

УДК 621.039.56

ТОРИЕВЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ THORIUM FUEL CYCLE

В.Ю. Себещук, А.В. Яворский

Научный руководитель-В.Н. Нагорнов, кандидат экономических наук, доцент
Белорусский национальный технический университет,
г.Минск, Республика Беларусь

v_nagornov@tut.by

V.Sebiashchuk, A.Yavorski

Supervisor – V. Nagornov, Candidate of Economic Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: *Природный уран, который используется в сырьё для изготовления топлива для современных ядерных энергетических реакторов, сильно истощается, что в обозримом будущем (до 80-100 лет) может привести к исчезновению ядерной энергетике. Статья посвящается ториевому топливному циклу, который может продлить срок использования ядерной энергии в несколько раз. В данном материале рассматривается торий и топливо на основе тория, как альтернатива или дополнение к существующему урановому топливу.*

Annotation: *Natural uranium, which is used in raw materials for the manufacture of fuel for modern nuclear power reactors, is greatly depleted, which in the foreseeable future (up to 80-100 years) may lead to the disappearance of nuclear power. The article is devoted to the thorium fuel cycle, which can extend the life of nuclear energy several times. In this article is discussed thorium and thorium-based fuels as an alternative or addition to existing uranium fuel.*

Ключевые слова: *ториевый цикл, ядерная энергетика, радиоактивные отходы, перспективы энергетике, альтернатива.*

Key words: *thorium cycle, nuclear energy, radioactive waste, energy perspective, alternative.*

Введение

Одной из основных проблем современной атомной энергетики являются переработка и захоронение радиоактивных отходов, получаемых в результате работы АЭС. Самым «проблемным» является отработавшие ядерное топливо, так как оно высокорadioактивно и содержит продукты деления, а также трансурановые элементы. Одним из способом решения данной проблемы является применение ториевого ядерного цикла.

Основная часть

Ториевый топливный цикл — это цикл, в котором основу топлива составляет торий Th-232. Однако сам торий не является делящимся материалом, т.е. он при попадании нейтрона не делится как уран U-235. Он поглощает нейтрон, превращаясь в новый элемент, а именно Th-233. После двух последовательных β^- -распадов этот изотоп тория превращается в уже делящийся уран U-233, который и является ядерным топливом. В том, что природный торий не является делящимся материалом есть и положительные

стороны и отрицательные. Положительная заключается в том, что в реакторе, работающем на тории как исходном материале, отсутствует избыточная реактивность^[1], которая представляет потенциальную опасность. Отрицательной стороной является то, что наработка ядерного топлива из Th-232 в U-233 проходит через генерацию промежуточного изотопа протактиний Pa-233. Он является «нейтронным ядом», т.е. очень сильно поглощает нейтроны. Кроме этого, период полураспада Pa-233 относительно велик и составляет ~27 дней. В совокупности эти два фактора не позволяют построить «классический» быстрый реактор на U-233 и Th-232, а также требует более длительного времени охлаждения, по крайней мере, одного года для завершения распада Pa-233 в U-233.^{[2][3]}

На заре развития атомной энергетики, с середины 50-х до середины 70-х годов, торий представлял интерес как сырье для пополнения запасов урана. Особенно этот интерес был силен у стран, которые имели крупные месторождения тория, а запасов урана не хватало для своей долгосрочной ядерно-энергетической программы. Однако разработка новых месторождений урана, его относительно долгое использование в реакторе, а также наличие уже работающих исследовательских реакторов на урановом цикле, сделали торий не конкурентоспособным сырьем для самостоятельного топлива. Поэтому, в реакторах торий или топливо на основе тория в виде металла, карбида или оксида были использованы вместе с U-235 или Pu-239 для наработки «делящегося» U-233, который может использоваться как «делящийся» материал для топлива.

