

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РУ ВВЭР-1000 ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ С ДОПИНГОМ ПРОТАКТИНИЯ И НЕПТУНИЯ

Т. Баатар, Е.Г. Куликов

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31*



В ядерной энергетике повышение выгорания топлива является одним из важных направлений развития отрасли. Наиболее распространенный в настоящее время тип реакторов (легководные) характеризуется выгоранием на уровне 5% т.а., т.е. лишь небольшая доля топлива используется для получения электроэнергии.

Демонстрируется возможность существенного повышения выгорания топлива за счет включения в состав топливной композиции протактиния и нептуния. Цепочки нуклидных превращений, начинающиеся с протактиния и нептуния, характеризуются постепенным улучшением размножающих свойств, что обеспечивает повышенное выгорание топлива. При этом может наблюдаться ситуация, когда размножающие свойства топливной композиции улучшаются в течение кампании, что свидетельствует о том, что в определенный момент времени скорость накопления делящихся нуклидов из протактиния и нептуния превосходит скорость накопления продуктов деления.

В то время как протактиний труднодоступен в существенных количествах, нептуний содержится в составе отработавшего ядерного топлива, значительный объем которого находится в пристанционных хранилищах. Поэтому с практической точки зрения введение нептуния в состав топливной композиции выглядит предпочтительнее.

Новизной работы является анализ влияния протактиния и нептуния на коэффициенты реактивности в течение кампании топлива. Расчеты проводились для реактора типа ВВЭР-1000 с использованием программного комплекса SCALE-6.2.

Ключевые слова: сверхглубокое выгорание, легководный реактор, протактиний, нептуний, коэффициент реактивности по температуре топлива, коэффициент реактивности по температуре теплоносителя.

ВВЕДЕНИЕ

Современные легководные реакторы имеют выгорание около 5% т.а. Благодаря новым топливным технологиям и, в частности, использованию усовершенствованных выгорающих поглотителей возможно достижение выгорания до 6% т.а.

Повышение выгорания топлива необходимо для

– улучшения экономики ядерного топливного цикла за счет сокращения объемов

свежего и отработавшего ядерного топлива;
 – сокращения количества перегрузок топлива;
 – снижения вероятности переключения делящегося материала из отработавшего топлива на неэнергетические цели [1].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для повышения глубины выгорания топлива в работе рассматривается введение в состав топливной композиции протактиния и нептуния. Этот вопрос ранее исследовался в работах [2, 3], но влиянию этих нуклидов на коэффициенты реактивности в течение кампании топлива уделялось недостаточное внимание. Заметим, что проблема достижения сверхглубокого выгорания рассматривается лишь с точки зрения выбора состава топливной композиции, в то время как материаловедческий аспект не анализируется. Отметим также, что в экспериментальных твэлах на реакторе БОР-60 было достигнуто выгорание более 30% т.а. для виброуплотненного оксидного топлива в стальной оболочке [4].

Рассматривается элементарная ячейка реактора типа ВВЭР-1000, параметры которой приводятся в табл.1.

Таблица 1

Параметры элементарной ячейки ВВЭР-1000 [5]

Параметр	Значение
Плотность топлива, г/см ³	10,7
Внутренний / внешний радиус топлива, см	0,115 / 0,375
Внутренний / внешний радиус оболочки твэла, см	0,386 / 0,4582
Материал оболочки и центральной трубки	Zr (1% Nb, 0,03% Hf)
Плотность оболочки, г/см ³	6,45
Внутренний / внешний радиус центральной трубки, см	0,45 / 0,515
Шаг решётки твэлов, см	1,275
Плотность замедлителя, г/см ³	0,71
Температура топлива, К	966
Температура оболочки, К	630
Температура замедлителя, К	578

Таблица 2

Сечения деления и захвата нейтронов в тепловой точке и количество нейтронов на акт деления [10 – 13]

Нуклиды		Сечение, барн ($E_n = 0,0253$ эВ)		ν_f
		σ_f	σ_c	
Сырьевые	²³⁸ U	$1,7 \cdot 10^{-5}$	2,7	2,32
	²³² Th	$5,4 \cdot 10^{-5}$	7,3	1,89
	²³¹ Pa	0,023	202	2,09
	²³⁷ Np	0,020	178	2,62
Делящиеся	²³³ U	531	45	2,48
	²³⁵ U	585	99	2,43
	²³⁹ Pu	747	271	2,87
	²⁴¹ Pu	77	75	3,12

Все последующие расчеты, связанные с выгоранием топлива, представляют собой расчеты эквивалентной ячейки, выполненные с помощью расчетного комплек-

са SCALE-6.2 – широко используемого набора средств моделирования и симуляции для проведения нейтронно-физических расчетов [6 – 9].

