

Рабочие параметры МГД-генераторов

Параметр	Импульсный МГД-генератор			
	«Памир-1»	«Прикаспий» («Памир-2»)	«Прогноз-1» («Урал»)	«Хибины»
Мощность в согласованной нагрузке, МВт	16	16	30	40
Напряжение, В	1350	800	600	2000
Ток в нагрузке, кА	≤1	≤7	≤2,2	≤20
Длительность импульса, с	2,7	2,7–8	3,8	3,7–9
Расход продуктов сгорания, кг/с	25–30	50	70–100	140
Масса МГД-генератора, т	15	25	20	40

Для ядерного реактора типа PEWEE-1 тепловой мощностью 514 МВт выполнена рядом ученых проектная разработка электроэнергетической установки МГДГ, обеспечивающая удельную мощность 2000 МВт/м³ при длительности рабочего периода 64 мин., коэффициент преобразования энтальпии до 50 %. Рабочим телом является водород с цезиевой присадкой при неравновесной ионизации.

Другие аналогичные проекты и проработки космических ядерных автономных энергетических установок (мощностью до 1000 МВт) по большей части базируются на компактных дисковых МГДГ, работающих по замкнутому циклу на неравновесной плазме [1].

Практическая реализация подобных систем в значительной степени определяется созданием надежных ядерных реакторов для космических летательных аппаратов.

Список литературы

1. Non-Equilibrium MHD Disk Generator Using Cesium-Seeded Hydrogen / W. D. Jackson // XI Intern. Conf. on MHD Electric Power Generation. Beijing. 1992. V. 4. P. 1320–1323.

УДК 621.039

Терентьев М. С., Ташлыков О. Л.
Уральский федеральный университет,
maxterentyev@mail.ru

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ТОРИЕВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

В мире в силу исторических причин доминирует уран-плутониевый ядерный топливный цикл (ЯТЦ), когда в ядерном топливе, облучаемом нейтронами в реакторе, происходит накопление плутония, который может быть выделен и использован. Использование обогащенного урана и наработка плутония при широкомасштабном развитии ядерной энергетики связаны с нарастанием

угрозы неконтролируемого распространения ядерных материалов. В отработавшем уран-плутониевом топливе происходит накопление высокофонового плутония ($^{239,240,241,242}\text{Pu}$), нептуния (^{237}Np), трансплутониевых элементов ($^{241,247}\text{Am}$, $^{242,244}\text{Cm}$), изотопов урана ($^{232,234,236}\text{U}$) и других долгоживущих продуктов деления – ^{99}Tc , ^{129}I , ^{79}Se , ^{137}Pd , ^{135}Cs периоды полураспада которых составляют от нескольких десятков до сотен тысяч лет (например, для ^{99}Tc – $2,12 \cdot 10^5$) [1].

Альтернативой уран-плутониевому ЯТЦ является ториевый топливный цикл.

Из-за распространенности тория, его инертной химической природы, хорошей теплопроводности и выгодных нейтронно-физических характеристик практически все реакторы в то или иное время изучались с точки зрения применения ториевого топлива. Для оценки перспективности перехода с уран-плутониевого на ториевый ЯТЦ необходимо сравнить затраты на отдельных этапах обоих типов.

Общий объем известных и оцененных ресурсов тория по цене извлечения 80 долл/кг или ниже составляет 4,4 млн т, а урана – 2,6 млн т [2–3]. На основании проведенного анализа многочисленных источников обобщены значения стоимости фабрикации и переработки различных ЯТЦ в легководных, тяжеловодных и быстрых реакторах (рис. 1, 2).

