

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кнорринг Г.М. Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения. – Л.: Энергия, 1973. – 200 с.
2. Moon P.H. The Scientific basis of the illuminating engineering. – N.Y.: Dover Publications, 1961. – 608 p.
3. Шиндель М.Я. О расчете горизонтальной освещенности от равномерного прямоугольника // Светотехника. – 2006. – № 3. – С. 14–15.
4. Гуров М.М. Сборник задач по основам светотехники. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 127 с.
5. Никитин В.Д. Расчет освещения точечным методом. – Томск: Изд-во ТПИ, 1985. – 95 с.
6. Никитин В.Д. Расчет освещенности от прямоугольных излучателей с некосинусным светораспределением // Светотехника. – 1987. – № 7. – С. 9–12.
7. Никитин В.Д. Ортогональные проекции светового вектора в поле прямоугольного излучателя с косинусно-степенным светораспределением // Тез. докл. VI Междунар. светотехнической конф. – Калининград, 2006. – С. 155–156.
8. Тканевый световой потолок // Светотехника. – 2008. – № 1. – С. 37.

Поступила 02.10.2008 г.

УДК 621.039

АНОМАЛИЯ В ЗАВИСИМОСТИ РЕЗОНАНСНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НЕЙТРОНОВ ОТ ОТНОШЕНИЯ ОБЪЕМОВ ЗАМЕДЛИТЕЛЯ И ТОПЛИВА В ТОРИЙСОДЕРЖАЩИХ РАЗМНОЖАЮЩИХ СИСТЕМАХ

И.В. Шаманин, А.В. Годовых, П.А. Селезнев

Томский политехнический университет
E-mail: shaman@phtd.tpu.ru

Приведены результаты численных экспериментов, определяющие границы области значений отношения «объем замедлителя/объем топлива», в которой наблюдается аномалия в ходе зависимости резонансного поглощения в размножающей среде от этого отношения. Доказаны физические преимущества использования Th^{232} по сравнению с U^{238} в качестве воспроизводящего материала в составе ядерного топлива.

Ключевые слова:

Размножающая среда, нейтроны, резонансное поглощение, уран, торий, водно-топливное отношение, оптимизация.

Состояние проблемы

Концепции торий-уранового ядерного топливного цикла уже несколько десятков лет. Потеря интереса к ней практически на старте исследований вызвана двумя причинами:

- высокой радиоактивностью ториевого концентрата, которая обусловлена наличием в нем изотопа Th^{232} и цепочкой радиоактивных превращений, начинающейся с него;
- образованием изотопа U^{232} при облучении торий-содержащего топлива, наличие которого в облученном топливе также является началом цепочки радиоактивных превращений, в ходе которых образуются «жесткие» гамма-излучатели.

Сам же сырьевой изотоп Th^{232} , из которого образуется делящийся U^{233} , не представляет большой радиологической опасности. Он альфа-активен, но период его полураспада (α -распад) составляет 13,9 млрд л [1]. Возраст планеты Земля в настоящее время считается равным около 4,5 млрд л, если основываться на скоростях радиоактивного распада урана и тория [2]. Период полураспада U^{238} , играющего определяющую роль в уран-плутониевом ядерном топливном цикле, составляет 4,47 млрд л [1], т. е. его значение близко к возрасту Земли, а значение периода полураспада Th^{232} значительно

превосходит возраст Земли. Вообще говоря, торий – один из немногих радиоактивных элементов, открытых задолго до появления самого понятия «радиоактивность». Обнаружил оксид тория Берцелиус, исследуя редкий минерал, который теперь называют торитом (ThSiO_4). Торит содержит до 77 % оксида тория ThO_2 . По сравнению с очень многими актиноидами и с учетом выше отмеченного Th^{232} можно считать практически стабильным, что объясняет тот факт, что его содержание в земной коре в 5 раз больше, чем урана.