В результате реакций радиационного захвата на протактинии и нептунии накапливаются умеренно делящиеся изотопы урана-232 и плутония-238, которые ведут к накоплению хорошо делящихся изотопов урана-233 и плутония-239 (табл. 2). Таким образом, размножающие свойства таких топливных композиций улучшаются в течение кампании, что обеспечивает достижение глубокого выгорания.

ВВЕДЕНИЕ В ТОПЛИВО НЕПТУНИЯ

По нейтронно-физическим свойствам ^{237}Np является сырьевым нуклидом. Нептуний имеет большие сечения захвата как в тепловой, так и в резонансной областях. Сечение захвата тепловых нейтронов ^{237}Np – 178 барн, а сечение деления 0,020 барн (см. табл. 2). Это означает, что ^{237}Np практически не делится тепловыми и промежуточными нейтронами, но в результате реакции захвата на нептунии и последующего β -распада накапливается умеренно делящийся изотоп ^{238}Pu , который ведет к накоплению хорошо делящегося ^{239}Pu (рис. 1).

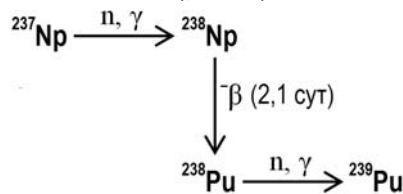


Рис. 1. Цепочка нуклидных превращений, начинающаяся с нептуния [8]

На рисунке 2 представлен коэффициент размножения нейтронов в процессе выгорания топлива, содержащего нептуний.

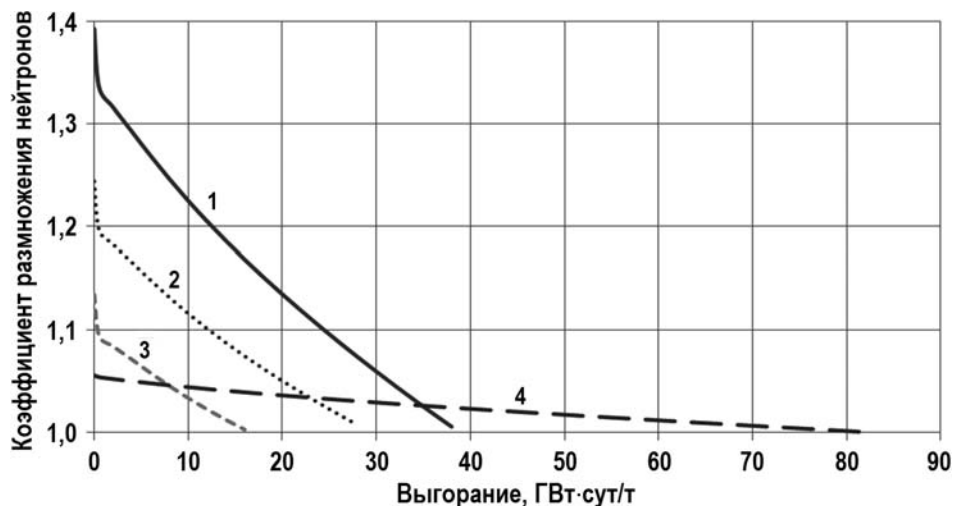


Рис. 2. Влияние нептуния на коэффициент размножения нейтронов в процессе выгорания топлива: 1 – традиционное урановое топливо (4,4% ^{235}U + 95,6% ^{238}U); 2 – композиция 4,4% ^{235}U + 94,6% ^{238}U + 1% ^{237}Np ; 3 – композиция 4,4% ^{235}U + 93,6% ^{238}U + 2% ^{237}Np ; 4 – большое количества нептуния (35% ^{235}U + 65% ^{237}Np)

При малом добавлении ^{237}Np (вторая и третья топливные композиции) начальный коэффициент размножения нейтронов снижается относительно традиционного уранового топлива, а достижимое выгорание невелико, что свидетельствует о том, что потенциал накопления делящихся изотопов плутония не успевает реализоваться. Вместе с тем, в случае использования топливной композиции, содержащей 35% ^{237}Np вместо 35% ^{238}U , выгорание достигает 82 ГВт-сут/т и коэффициент размно-

жения нейтронов сохраняется близким к единице на протяжении всей кампании. Это объясняется тем, что в результате захвата нейтронов ^{237}Np образуются ^{238}Pu и ^{239}Pu – делящиеся материалы, которые поддерживают цепную реакцию деления в течение продолжительного времени. Кроме того ^{237}Np характеризуется большим сечением захвата нейтронов в тепловой области по сравнению с ^{238}U , что приводит к эффективному образованию делящихся изотопов ^{238}Pu и ^{239}Pu .

ВВЕДЕНИЕ В ТОПЛИВО ПРОТАКТИНИЯ

По нейтронно-физическим характеристикам протактиний близок к нептуну – сечение захвата протактиния в тепловой области составляет 202 барн (см. табл. 2). По цепочке нуклидных превращений они отличаются дочерними делящимися нуклидами (рис. 3).

