

РЕЗУЛЬТАТЫ ТРАНСМУТАЦИИ МАЛЫХ АКТИНИДОВ В СПЕКТРЕ НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Ю.А. Казанский*, **Н.В. Иванов****, **М.И. Романов****

**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

***Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ*

249040, г. Обнинск, Студгородок, 1

Р

Существует множество сценариев обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) для снижения его радиоактивности, которая, в основном, через несколько сотен лет после выгрузки из реактора определяется малыми актинидами (МА). Один из них при замкнутом топливном цикле и воспроизводстве делящихся ядер – трансмутация МА в осколки деления в специализированных или энергетических ядерных реакторах. Рассмотрены радиационные характеристики, зависящие от времени, после облучения МА в типичных спектрах нейтронов для теплового и быстрого реакторов. Время облучения было выбрано равным 25-ти годам. За это время глубина выгорания загруженных нуклидов в спектре теплового реактора составляла ~ 95%, а в спектре быстрого реактора ~ 75%. Эффективность трансмутации определялась с помощью зависящего от времени «коэффициента трансмутации», который определен как отношение радиоактивности или биологической опасности по воздуху (по воде) во время и после трансмутации изотопа (изотопов) к его радиоактивности или соответствующей биологической опасности без трансмутации. Это положительное число в интервале от нуля до бесконечности. Чем меньше значение коэффициента трансмутации, тем больше эффективность процесса трансмутации.

Расчеты показали, что коэффициенты трансмутации при выжигании МА в тепловом реакторе (при одинаковом времени облучения в тепловом и быстром реакторах) имеют заметные преимущества перед коэффициентами трансмутации при выжигании в быстрых реакторах. Существенно, что в тепловом реакторе глубина выгорания МА на уровне 95% достигается за время на 40 – 60% меньшее, чем в реакторе на быстрых нейтронах.

Проанализированы результаты трансмутации. Существенный выигрыш в радиоактивности может быть получен для америция и кюрия после окончания 25-летнего облучения через десятки лет. Выигрыш в случае облучения нептуния может быть получен через десятки и сотни тысяч лет (в зависимости от времени облучения).

Показано, что коэффициент трансмутации по амплитуде и во времени зависит от выбранного критерия радиоактивности (радиоактивность, биологическая эффективность по допустимым концентрациям в воздухе и в воде). В частности, коэффициенты трансмутации на основе биологической опасности нуклидов в воздухе могут существенно отличаться от коэффициентов трансмутации по радиоактивности. Коэффициент трансмутации на основе биологической опасности в воздухе в первую тысячу лет оказыва-

ется в 10 раз меньше аналогичного коэффициента на основе радиоактивности. В то же время коэффициенты трансмутации по биологической опасности нуклидов в воде несущественно отличаются от коэффициентов трансмутации по радиоактивности.

Ключевые слова: трансмутация, малые актиниды, отработавшее топливо, радиоактивность, биологическая опасность.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из проблем ядерной энергетики – накопление радиоактивных отходов (РАО). Радиоактивность выгружаемого топлива (отработавшего ядерного топлива) в сотни миллионов раз выше радиоактивности загружаемого уранового топлива. ОЯТ представляет угрозу для окружающей среды при утечке из хранилищ. Риск такого события оценивают как произведение вероятности разрушения хранилища (выхода радиоактивных продуктов из-под контроля) на радиоактивность материалов, находящихся в хранилище. Среди способов борьбы с радиоактивностью ОЯТ наиболее интересным и слабо зависимым от сценария переработки топлива является захоронение в геологических формациях. Основная проблема технологии состоит в обеспечении надежной и долговременной защиты (в течение не менее десятков тысяч лет) от попадания в окружающую среду долгоживущих радионуклидов.

Второй, популярный и достаточно широко обсуждаемый в литературе, способ основан на облучении ядер ОЯТ нейтронами в ядерных реакторах.

После выгрузки топлива радиоактивность ОЯТ обусловлена (около 90%) осколками деления, но через несколько столетий основная радиоактивность определяется тяжелыми трансурановыми ядрами. В случае замкнутого топливного цикла уран и плутоний используются вновь для производства топливных элементов, а осколки деления и долгоживущие нуклиды (ядра Np, Am, Cm, называемые малыми актинидами) подвергаются захоронению. Во многих работах рассматривались возможности снижения радиоактивности ОЯТ в результате трансмутации тяжелых ядер в осколки деления.