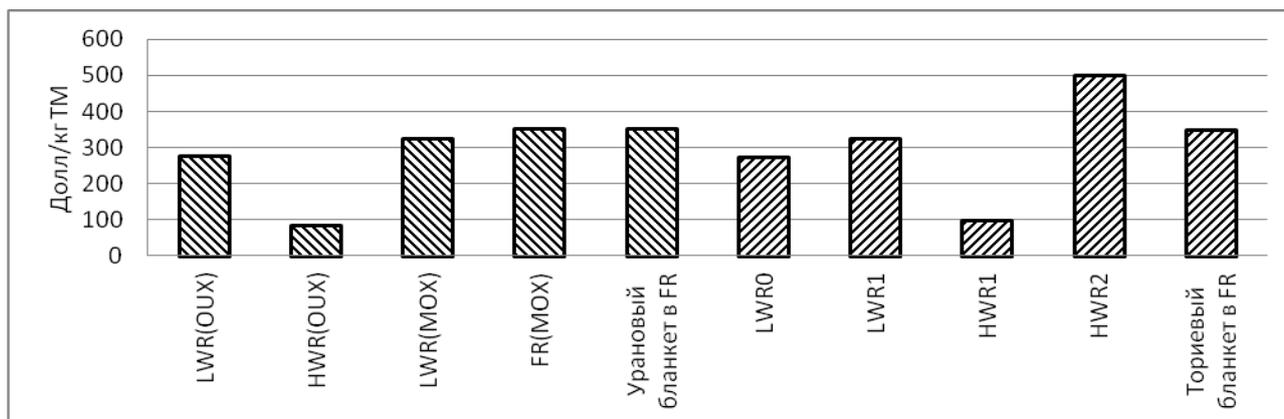


Рис. 1. Стоимость фабрикации топлива:

LWR – легководный реактор: HWR – тяжеловодный реактор: FR – быстрый реактор: LWR0 – легководный реактор на урановом оксидном и ториевом топливе: LWR1 – легководный реактор на ториево-плутониевом топливе; HWR1 – тяжеловодный реактор на ториево-плутониевом топливе; HWR2 – тяжеловодный реактор на тории, восстановленном уране-233 и плутонии

Несмотря на то что расходы на фабрикацию ториевого топлива не ниже, чем в урановом топливном цикле, а затраты на переработку значительно выше, ториевый цикл имеет более благоприятные экономические характеристики по ряду причин:

– для загрузки в реактор пригоден природный торий, который, в отличие от урана, не нужно обогащать, проводя сложную и дорогостоящую операцию разделения изотопов;

– высокая глубина выгорания тория ставит его в выгодное положение перед ураном, стержни которого нужно извлекать из реактора после того, как в них использовано менее 10 % содержавшегося «топлива», торий же можно использовать полностью;

– оксид тория является более тугоплавким и устойчивым веществом, чем оксид урана, что открывает возможность для создания высокотемпературных реакторов на тории с рабочей температурой 700–800 °С. КПД такого реактора может достигать 50–55 %, что почти вдвое выше, чем у традиционных урановых [4].