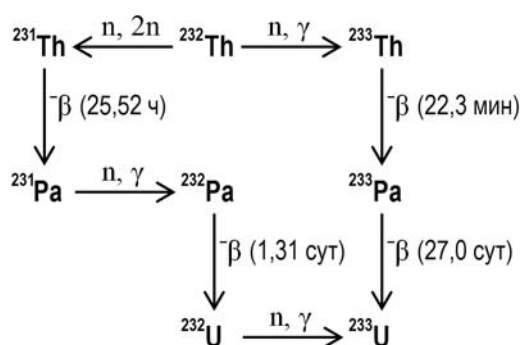


Рис. 3. Цепочка нуклидных превращений, начинающаяся с тория [8]

На рисунке 4 представлен коэффициент размножения нейтронов в процессе выгорания топлива, содержащего протактиний.

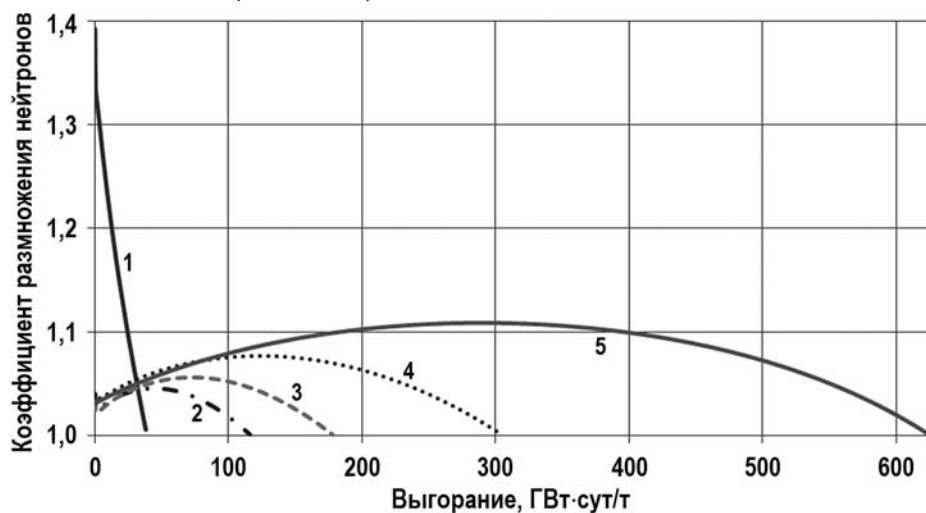


Рис. 4. Влияние протактиния на коэффициент размножения нейтронов в процессе выгорания топлива. 1 – традиционное урановое топливо (4,4% ^{235}U + 95,6% ^{238}U); 2 – композиция 11% ^{235}U + 83% ^{238}U + 6% ^{231}Pa ; 3 – композиция 16% ^{235}U + 74% ^{238}U + 10% ^{231}Pa ; 4 – композиция 26% ^{235}U + 54% ^{238}U + 20% ^{231}Pa ; 5 – полная замена ^{238}U на ^{231}Pa (44% ^{235}U + 56% ^{231}Pa)

Как следует из рисунка, введение протактиния в состав топливной композиции приводит к снижению начального запаса реактивности и достижению более глубокого выгорания топлива. При полной замене ^{238}U на ^{231}Pa (топливная композиция 44% ^{235}U + 56% ^{231}Pa) выгорание достигает 624 ГВт·сут/т, при этом коэффициент

размножения нейтронов практически не изменяется в течение всей кампании и составляет небольшую величину. На мощности реактора ВВЭР-1000 такая кампания продолжается около 40 лет.

Эти результаты объясняются двумя обстоятельствами. Во-первых, в результате захвата нейтронов ^{231}Pa последовательно образуются умеренно делящийся ^{232}U и хорошо делящийся ^{233}U , которые поддерживают цепную реакцию деления. Во-вторых, ^{231}Pa характеризуется большим сечением захвата нейтронов в тепловой области, чем ^{238}U , что приводит к эффективному образованию делящихся нуклидов ^{232}U и ^{233}U .

КОЭФФИЦИЕНТЫ РЕАКТИВНОСТИ ТОПЛИВА, СОДЕРЖАЩЕГО ПРОТАКТИНИЙ И НЕПТУНИЙ

Для обеспечения безопасности ядерного реактора важную роль играет контроль реактивности [14]. Рассмотрим коэффициенты реактивности по температуре топлива и теплоносителя для случая допинга протактиния и нептуния в составе топливной композиции. При оценке коэффициента реактивности по температуре топлива его температура увеличивалась на 100 К, а при оценке коэффициента реактивности по температуре теплоносителя его температура увеличивалась на 47 К по сравнению с первоначальным значением. Поскольку в расчетах рассматривается элементарная ячейка реактора типа ВВЭР-1000, то реактивность определяется через бесконечный коэффициент размножения нейтронов (k_∞) вместо эффективного коэффициента размножения нейтронов ($k_{\text{эф}}$), что является определенным допущением [15 – 17]. Свойства теплоносителя определены с помощью программного комплекса Water Steam Pro [19].