Идея такого превращения (трансмутации) была высказана более 30-ти лет назад, например, в [1], а интерес к трансмутации МА стал популярным в конце 1980-х гг. Работы по трансмутации МА обсуждались на Международных конференциях GLOBAL и на специальных совещаниях и семинарах, например, на международном семинаре в Обнинске [2]. Там же, в частности, рассматривалась возможность использования специализированных быстрых реакторов-выжигателей для трансмутации МА [3 – 5]. Были публикации, в которых обсуждались трансмутация в гетерогенных и гомогенных условиях быстрого и теплового реакторов [6, 7], и вставки замедлителя в быстрый реактор для увеличения скорости поглощения нейтронов ядрами МА [8]. Идея использования быстрых реакторов для трансмутации тяжелых ядер в осколки деления развивается и в настоящее время: изучаются сценарии ядерной энергетики в комплексе со специальными быстрыми реакторами-выжигателями (например, [9, 10]). Есть обзор МАГАТЭ [11], в котором представлены материаловедческие аспекты трансмутации.

Появились работы по возможности выжигания ОЯТ в тепловых реакторах [12 – 14]. В известной степени этот интерес вызван возможностью выжигания МА в энергетических тепловых реакторах до ввода реакторов на быстрых нейтронах и большей скоростью выжигания МА в тепловых реакторах.

УСЛОВИЯ РАСЧЕТА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В работе рассматриваются результаты трансмутации (выжигания) ядер МА во времени, проводится сопоставление результатов трансмутации при облучении МА в теп-

ловом и быстром спектрах. Для сравнения используется «коэффициент трансмутации» ξ , введенный в работе [15]. Коэффициент трансмутации – отношение радиоактивности (или биологической опасности по воздуху (по воде) с трансмутацией изотопа (изотопов) к его радиоактивности (или биологической опасности) в функции времени без трансмутации.

Пусть имеется вектор изотопов с изменяющимися во времени концентрациями $a_0^i(t)$, тогда радиоактивность этих изотопов в нулевой момент времени будет равна $A_0(t) = \sum a_0^i(t)\lambda_i$. В этом случае вектор $a_0^i(t)$ изменяется во времени из-за радиоактивных распадов ядер МА.

Точно такое же количество изотопов загрузим в реактор для облучения в течение времени T . Радиоактивность при облучении и после будет равна $A_1(t) = \sum a_1^i(t)\lambda_i$. При этом очевидно, что $A_0(0) = A_1(0)$. Изменения $a_1^i(t)$ в течение времени облучения T будут происходить вследствие радиоактивных распадов ядер и взаимодействия тяжелых ядер с нейтронами. После времени T изменения $a_1^i(t)$ будут происходить только в результате радиоактивных распадов (превращений). Запишем коэффициент трансмутации по радиоактивности:

$$\xi_r = A_1(t)/A_0(t) = [\sum a_1^i(t)\lambda_i]/[\sum a_0^i(t)\lambda_i].$$

Из определения следует, что ξ – положительное безразмерное число, которое может принимать значения от нуля до бесконечности. Нулевое значение ξ означает, что в результате трансмутации радиоактивность стала намного меньшей (нулевой) в сравнении с радиоактивностью без трансмутации. Значения $\xi > 1$ означают, что в результате трансмутации радиоактивность увеличилась.

Рассчитывались также коэффициенты трансмутации относительно биологической опасности радионуклидов при попадании в воду (ξ_w) и в воздух (ξ_a). В этом случае использовались предельно допустимые нормативы [16], ограничивающие содержание в воде для каждого i -го радионуклида, называемые уровнем вмешательства, $УВ_{wi}$ (Бк/кг), либо ограничивающие содержание радионуклидов в воздухе, $УВ_{ai}$ (Бк/м³).

Коэффициенты трансмутации с учетом биологической опасности принимают вид

$$\xi_a = [\sum b_1^i(t)\lambda_i / УВ_{ai}] / [\sum b_0^i(t)\lambda_i / УВ_{ai}],$$

$$\xi_w = [\sum a_1^i(t)\lambda_i / УВ_{wi}] / [\sum a_0^i(t)\lambda_i / УВ_{wi}],$$

где b_0^i и b_1^i – объемные концентрации радионуклидов в воздухе (1/м³).

Расчеты проводились с помощью программного модуля ORIGEN2 [17], имеющего набор средних сечений (табл. 1) для типичных спектров теплового и быстрого энергетических реакторов для нуклидов, оказывающих влияние на результаты вычисления ξ_a , ξ_w , ξ_r . Сравнение этих сечений для теплового спектра нейтронов с аналогичными средними сечениями для центра активной зоны реактора ВВЭР-1000 показало удовлетворительное согласие (в пределах 10%). Аналогичное сопоставление табличных данных со средними сечениями для центра активной зоны реактора БН-600 дало более существенное различие (в пределах 20%). Это позволило называть средние сечения из базы данных [17] сечениями для типичных спектров тепловых и быстрых энергетических реакторов.