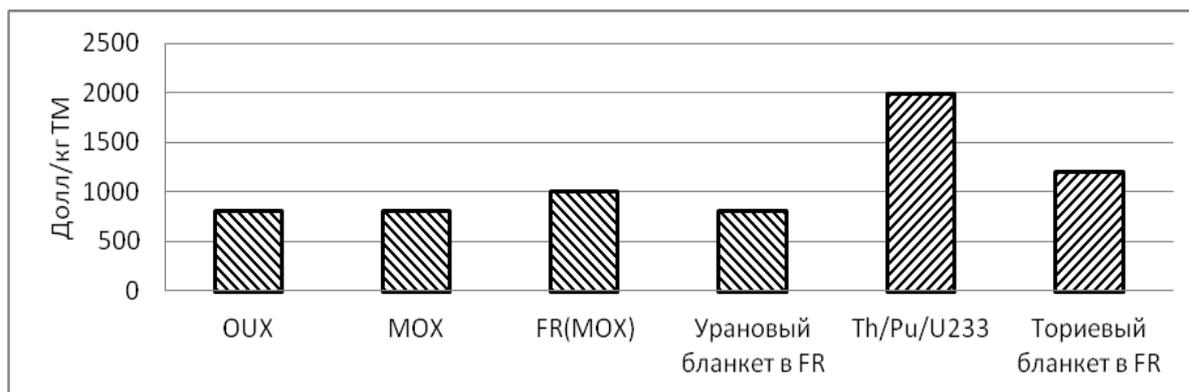


Рис. 2. Стоимость переработки топлива

Существуют и новые типы реакторов для ториевого ЯТЦ. Одну из перспективных технологий предложил нобелевский лауреат Карло Руббиа. По его проекту в реакторе предлагается использовать ториевое ядерное топливо, а в качестве «запала» применять ускоритель протонов. В 2010 г. норвежская компания Aker Solutions приобрела патент у К. Руббиа и приступила к проектированию реактора ADTR (субкритический реактор с ускорительной системой). Мощность установки оценивается в 600 МВт, ее стоимость, по предварительным данным, может превысить 3 млрд долл. с учетом предварительных исследовательских работ [4].

Реактор ADTR гораздо безопаснее традиционного, так как отключается остановкой протонного пучка. Экономика ADTR перспективна из-за компактности первичных систем, которые работают при низком давлении с большими тепловыми запасами, и достаточно высокой температурой охлаждающей жидкости, что позволяет использовать энергетические циклы высокой эффективности. Основным преимуществом реакторов такого типа является способность сжигать долгоживущие актиниды (уран, плутоний, америций, кюрий и т. д.), т. е. не только производить дешевую электроэнергию, но и упрощать и удешевлять утилизацию ядерных отходов.

Другой перспективной установкой является реактор типа LFTR (Liquid Fluoride Thorium Reactor). В нем предлагается отойти от применения твердых топливных элементов и использовать в качестве теплоносителя расплавы солей-фторидов, в которых хорошо растворяются оксиды тория и урана. К экономическим преимуществам использования жидкофторидного ториевого реактора относят низкое давление в системе, исключающее аварии, связанные с разры-

вом корпуса и расплавлением активной зоны, что позволяет значительно снизить капитальные издержки на материалы и сократить сроки строительства. Небольшая активная зона ведет к общему снижению капитальных затрат и создает возможность строить реакторы любого размера и мощности. Уменьшение требований к безопасности и высокий уровень автоматизации могут снизить требования к численности персонала. Таким образом, текущие операционные издержки для гигаваттной станции могут снизиться с 50 до 5 млн долл. в год [2].

Реализация уран-ториевого топливного цикла позволяет полностью избавиться от недостатков уран-плутониевого топливного цикла и достигнуть таких технических показателей ЯТЦ, которые ограничены только физической природой деления ядер. Технологии, необходимые для реализации ториевого топливного цикла, инновационны, не развиты и в настоящее время энергетические компании не интересуют, поскольку связаны со значительными финансовыми инвестициями и рисками без внятных выгод. Только Индия и Китай намерены проводить исследования в этой области. Тем не менее в долгосрочной перспективе использование тория представляется весьма многообещающим.

Список литературы

1. Муратов О. Э., Тихонов М. Н. Альтернативный ЯТЦ: необходимость и актуальность [Электронный ресурс]. URL: <http://www.proatom.ru/> (дата обращения: 20.11.2014).
2. Некоторые вопросы экономических перспектив ториевой ядерной энергетики. [Электронный ресурс]: доклад объединения Bellona URL: <http://www.bellona.ru> (дата обращения: 20.11.2014).
3. Thorium Report Committee. Thorium as an energy source – Opportunities for Norway // Published by the Thorium Report Committee. 2008, february.
4. Тарнавский В. Ториевый шанс [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ukrrudprom.ua/> (дата обращения: 20.11.2014).

УДК 620.97

Терентьева Т. В., Климова В. А.
Уральский федеральный университет,
v.a.klimova@urfu.ru

ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ДОЖДЯ ДЛЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Дождь – относительно низкопотенциальный ресурс. Однако у дождя как источника возобновляемой энергии есть ряд преимуществ. Прежде всего, это доступность для климатических районов с низкой солнечной радиацией в течение полугодового цикла. Установка, использующая энергию дождя, была бы актуальна в сезоны дождей в странах с муссонным климатом. Для этих районов интересно совмещение солнечной панели и дождевой, использующих в разные времена года разные источники энергии. Среди положительных черт также