Ториевое топливо и топливные циклы имеют следующие преимущества и проблемы:

Преимущества:

1) Торий содержится в земной коре больше, чем урана примерно в 3-4 раза. Кроме это он легко используемый ресурс во многих частях света и никогда прежде не использовался с целью получения прибыли. Это делает торий хорошим дополнением к урановому топливу для создания долгосрочной и устойчивой ядерной энергетики.^[2]

2) Топливный цикл, основанный на тории, является одним из самых заманчивым способом выработки ядерной энергии в долгосрочной перспективе, а также имеет низкую радиотоксичность отходов. Также перейти на ториевый цикл можно сжигая оружейный плутоний.^[2]

3) Поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов Th-232 (7,4 барна) почти в три раза больше, чем у U-238 (2,7 барна). Следовательно, при облучении одинакового количества Th-232 и U-238, количество урана-233 получится больше с тория. Таким образом, торий является лучшим «плодородным» материалом, чем U-238 в тепловых реакторах.^[2]

4) Коэффициент размножения ядер U-233 больше 2,0 в широком диапазоне спектра тепловых нейтронов, в отличие от U-235 и Pu-239, где коэффициент размножения меньше 2,0. Таким образом, в отличие от цикла U-238–Pu-239, в котором селекция может быть получена только со спектрами

быстрых нейтронов, топливный цикл Th-232–U-233 может работать с быстрыми, эпитепмальными или тепловыми спектрами.^[2]

5) Диоксид тория имеет более стабильную химическую структуру, а также имеет достаточно высокую радиационную стойкость в отличие от диоксида урана. Скорость выделения продуктов деления для топлив на основе ThO₂ на порядок ниже, чем для UO₂. На основе того, что ThO₂ имеет высокую теплопроводность и низкий коэффициент теплового расширения сравнивая его с UO₂ можно сделать вывод, что ThO₂ тория обладает лучшими теплофизическими свойствами, чем UO₂. Следовательно сделаем вывод, что топливо основой которого является оксид тория имеет более качественные эксплуатационные характеристики.^[2]

6) В топливном цикле U-232–233 значительно меньшее количество плутония и долгоживущих актинидов (кюриев, америциев, нептуний и др.) образуются по сравнению с топливным циклом U-238–Pu-239, что сводит к минимуму радиотоксичность, связанную с отработавшим топливом.

Проблемы:

1) Температура плавления ThO₂ (3 350 °C) значительно выше по сравнению с UO₂ (2 800 °C). Следовательно, гораздо более высокая температура спекания (>2 000 °C) требуется для производства смешанных оксидных топлив высокой плотности на основе ThO₂ и ThO₂.

2) Топливо основой которого является торий, подвергшийся облучению, имеет в своем составе большое количество U-232, который в свою очередь обладает периодом полураспада 73,6 года, а также является источником сильных гамма излучающих продуктов Bi-212 и Tl-208 имеющих малый период полураспада. Следствием этого является накопление дозы облучения от отработавшего топлива основой которого является торий или U-233, что в свою очередь подразумевает дистанционную и автоматизированную переработку отходов, что приводит к удорожанию топливного цикла.

3) Процесс разделения урана, плутония и тория от отработанного (Th, Pu)O₂-топливо, хотя и возможен, еще не разработан.

4) В связи с отсутствием достаточного количества опыта и баз данных по ториевому топливному циклу, необходимо ожидать дальнейших исследований, которые выведут топливный ториевый цикл в более крупное коммерческое использование.^[2]

Заключение

Выполненный анализ позволяет сделать вывод о том, что ториевый цикл может служить альтернативой существующему урановому циклу. Однако пока у атомной индустрии нет особых потребностей по строительству ториевой энергетики, т. к. урановый цикл освоен и нет недостатка сырья (урановый руды). Торий станет перспективным только тогда, когда стоимость килограмма урана превысит 300\$^[2].

Литература

1. Торий-это будущее атомной энергетики и арктики//[электронный ресурс]-Режим доступа: <http://rareearth.ru/ru/pub/20180125/03686.html>. Дата доступа: 07.04.2021.
2. Thorium fuel cycle-Potential benefit and challenge//[электронный ресурс]-Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1450_web.pdf. Дата доступа: 07.04.2021.
3. Торий в ядерной энергетике: плюсы, минусы, подводные камни//[электронный ресурс]- Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/382991/>. Дата доступа: 07.04.2021.