodovat' v «Titanovoj doline» // API. – <http://www.apiural.ru/news/economy/62773/>. – 2011. – 8 fevralja.
5. Кузьминов, Б. Д. Состояние ядерных данных для ториевого топливного цикла / Б. Д. Кузьминов, В. Н. Манохин (ГНЦ РФ ФЭИ, Обнинск). – <http://www.ippe.ru/podrcjd/vant/97-2/st4/st4.pdf>. = Kuz'minov, B. D. Sostojanie jadernyh dannyh dlja torievogo toplivnogo cikla / B. D. Kuz'minov, V. N. Manohin (GNC RF FJeI, Obninsk). – <http://www.ippe.ru/podrcjd/vant/97-2/st4/st4.pdf>.
6. Легководный ториевый реактор ВВЭР-Т / Н. Н. Пономарев-Степной, Г. Л. Лунин, А. Г. Морозов [и др.] // Атомная энергия. – 1998. – Т. 85, вып. 4. – С. 263. = Legkovodnyj torievij reaktor VVJeR-T / N. N. Ponomarev-Stepnoj, G. L. Lunin, A. G. Morozov [i dr.] // Atomnaja jenergija – 1998. – Т. 85, вып. 4. – С. 263.
7. Максимов, Л. Н. Способ управления ториевым реактором и тепловыделяющая сборка для его осуществления / Л. Н. Максимов : междунар. заявка РСТ/RU01/00251 ; приоритет от 26.06.2001. = Maksimov, L. N. Sposob upravlenija torievym reaktorom i teplovydeljajušaja sborka dlja ego osušestvlenija / L. N. Maksimov : mezhdunar. zajavka RST/RU01/00251 ; prioritet ot 26.06.2001.
8. Медведев, В. Монацит не обернется катастрофой / В. Медведев // Эксперт-Урал. – 2000. – № 3. – С. 11–22. = Medvedev, V. Monacit ne obrnetsja katastrofoj / V. Medvedev // Jekspert-Ural. – 2000. – № 3. – С. 11–22.
9. Муроков, В. М. Использование тория в ядерных реакторах / В. М. Муроков, М. Ф. Троянов, А. Н. Шмелев // Физика ядерных реакторов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – Вып. 22. – 96 с. = Murogov, V. M. Ispol'zovanie torija v jadernyh reaktorah / V. M. Murogov, M. F. Trojanov, A. N. Shmelev // Fizika jadernyh reaktorov. – М. : Jenergoatomizdat, 1983. – Вып. 22. – 96 с.
10. Николаева, Т. Торий еще будет / Т. Николаева, К. Семин // Эксперт. – 1999. – № 3. – С. 64–65. = Nikolaeva, T. Torij ewe budet / T. Nikolaeva, K. Semin // Jekspert. – 1999. – № 3. – С. 64–65.
11. О реакторах нового поколения / Р. М. Яковлев [и др.] // Атомная стратегия. – 2005. – № 16. = O reaktorah novogo pokolenija / R. M. Jakovlev [i dr.] // Atomnaja strategija – 2005. – № 16.
12. Переработка монацитового концентрата. Обзор научно-технической информации // В. О. Косынкин, С. Д. Моисеев, В. И. Макаров, В. М. Гаврилин. – М. : ВНИИХТ, 1992. = Pere rabotka monacitovogo koncentrata. Obzor nauchno-tehnicheskoi informacii // V. O. Kosynkin, S. D. Moiseev, V. I. Makarov, V. M. Gavrilin. – М. : VNIHT, 1992.