МА в составе, указанном в таблице, размещались в потоке нейтронов постоянной плотности. Концентрация ядер МА выбиралась такой, чтобы средние микроскопические сечения каждого нуклида не зависели от изменения состава во времени из-за радиоактивных превращений и взаимодействий ядер МА и их дочерних продуктов с нейтронами. Заметим, что расчеты ξ в данном случае носят приближенный характер, поскольку для реального реактора, как минимум, надо принять во внимание зависимость плотности потока нейтронов от координат и определить химический состав и реальную

для реактора плотность ядер. Другими словами, необходимо тщательно определить средние сечения для данного реактора или для объема, в котором находятся МА.

Таблица 1

Характеристики малых актинидов в выгруженном топливе

Нуклид	Концентрация, г/т (т.я.)	Сечение деления в тепловом спектре, барн	Сечение радиационного захвата в тепловом спектре, барн	Сечение деления в быстром спектре, барн	Сечение радиационного захвата в быстром спектре, барн
Np-237	709.0	0.516	30.3	0.377	1.52
Am-241	225.0	1.05	83.0	0.332	1.39
Am-242m	1.73	361.0	75.3	4.04	0.393
Am-243	102.0	2.43	0.414	0.261	0.0538
Cm-242	0.126	0.504	5.44	0.19	0.337
Cm-243	0.386	64.3	7.69	2.68	0.244
Cm-244	30.5	0.878	12.7	0.472	0.834
Cm-245	1.45	125.0	21.0	2.65	0.311
Cm-246	0.153	2.88	0.594	0.307	0.235

Интегральные плотности потока нейтронов, в которых облучались МА, были приняты равными $3.65 \cdot 10^{14}$ н/(с·см²) для реактора на тепловых нейтронах [18] и $3.65 \cdot 10^{15}$ н/(с·см²) для реактора на быстрых нейтронах [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСМУТАЦИИ

На рисунке 1 показаны зависимости коэффициентов трансмутации $\xi_r(t)$ и $\xi_r(b)$ от времени (r – индекс, означающий радиоактивность) в тепловом и быстром спектрах нейтронов. Виды зависимостей коэффициентов трансмутации от времени при облучении в тепловом и быстром спектрах весьма похожи. Но для каждого элемента есть особенности, на которые следует обратить внимание.

Нептуний. После облучения в тепловом реакторе коэффициент трансмутации становится меньше единицы в лучшем случае через десять тысяч лет. Обоснованием для выжигания нептуния вряд ли является его радиоактивность. Скорее интерес к уничтожению нептуния (вовлечение его в топливный цикл) связан с возможностью использования его в военных целях.

Америций. Коэффициент трансмутации становится меньше единицы через 50 лет и достигает значения 0,01 через 1000 лет, но затем в течение десяти тысяч лет вырастает вновь почти до единицы.

Кюрий. Практически сразу после облучения коэффициент трансмутации устанавливается на уровне 0,5 и через сотни лет достигает минимального значения порядка 0,1. После этого начинается рост коэффициента трансмутации, а через сто тысяч лет он достигает единицы.

На рисунках 2 – 4 приводятся отношения коэффициентов трансмутации при облучении в тепловом спектре нейтронов к коэффициентам трансмутации при облучении в быстром спектре нейтронов. В обоих случаях облучение проводилось в течение 25-ти лет. На каждом рисунке показаны две кривые в зависимости от времени после облучения: с индексом «1» – отношение $\xi_r(t)/\xi_r(b)$; с индексом «2» – отношение $\xi_a(t)/\xi_a(b)$. Отношения коэффициентов $\xi_w(t)/\xi_w(b)$ на графиках не показаны, так как они несущественно отличаются от отношений $\xi_r(t)/\xi_r(b)$.