Изменение коэффициента реактивности по температуре топлива в течение кампании топлива 44% ^{235}U + 56% ^{231}Pa представлено на рис. 5.

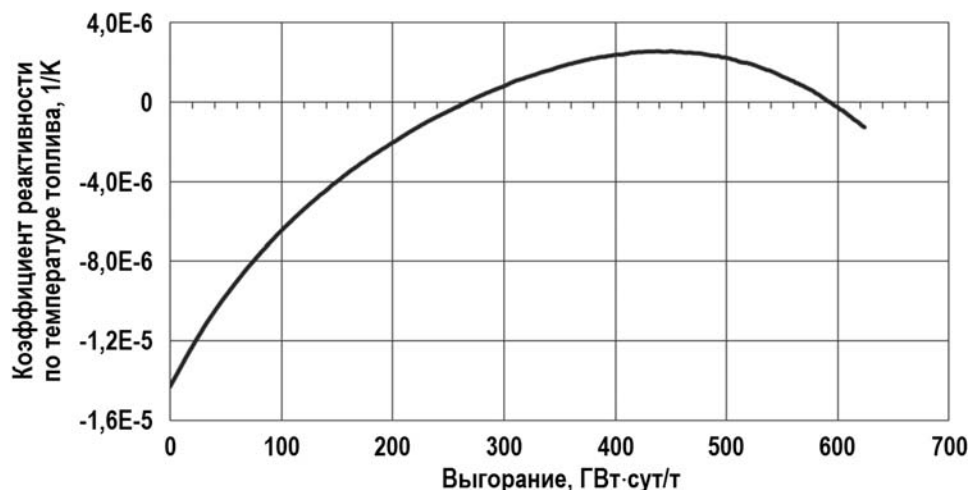


Рис. 5. Изменение коэффициента реактивности по температуре топлива в течение кампании топлива 44% ^{235}U + 56% ^{231}Pa

Отрицательный коэффициент реактивности по температуре топлива благоприятен, потому что он делает реактор саморегулирующимся. Как видно из рисунка, коэффициент реактивности по температуре топлива для топливной композиции 44% ^{235}U + 56% ^{231}Pa в определенный момент кампании принимает положительное значение. Это не отвечает требованиям безопасности. До достижения выгорания 266 ГВт-сут/т (~ 18 лет для реактора типа ВВЭР-1000) коэффициент реактивности по температуре топлива остается отрицательным, а дальше становится поло-

жительным вплоть до выгорания 592 ГВт·сут/т (приблизительно 39 лет для реактора типа ВВЭР-1000), потом уменьшается и снова остается отрицательным до конца кампании.

Определим такой состав топливной композиции, содержащей протактиний, при котором она характеризуется отрицательным коэффициентом реактивности по температуре топлива в течение всей кампании. Расчетным путем установлено, что топливная композиция 16% ^{235}U + 74% ^{238}U + 10% ^{231}Pa характеризуется отрицательным коэффициентом реактивности по температуре топлива в течение всей кампании (рис. 6).

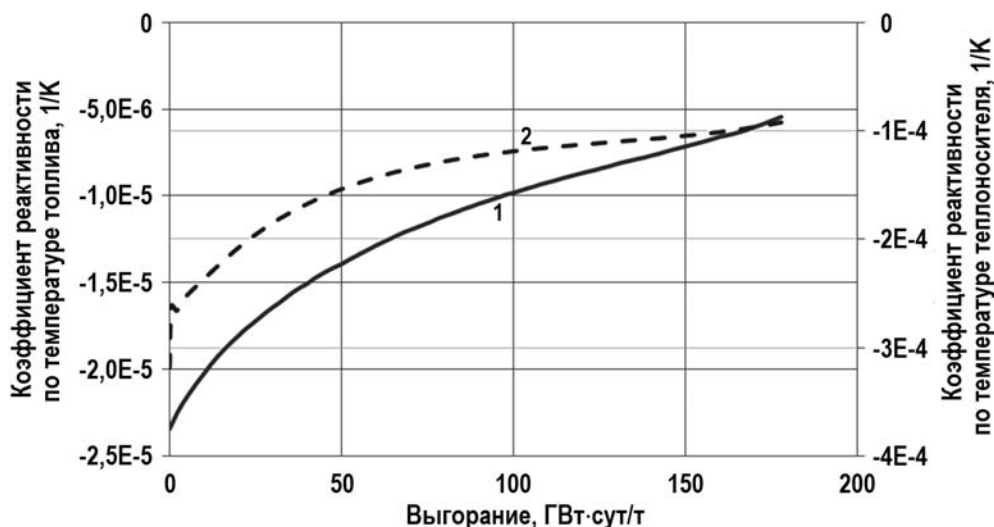


Рис. 6. Изменение коэффициентов реактивности топливной композиции 16% ^{235}U + 74% ^{238}U + 10% ^{231}Pa в течение кампании: 1 – коэффициент реактивности по температуре топлива; 2 – коэффициент реактивности по температуре теплоносителя