13. Петров, Э. Л. Реактор-2020 / Э. Л. Петров, Д. Н. Суглобов, Р. М. Яковлев // Атомная стратегия. – 2006. – № 24 (август). – С. 24. – URL : <http://www.proatom.ru/modules.php?name=as>. = Petrov, Je. L. Reaktor-2020 / Je. L. Petrov, D. N. Suglobov, R. M. Jakovlev // Atomnaja strategija – 2006. – № 24 (avgust). – С. 24. – URL : <http://www.proatom.ru/modules.php?name=as>.
14. Пухлий, В. А. Концепция ториевой энергетики / В. А. Пухлий, Н. Ю. Софийский, С. Т. Мирошниченко // Збірник наукових праць СНУЯЕмап. – Севастополь : СНУЯЭиП, 2010. = Puhlij, V. A. Koncepcija torievoy jenergetiki / V. A. Puhlij, N. Ju. Sofijskij, S. T. Miroshnichenko // Zbirnik naukovih prac' SNUJaEmap. – Sevastopol' : SNUJaJeP, 2010.
15. Реактор АНВР – первый шаг Индии на пути к ториевой энергетике / AtomInfo.Ru. 31.10. 2008. – URL : <http://atominfo.ru/news/air5294.htm>. = Reaktor ANWR – pervyj shag Indii na puti k torievoy jenergetike / AtomInfo.Ru. 31.10. 2008. – URL : <http://atominfo.ru/news/air5294.htm>.
16. Репина, С. А. Минералогия монацитовых концентратов ОГУ «Уралмонацит» / С. А. Репина, В. И. Попова, Л. Ф. Баженова // Уральский минералогический сборник. – 2008 – № 15. – С. 17–26. = Repina, S. A. Mineralogija monacitovyh koncentratov OGU «Uralmonacit» / S. A. Repina, V. I. Popova, L. F. Bazhenova // Ural'skij mineralogicheskij sbornik. – 2008 – № 15. – С. 17–26.
17. Российские месторождения России и других стран СНГ / отв. ред. Н. П. Лаверов, Н. Г. Патык-Кара. – М. : Научный мир, 1997. = Rossijskie mestorozhdenija Rossii i drugih stran SNG / otv. red. N. P. Laverov, N. G. Patyk-Kara. – М. : Nauchnyj mir, 1997.
18. Руды редкоземельных металлов России / В. В. Архангельская, Н. Н. Лагонский, Т. Ю. Усова, Л. Б. Чистов // Минеральное сырье : сб. – М. : Изд. ВИМС. – Сер. геол.-эконом. – 2006. – № 19. – 72 с. = Rudy redkozemel'nyh metallov Rossii / V. V. Arhangel'skaja, N. N. Lagonskij, T. Ju. Usova, L. B. Chistov // Mineral'noe syr'e : sb. – М. : Izd. VIMS. – Ser. geol.-jekonom. – 2006. – № 19. – 72 с.
19. Соколов, Ю. А. К новой парадигме энергетического сознания / Ю. А. Соколов, М. В. Хорошев // Атомная энергия. – 2006. – № 24. – С. 1–12. = Sokolov, Ju. A. K novoj paradigme jenergetičeskogo soznanija / Ju. A. Sokolov, M. V. Horoshev // Atomnaja jenergija – 2006. – № 24. – С. 1–12.
20. Соколова, Н. Д. Ядерная энергетика Индии / Н. Д. Соколова // Атомная техника за рубежом. – 2010. – № 5 – С. 3–14. = Sokolova, N. D. Jadernaja jenergetika Indii / N. D. Sokolova // Atomnaja tehnika za rubezhom. – 2010. – № 5 – С. 3–14.