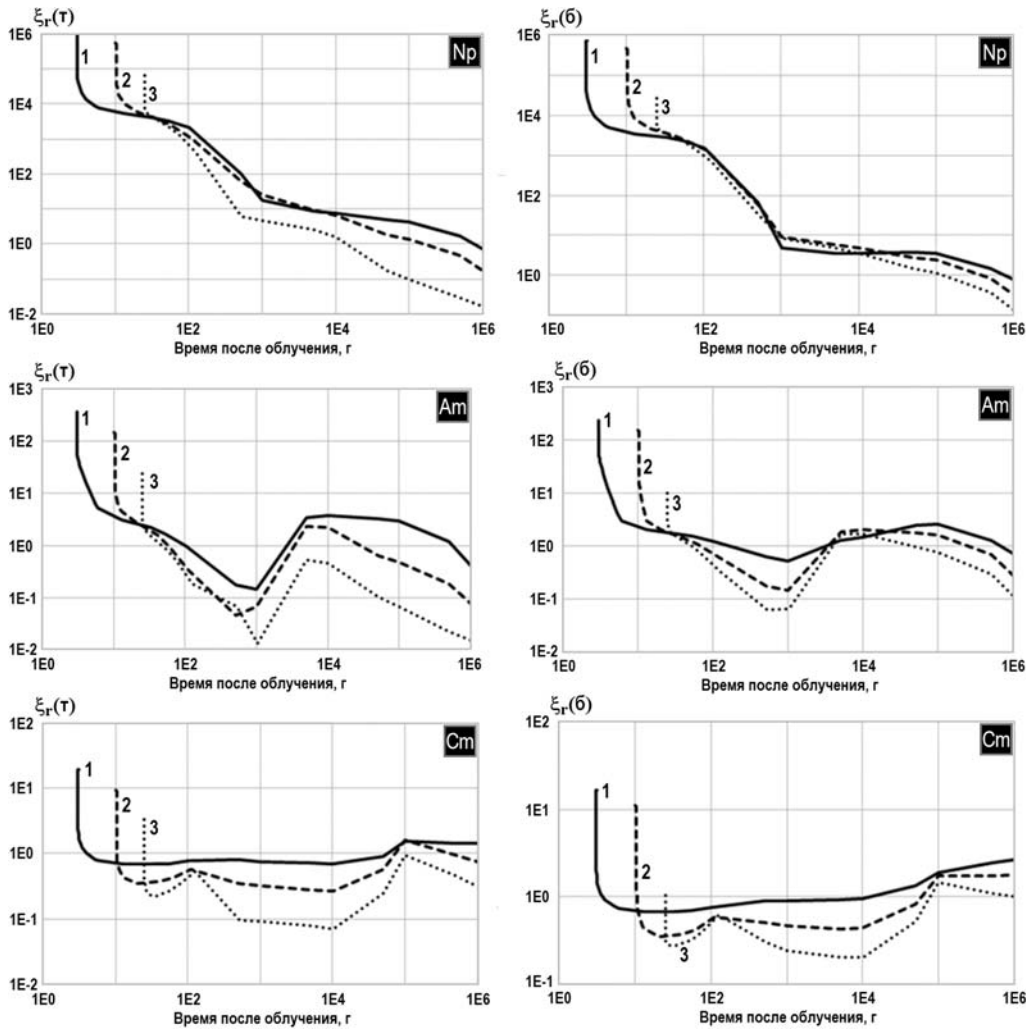


Рис. 1. Коэффициенты трансмутации по радиоактивности для МА при разных временах облучения в тепловом (слева) и быстром (справа) спектрах нейтронов: 1 – 3 года; 2 – 10 лет; 3 – 25 лет

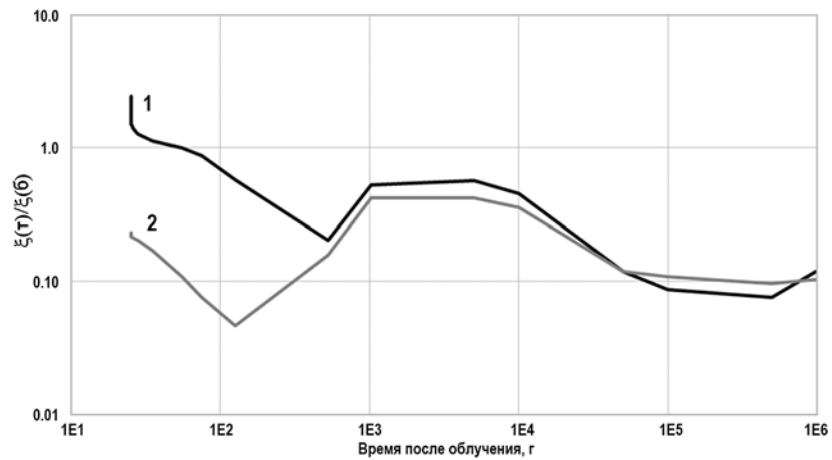


Рис. 2. Отношения ξ для нептуния после 25-летнего облучения в спектрах теплового и быстрого реакторов: 1 – $\xi_r(\tau)/\xi_r(\beta)$; 2 – $\xi_a(\tau)/\xi_a(\beta)$