Как видно из рисунка, топливная композиция 16% ^{235}U + 74% ^{238}U + 10% ^{231}Pa имеет отрицательный коэффициент реактивности по температуре топлива в течение всей кампании и характеризуется выгоранием на уровне 178 ГВт·сут/т. Коэффициент реактивности по температуре теплоносителя для топливной композиции 16% ^{235}U + 74% ^{238}U + 10% ^{231}Pa также остается отрицательным на протяжении всей кампании. Таким образом, требования безопасности ставят ограничение на максимальное содержание протактиния и не позволяют достичь сверхглубокого выгорания, продемонстрированного в предыдущем разделе работы. Вместе с тем, выгорание на уровне 178 ГВт·сут/т в несколько раз превышает значение, которым характеризуется традиционное урановое топливо.

Рассмотрим коэффициенты реактивности для топливной композиции, имеющей в своем составе нептуний (35% ^{235}U + 65% ^{237}Np). Коэффициент реактивности по температуре топлива является отрицательным, в то время как коэффициент реактивности по температуре теплоносителя принимает положительные значения на протяжении всей кампании, что не отвечает требованиям безопасности (рис. 7).

Расчетным путем установлено, что топливная композиция, включающая в себя 16% ^{235}U + 74% ^{238}U + 10% ^{237}Np , имеет отрицательные коэффициенты реактивности по температуре топлива и теплоносителя в течение всей кампании (рис. 8).

Таким образом, требования безопасности, выражающиеся в обеспечении отрицательных значений коэффициентов реактивности на протяжении всей кампании топлива, сводят на нет потенциал нептуния с точки зрения увеличения глубины выгорания – достижимое выгорание составляет 46 ГВт·сут/т, что сопоставимо с тради-

ционным урановым топливом реактора типа ВВЭР-1000.

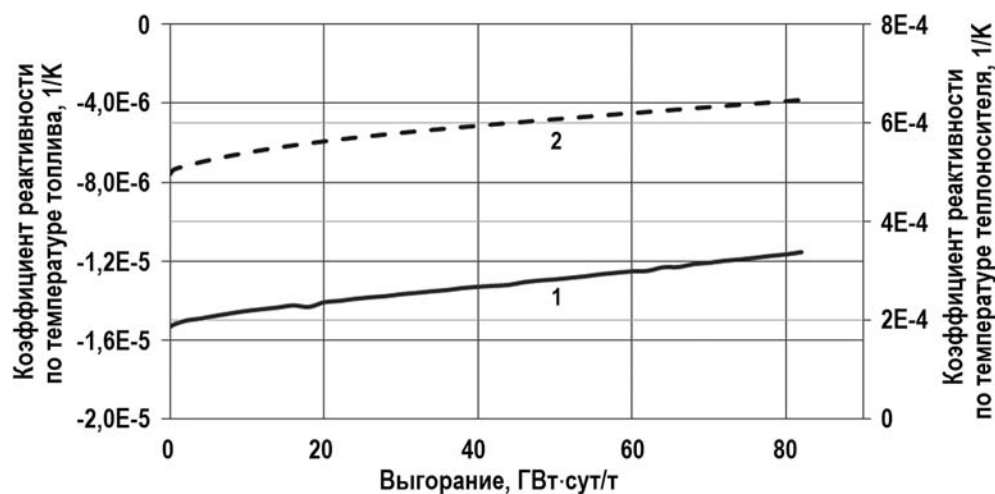


Рис. 7. Изменение коэффициентов реактивности топливной композиции 35% ^{235}U + 65% ^{237}Np в течение кампании: 1 – коэффициент реактивности по температуре топлива; 2 – коэффициент реактивности по температуре теплоносителя