Возобновление интереса к использованию тория в ядерном топливном цикле вызвано двумя причинами:

- беспокойством за стабильность сырьевой базы ядерной энергетики [3] и необходимостью утилизации значительных излишков урана и плутония, имеющих «оружейную кондицию» [4, 5];
- обнаружением серьезных преимуществ Th^{232} по сравнению с U^{238} при их использовании в традиционном качестве – как воспроизводящих нуклидов в ядерном топливном цикле. Эти преимущества обусловлены особенностями и отличиями их ядерно-физических свойств на уровне элементарных процессов взаимодействия нейтронов с их ядрами [6].

Было обнаружено, что структура резонансной области в зависимости сечения поглощения нейтронов от энергии последних для сырьевого чётно-чётного нуклида Th^{232} обеспечивает ему неоспоримые преимущества по сравнению с U^{238} в части обеспечения безопасности ядерных реакторов на тепловых нейтронах, топливом которых являются торийсодержащие композиции [6]. Преимущества обусловлены тем, что торий, как резонансный поглотитель, обеспечивает большие значения отрицательных температурных коэффициентов реактивности и позволяет пересмотреть привычные и общепринятые подходы при конструировании тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок ядерных реакторов. В частности, возможность увеличения отношения объема замедлителя к объему топлива создает предпосылки для создания активных зон, тепловая инерция которых значительно выше привычных значений. Большая тепловая инерция также нивелирует действие быстрого положительного мощностного эффекта реактивности при резких сбросах нейтронной мощности. Ядерные реакторы с топливом, в состав которого входит Th^{232} как сырьевой нуклид, являются более безопасными по сравнению с реакторами, активная зона которых загружена урановым топливом.

Требуются практически значимые результаты, которые позволяют перейти к рассмотрению физики размножающих систем с конкретным материальным составом и геометрическими параметрами составляющих их элементов периодичности.

В настоящей работе приведены результаты численных экспериментов, выполненных с целью определения материальных и геометрических параметров структуры размножающей среды, сочетание которых обеспечивает возможность создания тепловыделяющих элементов ядерных реакторов повышенной безопасности.

Постановка и реализация численного эксперимента

Моноэнергетический поток нейтронов с энергией 4,65 кэВ, что соответствует верхней границе интервала энергий, в котором находятся сильные резонансы как для U^{238} , так и для Th^{232} , падает на многослойную систему: замедлитель (з) – слой резонансного поглотителя – топлива (т) – з-т-з-т. Всего шесть слоев, как это показано на рис. 1.

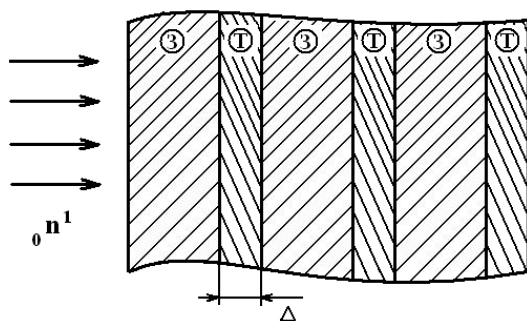


Рис. 1. Структура многослойной системы замедлитель – топливо

Процесс прохождения нейтронов через систему моделируется в координатах (X, Y, Z) методом стати-

стических испытаний [7]. Используется предположение постоянства сечений взаимодействия нейтронов с ядрами среды на отрезке траектории и в пределах энергетической группы. Значения сечений взаимодействия задаются в соответствии с библиотекой констант JENDL 3.2 [8]. При моделировании контролируются значения вероятности прохождения нейтронов через систему p_{pass} , вероятности отражения от системы (альбеда) p_{refl} и вероятности поглощения в системе p_{abs} , а также выполнение условия $p_{pass} + p_{refl} + p_{abs} = 1$. Количество моделируемых траекторий обеспечивает статистическую погрешность в интервале 0,1...0,2 %.

Толщина каждого слоя резонансного поглотителя в численном эксперименте остается неизменной, а толщина каждого слоя замедлителя увеличивается (с одинаковой кратностью). При этом отношение толщины слоя замедлителя к слою резонансного поглотителя увеличивается от 1 до 100. В результате моделируются практически интересные случаи, в которых отношение объема замедлителя к объему топлива в размножающей системе увеличивается от 1 до 100 при постоянном объеме топлива.