21. Субботин, С. А. Ториевый цикл. Выбираем реактор / С. А. Субботин // Атомная стратегия. – 2007. – № 9. – URL : <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=1097>. = Subbotin, S. A. Torievij cikl. Vybirajem reaktor / S. A. Subbotin // Atomnaja strategija. – 2007. – № 9. – URL : <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=1097>.
22. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века / Мин-во РФ по атомной энергии. – М. : Изд-во ЦНИИАтоминформ, 2001. – 64 с. = Strategija razvitiija atomnoj jenergetiki Rossii v pervoj polovine HHI veka / Min-vo RF po atomnoj jenergii. – М. : Izd-vo CNIAtominform, 2001. – 64 s.
23. Тарханов, А. В. Уран 2009. Ресурсы, производство и потребности / А. В. Тарханов, В. В. Шаталов // Минеральное сырье : сб. – М. : ВИМС, 2010. – Сер. геол.-минерал. – № 29. – 40 с. = Tarhanov, A. V. Uran 2009. Resursy, proizvodstvo i potrebnosti / A. V. Tarhanov, V. V. Shatalov // Mineral'noe syr'e : sb. – М. : VIMS, 2010. – Ser. geol.-mineral. – № 29. – 40 s.
24. Толстов, А. В. Комплексная оценка Томторского месторождения / А. В. Толстов, А. П. Гунин // Вестник Воронеж. ун-та. Сер. Геология. – 2001. – Вып. 11. – С. 144–160. = Tolstov, A. V. Kompleksnaja ocenka Tomtorskogo mestorozhdenija / A. V. Tolstov, A. P. Gunin // Vestnik Voronezh. un-ta. Ser. Geologija. – 2001. – Вып. 11. – С. 144–160.
25. Торий в ядерном топливном цикле / В. И. Бойко, В. А. Власов, И. И. Жерин, А. А. Маслов, И. В. Шаманин. – М. : Руда и Металлы, 2006. – 359 с. = Torij v jadernom toplivnom cikle / V. I. Bojko, V. A. Vlasov, I. I. Zherin, A. A. Maslov, I. V. Shamanin. – М. : Ruda i Metally, 2006. – 359 s.
26. Чернов, А. На монацит деньги даст Москва / А. Чернов // Областная газета / учредители: губернатор Свердловской обл., Законодательное Собрание Свердловской обл. – 2011. – 15 июня. – http://www.oblgazeta.ru/new_print_v.htm?top_id=275 = Chernov, A. Na monacit den'gi даст Moskva / A. Chernov // Oblastnaja gazeta / uchrediteli: gubernator Sverdlovskoj obl., Zakonodatel'noe Sobranie Sverdlovskoj obl. – 2011. – 15 ijunja – http://www.oblgazeta.ru/new_print_v.htm?top_id=275
27. Энергетика в экономике XXI века / Е. П. Велихов, А. Ю. Гагаринский, С. А. Субботин, В. Ф. Цибульский. – М. : ИздАт, 2010. – 176 с. = Jenergetika v jekonomike XXI veka / E. P. Velihov, A. Ju. Gagarinskij, S. A. Subbotin, V. F. Cibul'skij. – М. : IzdAt, 2010. – 176 s.
28. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р // Собрание законодательства РФ. 2009. 30.11.2009. № 48, ст. 5836. – URL : <http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy/> = Jenergetičeskaja strategija Rossii na period do 2030 goda : utv. rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 13 nojabrja 2009 g. № 1715-r // Sobranie zakonodatel'stva RF. 2009. 30.11.2009. № 48, st. 5836. – URL : <http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy/>
29. Эпштейн, Е. М. Геология Томторского уникального месторождения редких металлов (север Сибирской платформы) / Е. М. Эпштейн, Н. А. Данильченко, С. А. Постников // Геология рудных месторождений. – 1994. – Т. 36. – № 2. – С. 83–110. = Jepshtejn, E. M. Geologija Tomtorskogo unikal'nogo mestorozhdenija redkih metallov (sever Sibirskoj platformy) / E. M. Jepshtejn, N. A. Danil'chenko, S. A. Postnikov // Geologija rudnyh mestorozhdenij. – 1994. – Т. 36. – № 2. – С. 83–110.
30. Abstracts / International Symposium of Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle. 22–26 June 2009. Vienna, Austria.