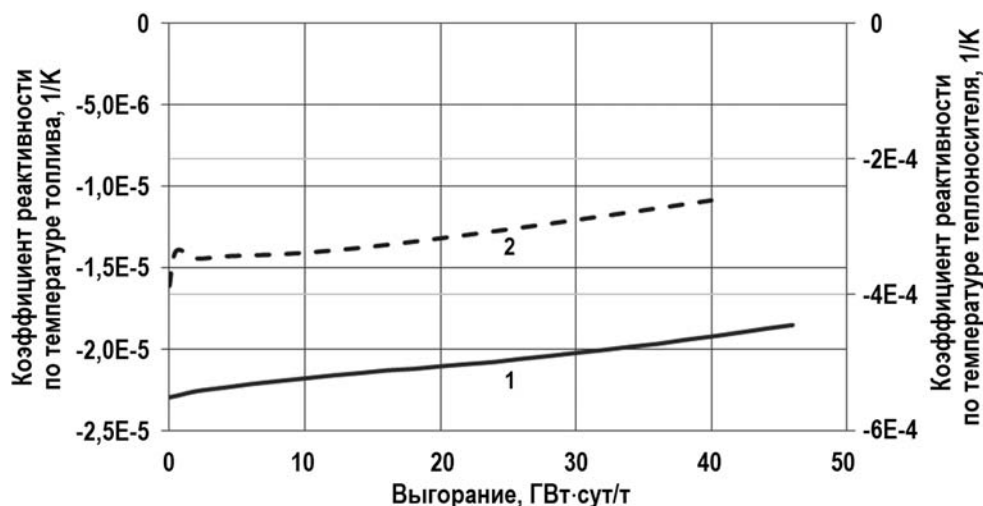


Рис. 8. Изменение коэффициентов реактивности топливной композиции 16% ^{235}U + 74% ^{238}U + 10% ^{237}Np в течение кампании: 1 – коэффициент реактивности по температуре топлива; 2 – коэффициент реактивности по температуре теплоносителя

ДОСТУПНОСТЬ ПРОТАКТИНИЯ И НЕПТУНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАГРУЗОК АКТИВНЫХ ЗОН ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

В настоящее время, по оценкам МАГАТЭ, в отработавшем ядерном топливе во всем мире содержится около 165 т нептуния [22]. Если ориентироваться на предлагаемые топливные композиции с высоким содержанием нептуния, то этих ресурсов для загрузки одного ВВЭР-1000 будет хватать лишь на несколько десятилетий. Поэтому говорить о крупномасштабной ядерной энергетике с вовлечением нептуния нельзя.

Протактиний же практически отсутствует в природе, поэтому возникает вопрос о его наработке в существенных количествах. Одним из способов наработки является облучение в энергетических реакторах ^{230}Th , присутствующего в урановых рудах. Недостатком способа является низкое содержание ^{230}Th в урановой руде –

всего 16 г/т. При существующем уровне производства урана в мире (примерно 50 000 т/г.) это означает возможность наработки менее тонны протактиния за год, однако такой вариант был успешно использован в США в 50-х – 60-х гг. XX в.

Второй способ наработки протактиния состоит в облучении ^{232}Th высокоэнергетичными термоядерными нейтронами в бланкете гибридного термоядерного реактора. Скорость наработки протактиния в ториевом бланкете такого реактора составляет около 1 кг на тонну топлива в год. Оценена возможность наработки протактиния в ториевом бланкете, окружающем термоядерный реактор типа ITER (термоядерной мощности 500 МВт), 800 кг протактиния в год.

В заключение заметим, что в связи с ограниченными запасами использование протактиния и нептуния будет, по-видимому, более привлекательным в малой энергетике – на станциях для удаленных районов, на плавучих атомных станциях, как источник энергии в космических аппаратах.

ВЫВОДЫ

Топливные композиции, имеющие в своем составе протактиний и нептуний, характеризуются повышенным выгоранием. При этом протактиний является предпочтительнее нептуния в связи с лучшими нейтронно-физическими характеристиками ^{232}U и ^{233}U , образующимися из протактиния, по сравнению с нейтронно-физическими характеристиками ^{238}Pu и ^{239}Pu , образующимися из нептуния.

Введение в состав топливной композиции протактиния обеспечивает сверхглубокое выгорание (624 ГВт·сут/т) и низкий коэффициент размножения нейтронов в течение всей кампании, однако топливо с существенным содержанием протактиния характеризуется положительным коэффициентом реактивности по температуре топлива.

Топливная композиция 16% ^{235}U + 74% ^{238}U + 10% ^{231}Pa характеризуется отрицательными коэффициентами реактивности по температуре топлива и теплоносителя в течение всей кампании. Достижимое выгорание при этом составляет 178 ГВт·сут/т, а кампании ~ 12 лет (для реактора типа ВВЭР-1000). Нарботка протактиния возможна в гибридных термоядерных реакторах [19 – 21].

Введение в состав топливной композиции нептуния обеспечивает глубокое выгорание (82 ГВт·сут/т), но топливо с существенным содержанием нептуния характеризуется положительным коэффициентом реактивности по температуре теплоносителя.

Для обеспечения отрицательных коэффициентов реактивности в течение всей кампании содержание нептуния в топливе необходимо снизить в такой степени, что при этом сводится на нет его потенциал увеличения глубины выгорания – оно составляет 46 ГВт·сут/т, что сопоставимо с традиционным урановым топливом реактора типа ВВЭР-1000.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (договор № 19-29-02006/19).