Результаты численных экспериментов

В ходе численных экспериментов установлены границы области значений отношения $V_{зам}/V_{мон}$ (объем замедлителя/объем топлива), в которой наблюдается аномалия, обнаруженная ранее в работах [9, 10] и указывающая на преимущества Th^{232} по сравнению с U^{238} при использовании его в качестве воспроизводящего материала.

Если толщина слоя резонансного поглотителя составляет $\Delta=400$ мкм, что соответствует размеру топливного ядра дисперсионного ядерного топлива, а замедлителем является графит, то аномально низкое поглощение нейтронов в системе, содержащей Th^{232} , по сравнению со случаем U^{238} наблюдается при $40 < V_{зам}/V_{мон} < 70$. На рис. 2 приведена зависимость вероятности резонансного поглощения в системе от значения $V_{зам}/V_{мон}$ для $\Delta=400$ мкм.

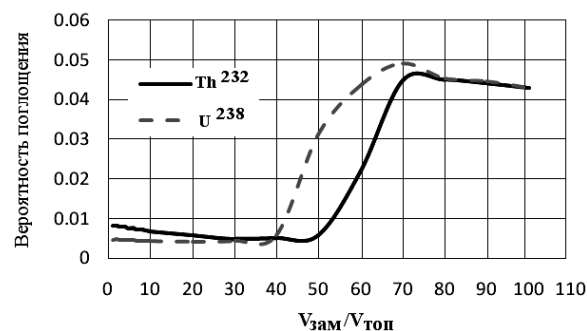


Рис. 2. Аномалия зависимости резонансного поглощения в системе

При $V_{зам}/V_{мон} \approx 50$ резонансное поглощение в уран-содержащей системе превосходит таковое в торийсодержащей системе в 6 раз. В интервале $40 < V_{зам}/V_{мон} < 50$ вероятность резонансного поглощения в торийсодержащей системе составляет около $5 \cdot 10^{-3}$ и меняется незначительно, в то время как в

урансодержащей системе она возрастает от $5 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-2}$. В работе [9] показано, что оптимальные параметры размножающей решетки, содержащей Th^{232} , достигаются при значительно больших отношениях $V_{\text{зам}}/V_{\text{мон}}$ по сравнению со случаем U^{238} для легководного замедлителя (в 2...5 раз). В рассмотренном выше случае вероятность избежать резонансного захвата ($1-p_{\text{abs}}$) составляет 0,97 при $V_{\text{зам}}/V_{\text{мон}} \approx 50$ для уран-графитовой решетки и при $V_{\text{зам}}/V_{\text{мон}} \approx 65$ для торий-графитовой решетки. Вероятность избежать захвата, равная 0,98, достигается при $V_{\text{зам}}/V_{\text{мон}} \approx 45$ для уран-графитовой решетки и при $V_{\text{зам}}/V_{\text{мон}} \approx 60$ для торий-графитовой решетки.

Для Th^{232} в энергетических интервалах 4,65...10 эВ и 10...21,5 эВ в зависимости сечения поглощения нейтронов от энергии последних резонансы отсутствуют. Для U^{238} в этих интервалах находятся два мощных резонансных уровня с амплитудными значениями сечений 11000 и 8000 б. Отсутствие резонансов приводит к тому, что при замедлении нейтронов в торийсодержащей среде возрастает значение плотности замедления нейтронов в энергетическом интервале, соответствующем сумме интервалов этих групп. Следовательно, возрастает плотность потока нейтронов с энергиями ниже 4,65 эВ вплоть до тепловой энергии. Увеличение отношения концентрации ядер замедлителя к концентрации ядер топлива, в состав которого входит и сырьевой нуклид, вместе с отмеченным эффектом должно еще больше увеличить плотность потока нейтронов, имеющих энергию ниже 4,65 эВ, по сравнению с U^{238} . По существу в размножающей среде для нейтронов увеличивается вероятность избежать резонансного захвата.