31. Barthel, F. H. Thorium deposits and their availability / F. H. Barthel, F. J. Dahlkamp // New developments in uranium exploration, resources, production and demand : Proceedings of a Technical Committee Meeting jointly organized by the IAEA and the NEA of the OECD and held in Vienna, 26–29 August, 1991. – Printed by IAEA in Austria, 1992. – P. 104–115.
32. Barthel, F. H. Thorium / F. H. Barthel, F. J. Dahlkamp // Gmelin Handbook of Inorganic Suppl. A, Vol. A1b. – Springer Verlag, Berlin, 1991. – P. 345–434.
33. Evaluated nuclear data for nuclides within the thorium – uranium fuel cycle / IAEA – Vienna, 2010. – 61 p.
34. Kazimi, M. S. Thorium fuel for nuclear energy / M. S. Kazimi // American Scientist. – 2003. – Sept-Oct. – P. 2–11.
35. Kotova, V. M. Regularities of formation and location of thorium deposits / V. M. Kotova : Report Summary for XXXth IGC, Beijing, 1996.
36. Kotova, V. M. Deposits of thorium in C.I.S. and their prospective / V. M. Kotova, J. I. Skorovarov : preprint of a paper intended for presentation at a scientific meeting. – IAEA, 1995.
37. Kotova, V. M. Deposits of thorium in C.I.S. and their future (genetic types of deposits) / V. M. Kotova, J. I. Skorovarov : report for Technical Committee Meeting on recent changes and events in uranium deposits development, exploration, resources, production and the World/Demand Relationship. – Kiev, 22–26 May, 1995.
38. Kotova, V. M. Thorium deposits in the C.I.S. and their Prospective characteristics, Proceedings of TC / V. M. Kotova, J. I. Skorovarov. – Meeting IAEA, September, 1997.
39. Lung, M. A present review of the thorium nuclear fuel cycles : Report EUR 17771 EN / M. Lung // Nuclear science and technology / European Commission. – Printed in Luxembourg : Office for Official Publication of the European Communities, 1997.
40. Nuclear Energy Development in the 21st century: Global scenarios and Regional trends / IAEA // Nuclear energy series. – Vienna, 2010. – № NP-T-1.8. – 95 p.
41. Technical Meeting on World Thorium Resources. IAEA 17–21 October 2011. Thiruvananthapuram, India. Hosted by Indian Rare Earths Limited (IREL).
42. The use of (Th, U, Ru)O₂ fuel in a water energy reactor (WWER-1000) phustes and fuel cycle simulation by means of the V.S.O.P. (97) Computer Code FZJ-ISR-IB-1/99 / I. V. Shamanin, A. A. Ukhov, H. J. Rutten, K. Haas, W. Sherver. – Julich, 1999.
43. Uranium 2009: Resources, Production and Demand : A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. – Paris : OECD, July 2010.

Thorium – a promising fuel resource for the nuclear power sector

G.A. Pelymsky¹, Dr. Sc. (Geol.-Mineral.), Lead Research Associate
 V.M. Kotova², Dr. Sc. (Geol.-Mineral.), Lead Research Associate
 P.A. Chekhovich¹, Dr. Sc. (Geol.-Mineral.), Division Head, p.chekhovich@gmail.com
 I.M. Kapitonov¹, Prof. Dr. Sc. (Phys. & Math.)

¹Lomonosov Moscow State University, ²VNIIEKhT OAO

Abstract

The article contains a generalized analysis of thorium sources worldwide and characteristics of thorium mineral reserves and resources in Russia. Opportunities are discussed of thorium application in the nuclear power sector with reactors of different types. A brief review is presented of the available technologies of thorium-bearing ore processing, thorium recovery from a variety of mineral raw materials. Thorium-based fuel fabrication practices are described. Case-studies of thorium application by NPPs are reviewed in brief internationally.

Key words: thorium, thorium-bearing ore deposits, thorium recovery, monazite, loparite, uranium, nuclear power sector, nuclear, thermonuclear, and hybrid reactors, fuel cycle, IAEA.

