

*А. С. Пономаренко, К. О. Алюшкин, А. И. Вальцева*  
Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург  
Alex-Liga@yandex.ru

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТОРИЯ ДЛЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

*В данной работе рассматривается возможность расширения ядерного цикла посредством использования тория. Анализируются преимущества тория по сравнению со стандартным ядерным топливом, обсуждаются основные проблемы, связанные с использованием тория.*

Ключевые слова: *топливный цикл; изотоп; торий; уран; минорные актиноиды.*

*A. S. Ponomarenko, K. O. Alyshkin, A. I. Valtseva*  
Ural Federal University, Ekaterinburg

## THE USE OF THORIUM FOR NUCLEAR ENERGY

*This paper discusses the possibility of expanding the nuclear cycle through the use of thorium. The advantages of thorium in comparison with the standard nuclear fuel are analyzed, the main problems associated with the use of thorium are discussed.*

Key words: *fuel cycle; isotope; thorium; uranium; minor actinoids.*

Изотоп урана-235 содержится в природном уране в очень небольшом количестве – всего 0,7 % (остальные 99,3 % составляет изотоп уран-238), и его нужно выделить, а это дорогостоящий и сложный процесс. Таким же образом можно получать уран-233 путем облучения нейтронами тория-232. Согласно мнению авторов [2] торий можно назвать альтернативой урану-235, однако, не стоит забывать, что сам по себе торий не является ядерным топливом. Но при помещении тория в нейтронное поле даже в реакторе типа ВВЭР можно получить уран-233. Далее полученный уран можно использовать в реакторе. Однако, при получении «полезного»

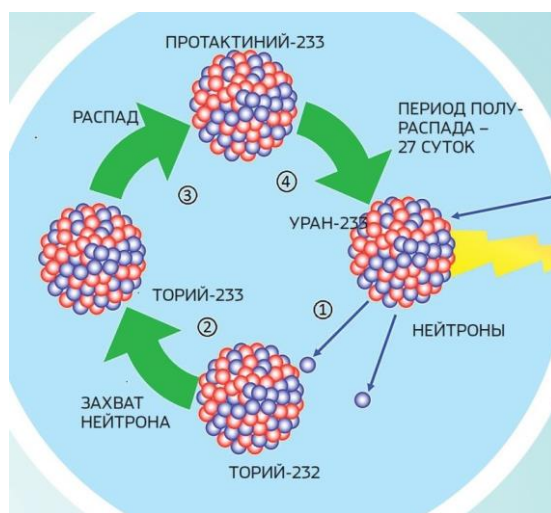
материала из тория образуется уран-232, который приводит образованию таллия-208, излучающего жесткие гамма-кванты. Несмотря на все сложности, торий все равно рассматривается как перспективный материал для наработки урана-233.

Создание устойчивой энергетики будущего невозможно без использования энергии деления ядер U, Pu и Th при их взаимодействии с нейтронами. В настоящее время и в ближайшем будущем основой ядерной энергетики является один из радиоактивных элементов – уран. Происходящий во многих странах мира рост ядерно-энергетических мощностей делает все более актуальной проблему обеспечения АЭС ядерным топливом, расширения сырьевой базы ядерной энергетики. Стратегия развития ядерной энергетики во многих странах мира предусматривает введение ядерных топливных циклов на основе урана и тория. Их ценность заключается в том, что они могут служить источником накопления запасов вторичного ядерного топлива  $^{239}\text{Pu}$  из  $^{238}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$  из  $^{232}\text{Th}$  [3].

Торий был открыт в 1828 году шведским химиком Йенсом Якобом Берцелиусом. Уже с середины XX века торий стал рассматриваться как перспективный элемент для ядерного оружия, с помощью которого можно получить необходимый уран. Если рассматривать торий в качестве заменителя урана, то можно выделить следующие преимущества этого элемента: в земной коре тория в несколько раз больше, чем урана; нет проблемы образования минорных актиноидов, топливо на основе ториевого цикла становится не радиоактивным уже через несколько сот лет против сотен тысяч у уранового цикла; нет необходимости в разделении изотопов; за счет короткоживущего изотопа радона радиоактивное загрязнение при добыче тория существенно меньше, нежели чем при добыче урана; в ториевом топливном цикле нет необходимости построения новых реакторов, можно использовать уже существующие; торий имеет лучшие термомеханические свойства, чем уран; торий менее токсичен [3].