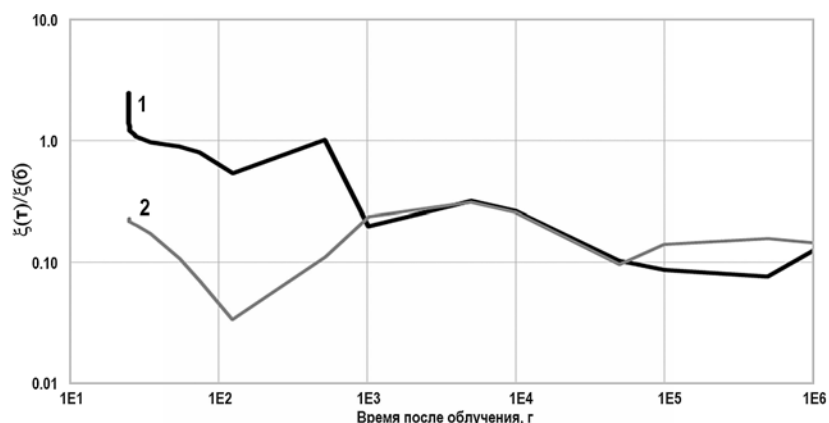


Рис. 3. Отношения ξ для америция после 25-летнего облучения в спектрах теплового и быстрого реакторов: 1 – $\xi_r(\tau)/\xi_r(\text{б})$; 2 – $\xi_a(\tau)/\xi_a(\text{б})$

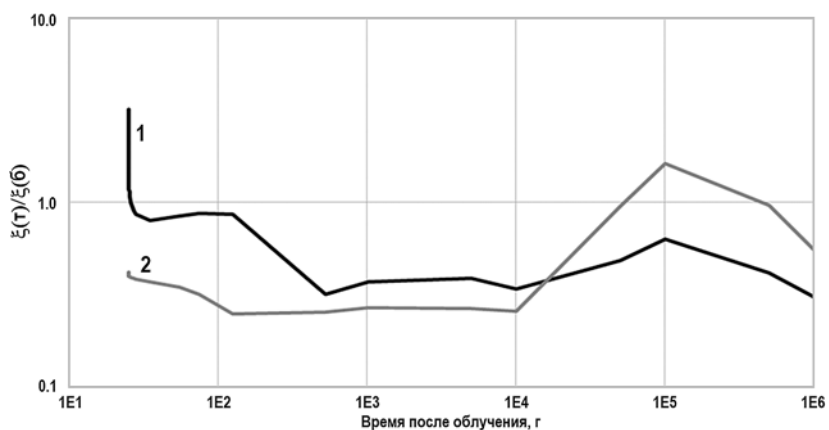


Рис. 4. Отношения ξ для кюрия после 25-летнего облучения в спектрах теплового и быстрого реакторов: 1 – $\xi_r(\tau)/\xi_r(\text{б})$; 2 – $\xi_a(\tau)/\xi_a(\text{б})$

Если приведенные на рис. 2 – 4 отношения больше единицы, то в результате трансмутации в тепловом реакторе радиоактивность будет выше, чем при трансмутации в быстром реакторе. На протяжении почти всего времени выдержки наблюдаются значения отношений меньше единицы, т.е. радиоактивность в случае облучения в тепловом реакторе оказывается меньшей.

Радиоактивность тяжелых ядер без облучения в реакторе обусловлена, в основном, альфа-распадом, биологическая опасность которого во много раз превышает биологическую опасность гамма- и бета-излучения. Насколько велик этот эффект можно видеть из рис. 2 – 4 для кривых с индексом «2» (отношения коэффициентов трансмутации в тепловых и быстрых спектрах нейтронов на основе биологической опасности радиоактивных продуктов в воздухе). Как видно, влияние на некоторых временных интервалах оказывается заметным. Поэтому, при необходимости, есть смысл проводить расчеты ξ с учетом предельно допустимых концентраций радиоактивных нуклидов.

Сопоставление $\xi(\tau)$ и $\xi(\text{б})$ МА проводилось при одинаковом времени облучения МА. Надо иметь в виду, что при равных временах облучения глубины выгорания (выжигания) были различными в тепловом и быстром спектрах нейтронов.

Если же сравнивать отношение ξ при одинаковых глубинах выгорания загруженных нуклидов МА, то ситуация изменяется. На примере нептуния были сделаны предварительные оценки, которые показали, что преимущество теплового реактора практически сводится на нет. Даже появляется небольшое преимущество быстрого спектра.