Литература

1. Климов А.Н. Ядерная физика и ядерные реакторы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
2. Куликов Е.Г., Куликов Г.Г., Крючков Э.Ф., Шмелев А.Н. Повышение глубины выгорания топлива легководных реакторов при введении в его состав протактиния ^{231}Pa . // Ядерная физика и инжиниринг. – 2013. – Т. 4. – № 4. – С. 291-299.
3. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Kulikov E.G., Apse V.A. Protactinium-231 as a new fissionable material for nuclear reactors that can produce nuclear fuel with stable neutron-multiplying properties. // Kerntechnik. – 2016. – Vol. 81. – No. 1. – PP. 34-37. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110598>

4. *Maershin, A.A., Tsykanov, V.A., Golovanov, V.N.* Development and Tests of the Fast Reactor Fuel Elements with Vibropacked Oxide Fuel (VOF). // *Atomnaya Energiya*. – 2001. – Vol. 91. – No. 5. – PP. 378-385.
5. *Subrata B.* TIC Benchmark Analysis. Joint IAEA-ICTP Workshop on Nuclear Reaction Data for Advanced Reactor Technologies. – Atomic Energy Regulatory Board of India, 2008. – 19 p. Электронный ресурс: <http://indico.ictp.it/event/a07153/session/60/contribution/34/material/0/0.pdf> (дата доступа 10.03.2019).
6. SCALE – A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design. Электронный ресурс: <http://scale.ornl.gov> (дата доступа 10.03.2019).
7. *Gauld I. C., Radulescu G., Ilas G., Murphy B. D., Williams M. L., Wiarda D.* Isotopic Depletion and Decay Methods and Analysis Capabilities in SCALE. // *Nuclear Technology*. – 2011. – Vol. 174(2). – PP. 169-195. DOI: <https://doi.org/10.13182/NT11-3>
8. *Bowman S.M.* Overview of the SCALE Code System. // *Nuclear Science and Engineering*. American Nuclear Society. – 2007. – Vol. 97. – PP. 589-591.
9. *Rearden B. T., Jessee M. A.* SCALE Code System. ORNL/TM-2005/39, Version 6.2. prepared by Oak Ridge National Laboratory for the US Department of Energy, April 2016. – 2715 p.
10. *Soppera N., Bossant M., Dupont E.* JANIS 4: An Improved Version of the NEA Java-based Nuclear Data Information System. // *Nuclear Data Sheets*. – 2014. – Vol. 120. – PP. 294-296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.071>
11. *Shibata K., Iwamoto O., Nakagawa T., Iwamoto N., Ichihara A., Kunieda S., Chiba S., Furutaka K., Otuka N., Ohsawa T., Murata T., Matsunobu H., Zukeran A., Kamada S. and Katakura J.* JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering. // *Journal of Nuclear Science and Technology*. – 2011. – Vol. 48(1). – PP. 1-30. DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711675>
12. *Maslov V.M., Baba M., Hasegawa A., Kornilov N.V., Kagalenko A.B., Tetereva N.A.* Neutron Data Evaluation of ^{231}Pa . – International Atomic Energy Agency, INDC(BLR)-019, 2004. – 126 p.
13. *Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др.* Физические величины. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
14. Safety of Nuclear Power Reactors, World Nuclear Association. Электронный ресурс: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx> (дата доступа 10.03.2019).
15. *Бекуриц К.Г., Виртц К.* Нейтронная физика. – М.: Атомиздат, 1968. – 456 с.
16. *Белл Д., Глестон С.* Теория ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1974. – 494 с. Электронный ресурс: <http://lib.wwer.ru/fizika-yadernyh-reaktorov/bell-teoriya-yadernyh-reaktorov.zip> (дата доступа 10.03.2019).
17. *Thomas W. K., Belle R. U.* Dynamics and Control of Nuclear Reactors. Academic press, 2019. – 402 p.
18. Calculator: Water Steam Pro. Электронный ресурс: <http://www.wsp.ru/en/> (дата доступа 10.03.2019).
19. *Кутеев Б.В., Хрипунов В.И.* Современный взгляд на гибридный термоядерный реактор. // ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез. – 2009. – Вып. 1. – С. 3-29.
20. *Shmelev A. N., Kulikov G. G., Kurnaev V. A., Salahutdinov G. H., Kulikov E. G., Apse V. A.* Hybrid fusion-fission reactor with a thorium blanket: Its potential in the fuel cycle of nuclear reactors. // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2015. – Vol. 78. – PP. 1100-1111. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778815100117>
21. *Krumbein A., Lemanska M., Segev M., Wagschal J.J., Yaari A.* Reaction Rate Calculations in Uranium and Thorium Blankets Surrounding a Central Deuterium-Tritium Neutron Source. // *Nuclear Technology*. – 1980. – Vol. 48. – PP. 110-116. DOI: <https://doi.org/10.13182/NT80-A32457>
22. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. – IAEA Nuclear Energy Series, 2018. – 72 p.