Заключение

Обнаруженная аномалия в зависимости резонансного поглощения в размножающей среде от отношения «объем замедлителя/объем топлива», вызванная заменой сырьевого нуклида U^{238} на сырьевой нуклид Th^{232} , указывает на целесообразность пересмотра традиционных конструктивных решений, которые приняты для «размножающих решеток». Например, в высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах [11] «рабочие» значения отношения количества ядер графита (замедлителя) к количеству ядер тяжелых элементов в твэле (сырьевой и делящийся нуклиды вместе) находятся в интервале от 200 до 600. Твэл представляет собой графитовый шар диаметром около 6 см, в объеме которого равномерно распределены (диспергированы) микротвэлы. Обогащение по U^{235} при этом составляет от 6,5 до 10 % (остальное – ядра U^{238}), диаметр ядер микротвэлов составляет от 400 до 700 мкм. Ядро микротвэла выполнен из диоксида урана. В каждом шаровом твэле содержится около 6 г урана. Отношение «объем замедлителя/объем топлива», таким образом, значительно превышает 100. При таких значениях отношения (рис. 2) резонансное поглощение в микротвэлах, содержащих сырьевой U^{238} , не будет заметно изменяться при его замене на

Th^{232} . Если же изменить значение отношения до 50, заменив при этом U^{238} на Th^{232} , то резонансное поглощение уменьшится почти в 6 раз. Замена будет состоять в увеличении количества микротвэлов, равномерно рассредоточенных по объему шарового твэла. На первый взгляд, это влечет за собой увеличение количества делящегося U^{235} в каждом шаровом твэле, что нецелесообразно. Но, поскольку вероятность избежать резонансного поглощения стала существенно выше, количество делящегося U^{235} в каждом микротвэле можно значительно уменьшить. Более того, U^{235} можно заменить на плутоний оружейной кондиции. Небольшие количества делящегося тепловыми нейтронами U^{235} или Pu^{239} будут выполнять функцию «запала», при выгорании которого из Th^{232} будет нарабатываться делящийся U^{233} . Схема такого плутоний-ториевого ядерного топливного цикла подробно рассмотрена в работе [6].

Если говорить о водо-водяных реакторах, то принятое на сегодня значение отношения «объем замедлителя/объем топлива» в них значительно меньше 10. В случае легководного замедлителя аномалия в зависимости резонансного поглощения от отношения «объем замедлителя/объем топлива», вызванная заменой сырьевого нуклида U^{238} на сырьевой нуклид Th^{232} , наблюдается при значениях около 10. Причина в том, что замедляющая способность воды ($\approx 1,50$) несоизмеримо больше замедляющей способности графита ($\approx 0,063$). Даже если принять во внимание то, что коэффициент замедления для графита (≈ 170) превосходит таковой для воды (≈ 69), оптимальные по значению коэффициента размножения параметры решетки с топливом, содержащим сырьевой Th^{232} и делящийся U^{235} или плутоний оружейной кондиции, обеспечивают широкие возможности для пересмотра конструкции тепловыделяющих сборок. Простая замена U^{238} на Th^{232} при значении отношения в пределах от 1,2 до 2,1 не дает выигрыша. Увеличение отношения до 8...10 при одновременном увеличении количества U^{235} или плутония в торийсодержащем топливе делает такую замену очень эффективной. Например, если объем активной зоны и диаметр тепловыделяющих элементов оставить неизменными, то при содержании делящегося нуклида 10...12 % (U^{235} или оружейный плутоний) в ториевом топливе, количество топлива в активной зоне можно уменьшить в 3...4 раза. Тепловая мощность ядерной энергетической установки при этом останется той же. Техническая реализация такого изменения будет состоять в уменьшении количества тепловыделяющих элементов в каждой тепловыделяющей сборке. Если уран-водные решетки относятся к «тесным решеткам», то торий-водные решетки должны быть «разреженными».