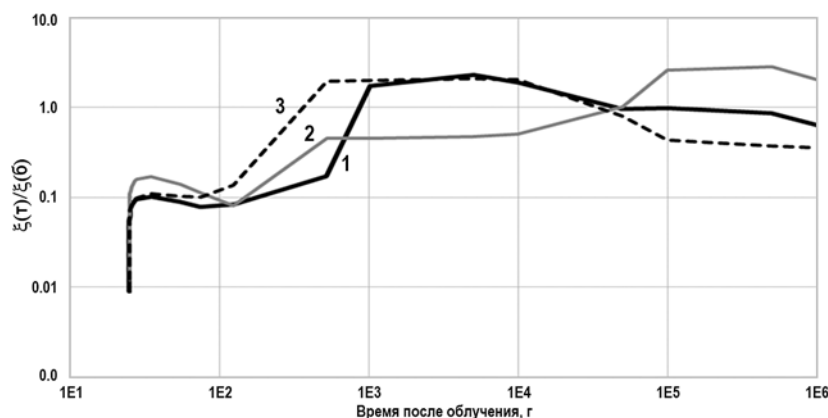


Рис. 5. Отношения коэффициентов трансмутации на основе биологической опасности в воздухе и радиоактивности после 25-летнего облучения в спектре теплового реактора для МА: 1 – америций; 2 – кюрий; 3 – нептуний

На рисунке 5 показаны отношения коэффициентов трансмутации (облучение в течение 25-ти лет в спектре нейтронов теплового реактора) $\xi_a(t)/\xi_r(t)$, которые позволяют оценить влияние учета биологической опасности.

Из рисунка видно, что приблизительно до 700 лет (в частности, для нептуния) ξ_a меньше, чем ξ_r . Как отмечалось выше, биологическая опасность альфа-распада во много раз превышает биологическую опасность гамма- и бета-излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований показаны или подтверждены следующие результаты. Нептуний нет смысла превращать в осколки деления и другие тяжелые ядра – радиоактивность его после облучения станет меньше начальной через десятки и тысячи лет (в зависимости от глубины выгорания и выбранного критерия оценки радиоактивности).

Трансмутация америция и кюрия в плотностях потоков нейтронов существующих энергетических тепловых реакторов достигает глубин выгорания 90 – 95% за время непрерывного облучения порядка 25-ти лет. После этого в течение десятков лет радиоактивность спадает в десять (кюрий) и даже в сто раз (америций).

Показано, что трансмутация МА в энергетических быстрых реакторах при одинаковых затратах времени оказывается менее эффективной, чем в тепловых, что связано, главным образом, с меньшей глубиной выгорания МА в быстром энергетическом реакторе. При сравнении ξ при одинаковых глубинах выгорания загруженных нуклидов МА ситуация изменяется. В таком случае преимущества выжигания в тепловом спектре нейтронов практически нивелируются.

Величина коэффициента трансмутации во времени зависит от выбранного критерия радиоактивности (радиоактивность, биологическая эффективность по допустимым концентрациям в воздухе и в воде). В первую тысячу лет значение коэффициента ξ_r превышает значение ξ_a в 10 раз. В то же время ξ_w несущественно отличаются от ξ_r .

Авторы признательны профессору В.В. Коробейникову за плодотворные дискуссии и ряд полезных замечаний.

Литература

1. Лейпунский А.И., Орлов В.В., Лыткин В.Б., Троянов М.Ф., Юрова Л.Н. Пути эффективного использования горючего в ядерной энергетике с быстрыми реакторами. // Атомная энергия. – 1971. – Т. 31. – Вып. 4. – С. 241.
2. Use of Fast Reactors for Actinide Transmutation. Proceedings of a Specialists Meeting held