Проблема образования минорных актиноидов при работе ядерного реактора является одной из самых сложных. Топливо, состоящее из 3–5 % урана-235 и 95–97 % урана-238, при поглощении нейтронами образует изотопы нептуния-237, америция-241, америция-243, кюрия-242, кюрия-244, кюрия-245, известные жестким гамма-излучением. Период полураспада таких актиноидов – тысячи лет, следовательно, сроки хранения отработанного ядерного топлива удлиняются на неопределенно количество лет. Учитывая особенности хранения ОЯТ, можно сделать вывод, что для безопасного хранения будет задействована большая территория.

Изотоп торий-232 не склонен к реакции деления под действием нейтронов, однако он вступает с нейтронами в ядерную реакцию, конечным продуктом которой является изотоп урана  $^{233}\text{U}$ , способный к делению нейтронами любых энергий, в том числе – тепловых. Уран-233 – прекрасный компонент ядерного оружия, но он может использоваться и в качестве реакторного топлива. Процесс, использования тория в энергетике, однако, требует сильного нейтронного источника, ядерного реактора на урановом или плутониевом топливе для облучения тория (рисунок).



Ториевый топливный цикл [2]

Таким образом, торий не исключает, а только уменьшает потребность в уране [1].

Уран-233 можно выделять из облученного тория и в дальнейшем можно превратить в ядерное топливо и использовать в атомном реакторе. Такая технология достаточно сложна, само ториевое топливо плохо растворяется в азотной кислоте, а полученный изотоп урана представляет радиационную опасность из-за присутствия изотопа уран-232 и продуктов его распада. Далее облученный в реакторе торий можно растворять в присутствии азотнокислого алюминия. Азотнокислый алюминий используется для предотвращения образования фторидов тория. Следуя технологической цепочке проводят процесс экстракции тория и урана раствором трибутилфосфата в керосине. Образовавшийся изотоп проактиния остается в водной фазе и может быть извлечен хроматографически или адсорбцией на основе двуокиси магния. Отделение тория от изотопа уран-235 производится реэкстракцией.

Реализация ториевых топливных циклов начала изучаться с середины двадцатого века, был проведен ряд экспериментов (Германия, США, Нидерланды, Индия) [1] по пробному облучению ториевого топлива в реакторах до получения высокого уровня выгорания.

В России было создано топливо на основе тория для реакторов ВВЭР-1000, однако из-за уровня эмиссии нейтронов в ходе сжигания тория выше, чем у урана, а это подвергает риску контроль ядерной реакции [3]. Учеными также рассматривается возможность использования торий-урановый цикл в подкритических комплексах на ускорителях, такое использование тория приведет к меньшему образованию актиноидов.

Согласно исследованиям [3], ториевое топливо может использоваться в реакторах таких типов, как: легководные реакторы, высокотемпературные реакторы с газовым охлаждением, газотурбинные модульные реакторы с гелиевым охлаждением, модульные реакторы с насыпным blanketом, реакторы на солевом расплаве, перспективные тяжеловодные реакторы (AHWR). Торий можно использовать для утилизации плутония.

Несмотря на очевидные преимущества ториевого топлива, данный вид топлива не используется на атомных станциях из-за больших запасов урана, сложного процесса извлечения тория (на данный момент времени нет информации о богатых месторождениях), технология переработки ториевых ТВЭЛов достаточно дорогая и сложная – при образовании изотопа уран-232 также образуются  $^{212}\text{Bi}$  и  $^{208}\text{Tl}$ , распад которых сопровождается жестким излучением.

Учитывая вышеизложенные трудности, в настоящее время изучается возможность применения торий-плутониевого топлива, в основу которого заложен оружейный плутоний. Считается, что производство такой комбинации не потребует дорогостоящих комбинаций и перестроек реакторов в отличие от МОКС-топлива [2].

#### Список использованных источников

1. Ядерные технологии : учебник для бакалавриата и магистратуры / И. Н. Бекман. М. : Юрайт, 2017. 404 с.
2. Торий : спасет ли он планету от энергетического кризиса? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/232575-molot-tora/> (дата обращения: 07.11.2018)
3. Торий в ядерной энергетике / С. В. Алексеев, В. А. Зайцев. М. : Техносфера, 2014. 288 с.