Таким образом, можно предположить, что техническая реализация концепции плутоний-ториевого ядерного топливного цикла не будет сопряжена с большими трудностями, а замена в ядерном топливе сырьевого U^{238} на сырьевой Th^{232} не только расширит сырьевую базу ядерной энергетики, но и сделает менее напряженной проблему обращения с облученным ядерным топливом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордеев И.В., Кардашев Д.А., Малышев А.Д. Справочник по ядерно-физическим константам для расчетов реакторов. – М.: Атомиздат, 1960. – 280 с.
2. Frederic B. Jueneman Secular Catastrophism // Industrial Research and Development. – 1982. – V. 24. – № 6. – P. 21.
3. Муругов В.М., Троянов М.Ф., Шмелев А.Н. Использование теории в ядерных реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
4. Пономарев-Степной Н.Н., Лунин Г.Л., Морозов А.Г. и др. Ториевый реактор ВВЭР-Т // Атомная энергия. – 1998. – Т. 85. – № 4. – С. 263–277.
5. Шаманин И.В., Ухов А.А., Рютген Г.-И., Хаас К., Шерер В. Результаты моделирования параметров топливного цикла для водо-водяного энергетического реактора // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – № 4. – С. 53–64.
6. Shamanin I.V., Ukhov A.A., Rutten H.-J., Haas K., Sherer W. The Use of (Th, U, Pu)O₂ Fuel in a Water Water Energy Reactor (WWER-1000): Physics and Fuel Cycle Simulation by means of the V.S.O.P.(97) Computer Code, FZJ-ISR-IB-1/99. – Forschungszentrum, Julich, 1999. – 40 p.
7. Золотухин В.Г., Майоров Л.В. Оценка параметров критичности реакторов методом Монте-Карло. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 120 с.
8. JENDL, version 3.2. Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), 1997.
9. Шаманин И.В., Годовых А.В. Структура резонансной области поглощения ядер ²³⁸U и ²³²Th и зависимости ее параметров от температуры // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 5. – С. 49–56.
10. Шаманин И.В. Следствия, вызванные отличиями структур резонансной области поглощения ядер ²³⁸U и ²³²Th // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 11 (43). – С. 47–53.
11. Карпов В.А. Топливные циклы и физические особенности высокотемпературных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.

Поступила 30.09.2008 г.

УДК 669.882

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОЦЕСС ОЧИСТКИ РАСПЛАВА УРАНА ОТ АЗОТА И УГЛЕРОДА

И.Д. Брус, А.С. Буйновский, Н.С. Тураев

Томский политехнический университет

E-mail: gerin@phtd.tpu.edu.ru

Рассмотрено влияние ультразвуковой обработки на процесс удаления азота и углерода из расплава металлического урана при вакуумном рафинировании. Показано, что ультразвук увеличивает коэффициент массопереноса в среднем для азота в 2,58 и для углерода в 2,36 раза.

Ключевые слова:

Ультразвуковая обработка, расплав металлического урана, вакуумное рафинирование, коэффициент массопереноса.

В ответственных изделиях из обогащенного урана предъявляются особо строгие требования к содержанию в них элементов, ухудшающих физико-механические характеристики изделий. К ним относятся азот и углерод. Их присутствие приводит к увеличению хрупкости, уменьшению ударной вязкости, снижению временного сопротивления на разрыв.

Рафинировочная плавка в индукционных вакуумных печах не обеспечивает полного удаления данных примесей. Для увеличения степени отчистки нами была предложена ультразвуковая обработка расплава урана.

При кальцийтермическом восстановлении тетрафторида урана в слитке чернового урана наблюдаются примеси, внесенные из исходного соединения, металла восстановителя, футеровки корпуса, а также продукты реакции урана с азотом и кислородом воздуха, например, оксокарбонитриды урана. Для удаления примесей черновой уран подвергается

рафинировочной плавке в вакуумных индукционных печах.

Можно отметить два механизма удаления примесей [1].

Первый – испарение легкокипящих компонентов. Примесь будет испаряться тогда, когда упругость пара данной примеси над расплавом будет больше парциального давления её в газовой фазе. С учётом законов Рауля и Дальтона примесь испаряется при условии:

$$P_i^0 N_i \geq P_{ос} \cdot n_i,$$

здесь P_i^0 – упругость пара примеси при температуре плавки; $P_{ос}$ – общее давление в газовой фазе над расплавом; N_i и n_i – мольная доля примеси в расплаве и в газовой фазе.

Чтобы уменьшить содержание примеси в расплаве (N_i) нужно снижать общее давление над рас-