- in Obninsk, Russian Federation, 22-24 September 1992. IAEA-TECDOC-693. IAEA, 1993.
3. *Matveev V.I., Ivanov A.P., Efimenko E.M.* Concept of Specialized Fast Reactor for Minor Actinide Burning. In [2], p.114.
 4. *Гай Е.В., Игнатюк А.В., Работнов Н.С., Шубин Ю.Н.* Концепция обращения с долгоживущими ядерными отходами. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1994. – №1. – С. 17-21.
 5. *Хорасанов Г.Л., Блохин А.И., Сеницина В.В.* Выжигание трансурановых элементов в жестком спектре нейтронов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – №3. – С.76-81.
 6. *Ганев И.Х., Лопаткин А.В., Орлов В.В.* Гетерогенная трансмутация Am, Cm, Np в активной зоне реактора типа БРЕСТ. // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89, вып. 5. – С. 362-365.
 7. *Tommasi J.* Heterogeneous Recycling of Americium in Thermal and Fast Reactors. Int. Conf. on Future Nuclear Systems GLOBAL*97. 5-10 Oct. 1997. Yokohama (Japan).
 8. *Krivitski I.Yu.* Actinide and Fission Product Burning in Fast Reactors with a Moderator". Proc.of the Int. Conf. On Future Nucl. Syst. GLOBAL*99. USA, Aug.29 – Sept.3, 1999.
 9. NEA, Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation, OECD, Paris, France, 2011.
 10. *Andrianov A.A, Dogov A.A, Korovin Y.A, Kuptsov I.S.* The approach to determining the optimal strategy for the nuclear transmutation // Nuclear Physics and Engineering, TE 5. – 2014. – № 2. – P. 122.
 11. Status of minor actinide fuel development. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009.
 12. *Бергельсон Б.Р., Белоног В.В., Герасимов А.С., Тихомиров Г.В.* Утилизация Am, Cm, Np в энергетическом ядерном реакторе. // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107, вып. 2. – С. 79-86.
 13. *Казанский Ю.А., Романов М.И.* Трансмутация малых актинидов в спектре нейтронов реактора на тепловых нейтронах. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – №2. – С. 140-146.
 14. Nuclear Energy Agency, No. 6997, «Minor Actinide Burning in Thermal Reactors», OECD, 2013.
 15. *Казанский Ю.А., Клинов Д.А.* Эффективность трансмутации осколков деления // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – №4. – С. 38-46.
 16. Нормы радиационной безопасности (НРБ 99/2009).
 17. *Croff A.G.* A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code. July, 1980.
 18. *Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Ружанский П.А., Сидоренко В.Д.* Радиационные характеристики облученного топлива. Справочник. – М.: Энергоатомиздат. 1983.
 19. Nuclear Energy Agency, TECDOC-866, «Fast Reactor Database». IAEA. Vienna. 1996.

Поступила в редакцию 04.03.2016 г.

Авторы

Казанский Юрий Алексеевич, профессор, доктор физ.-мат. наук

E-mail: kazansky@iate.obninsk.ru

Иванов Николай Витальевич, аспирант

E-mail: ivanovnik100@gmail.com

Романов Михаил Игоревич, аспирант

UDC 621.039.54(04)

THE RESULTS OF THE TRANSMUTING MINOR ACTINIDES WITH THERMAL AND FAST REACTORS NEUTRONS

Kazansky Yu.A.*, Ivanov N.V.***, Romanov M.I.**

* National Research Nuclear University «MEPhI».

31 Kashirskoe highway, Moscow, 115409 Russia

** Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI».

1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

One of the problems of nuclear energy is the accumulation of radioactive waste. There are many scenarios treatment of spent nuclear fuel (SNF). One of them with a closed fuel cycle and reproduction of fissile nuclei is the transmutation of minor actinides (MA) in the fission fragments in fast reactors. In the present paper considered the radiation characteristics, depending on the time, after irradiation MA in the spectra of neutrons of thermal and fast reactors. The irradiation time was chosen to be 25 years. During this time, burn up in the thermal reactor was about 95%, and in the fast reactor about 75%. Transmutation efficiency is determined by a time-dependent after irradiation «coefficient of transmutation». Coefficient of transmutation is the ratio of the radioactivity (or biological hazards on the air or on the water) after the transmutation of the isotope (isotopes) to its radioactivity without transmutation. This is a positive number in the range from 0 to infinity.

Calculations showed that coefficient of transmutation of the burning of the MA in the thermal reactor (at the same time of irradiation to thermal and fast reactors) have notable advantages over coefficient of transmutation during burning in the fast reactors. Importantly, the thermal reactor burn up MA of 95% is achieved while 40 – 60% smaller than in the fast breeder reactor.

Analyzed the results of transmutation. Significant gains in radioactivity can be obtained for americium and curium after 25 years irradiation through decades. The gain in the case of irradiation of neptunium can be obtained through decades and the hundreds of thousands of years (depending on the irradiation time).

Shown that efficiency of the amplitude and time depends on the criterion of radioactivity (radioactivity, the biological effectiveness of permissible concentrations in air and water). In particular, coefficient of transmutation on basis biological hazards nuclides in the air could differ significantly from coefficient of transmutation on radioactivity. At 10 times coefficient of transmutation on basis biological hazards in the air in the first thousand years less than the same coefficient on the basis of radioactivity. At the same time, the coefficient of transmutation on basis biological hazards nuclides in the water do not differ significantly from the transmutation of the coefficients on radioactivity.

Key words: transmutation, minor actinides, spent fuel, radioactivity, biological hazard.

REFERENCES

1. Leypunsky A.I., Orlov V.V., Lytkin V.B., Troyanov M.F., Yurova L.N. Puti effektivnogo ispol'zovaniya goryuchego vyadernoy energetike s bystryimi reaktorami [The effective use of fuel in nuclear power with fast reactors]. *Atomnaya energiya*. 1971, v. 31, no. 4, p. 241 (in Russian).
2. Use of Fast Reactors for Actinide Transmutation. Proceedings of a Specialists Meeting held in Obninsk, Russian Federation, 22-24 September 1992. IAEA-TECDOC-693. IAEA, 1993.

3. Matveev V.I., Ivanov A.P., Efimenko E.M.. Concept of Specialized Fast Reactor for Minor Actinide Burning. In [2], p.114.
4. Gay E.V., Ignatyuk A.V., Rabotnov N.S., Shubin Yu.N.. Konceptsiya obrashcheniya s dolgozhivushchimi yadernymi othodami [Concept treatment of long-lived nuclear waste management]. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 1994, no. 1, pp. 17-21 (in Russian).
5. Khorasanov G.L., Blokhin A.I., Sinitsyna V.V.. Vyzhiganie transuranovykh ehlementov v zhestkom spektre nejtronov [Burning of transuranic elements in the hard neutron spectrum]. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2000, no. 3, pp. 76-81 (in Russian).
6. Ganey I. Kh., Lopatkin A. V., Orlov V. V. Geterogennaya transmutsiya Am, Cm, Np v aktivnoj zone reaktora tipa BREST [Heterogeneous Transmutation of Am, Cm, and Np in the core of a brest reactor]. *Atomic Energy*, v. 89, no. 5, 2000, pp. 362-365 (in Russian).
7. Tommasi J. Heterogeneous Recycling of Americium in Thermal and Fast Reactors. Int. Conf. On Future Nuclear Systems GLOBAL*97. Oct. 5-10 1997, Yokohama (Japan).
8. Krivitski I.Yu. Actinide and Fission Product Burning in Fast Reactors with a Moderator. Proc. of the Int. Conf. On Future Nucl. Syst. GLOBAL '99. USA, Aug. 29 – Sept. 3, 1999.
9. NEA, Potential Benefits and Impacts of Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinide Partitioning and Transmutation, OECD, Paris, France, 2011.
10. Andrianov A.A, Dogov A.A, Korovin Y.A, Kuptcov I.S. The approach to determining the optimal strategy for the nuclear transmutation. *Nuclear Physics and Engineering*, TE 5, no. 2, 2014, 122 p.
11. Status of minor actinide fuel development. Vienna. International Atomic Energy Agency, 2009.
12. Bergelson B. R., Belonog V. V., Gerasimov A. S., Tikhomirov G. V.. Utilizatsiya Am, Cm, Np v ehnergeticheskom yadernom reaktore [Np, Am, Cm utilization in a nuclear power reactor]. *Atomic Energy*, v. 107, no. 2, 2009, pp. 7986 (in Russian).
13. Kazansky Yu.A., Romanov M.I. Transmutatsiya malykh aktinidov v spektre nejtronov reaktora na teplovykh nejtronah [Transmutating minor actinides with thermal reactor neutrons]. *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 2, pp. 140-146 (in Russian).
14. Nuclear Energy Agency, No. 6997, Minor Actinide Burning in Thermal Reactors, OECD, 2013.
15. Kazansky Yu.A, Klinov D.A. Effektivnost' transmutsatsii oskolkov deleyniya [Transmutation Efficiency of Fission Fragments.] *Izvestia Visshikh Uchebnikh Zavedeniy. Yadernaya Energetika*. 2000, no. 4, pp. 38-46 (in Russian).
16. Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB 99/2009) (in Russian).
17. Croff A.G. A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code. July, 1980.
18. Kolobashkin V.M., Rubtsov P.M., Ruzhansky P.A., Sidorenko V.D. Radiation Characteristics of the Irradiated Fuel. Reference book. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1983 (in Russian).
19. Nuclear Energy Agency, TECDOC-866, «Fast Reactor Database». IAEA. Viena. 1996.

Authors

Kazansky Yuriy Alekseevich, Professor, Dr. Sci (Phys.-Math.)

E-mail: kazansky@iate.obninsk.ru

Ivanov Nikolay Vital'evich, Postgraduate Student

E-mail: ivanovnik100@gmail.com

Romanov Mihail Igorevich, Postgraduate Student