Поступила в редакцию 15.03.2019 г.

Авторы

Баатар Туул, аспирантка НИЯУ МИФИ
E-mail: tuulnea@gmail.com

Куликов Евгений Геннадьевич, доцент
E-mail: egkulikov@mephi.ru

UDC: 621.039.544.8

JUSTIFICATION OF VVER-1000 SAFETY WHEN USING FUEL COMPOSITIONS DOPED BY PROTACTINIUM AND NEPTUNIUM

Baatar T., Kulikov E.G.

National Research Nuclear University MEPhI
31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

Increasing fuel burn-up is one of the important areas of nuclear power development. The currently most common type of reactors (light-water reactors) is characterized by burn-up at the level of 5% of heavy metal, which means that only a small fraction of fuel is used to generate electricity.

This paper demonstrates the possibility of a significant increase in fuel burn-up due to the introduction of protactinium and neptunium into fuel composition. The chains of nuclide transformations starting with protactinium and neptunium are characterized by a gradual improvement in the neutron-physical properties, which ensures increased fuel burn-up. In this case, a situation may be observed when neutron-physical properties of the fuel composition improve during the reactor campaign, which indicates that at a certain moment of time the accumulation rate of fissile nuclides exceeds the rate of accumulation of fission products.

While protactinium is difficult to access in significant quantities, neptunium is contained in spent nuclear fuel, a significant amount of which is in on-site storage facilities. Therefore, from a practical point of view, the introduction of neptunium into fuel composition looks preferable. Significant quantities of protactinium could be accumulated in a hybrid thermonuclear reactor: high-energy neutrons resulting from a fusion reaction are suitable for threshold $(n,2n)$ and (n,γ) reactions which lead to accumulation of protactinium in the thorium blanket.

The novelty of this work is the analysis of the effect of protactinium and neptunium on reactivity coefficients during a fuel campaign. The calculations were carried out for a VVER-1000 type reactor using the SCALE-6.2 software package, which is widely used for neutron-physical calculations of nuclear reactors.

Key words: ultra-high fuel burn-up, light water reactor, protactinium, neptunium, moderator temperature coefficient, fuel temperature coefficient.

REFERENCES

1. Klimov A.N. *Nuclear Physics and Nuclear Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1985, 325 p. (in Russian).
2. Kulikov E., Kulikov G., Kryuchkov E., Shmelev A. Achievement of Higher Burn-up of LWR Fuel by Introduction of ^{231}Pa . *Nuclear Physics and Engineering*. 2013, v. 4 (4), pp. 291-299.
3. Shmelev N., Kulikov G., Kulikov E., Apse V. Protactinium-231 as a new fissionable material for nuclear reactors that can produce nuclear fuel with stable neutron-multiplying properties. *Kerntechnik*. 2016, no. 81(1), pp. 34-37. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110598>
4. Maershin, A.A., Tsykanov, V.A., Golovanov, V.N. Development and Tests of the Fast Reactor Fuel Elements with Vibropacked Oxide Fuel (VOF). *Atomnaya Energiya*. 2001, v. 91(5), pp.

378-385.

5. Subrata B. TIC Benchmark Analysis. Joint IAEA-ICTP Workshop on Nuclear Reaction Data for Advanced Reactor Technologies. Atomic Energy Regulatory Board of India, 2008. 19 p. Available at: <http://indico.ictp.it/event/a07153/session/60/contribution/34/material/0/0.pdf> (accessed Mar 10, 2019).

6. SCALE – A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design. Available at: <http://scale.ornl.gov> (accessed Mar 10, 2019).

7. Gauld I. C., Radulescu G., Ilas G., Murphy B. D., Williams M. L., Wiarda D. Isotopic Depletion and Decay Methods and Analysis Capabilities in SCALE. *Nuclear Technology*. 1011, v. 174(2), pp. 169-195. DOI: <https://doi.org/10.13182/NT11-3>

8. Bowman S. M. Overview of the SCALE Code System. *Nuclear Science and Engineering. American Nuclear Society*. 2007, v. 97, pp. 589-591.

9. Rearden B. T., Jessee M. A. SCALE Code System. ORNL/TM-2005/39, Version 6.2. prepared by Oak Ridge National Laboratory for the US Department of Energy. April 2016, 2715 p.

10. Soppera N., Bossant M., Dupont E. JANIS 4: An Improved Version of the NEA Java-based Nuclear Data Information System. *Nuclear Data Sheets*, 2014, v. 120, pp. 294-296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.071>

11. Shibata K., Iwamoto O., Nakagawa T., Iwamoto N., Ichihara A., Kunieda S., Chiba S., Furutaka K., Otuka N., Ohsawa T., Murata T., Matsunobu H., Zukeran A., Kamada S. and Katakura J. JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2011, v. 48(1), pp. 1-30. DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.2011.9711675>

12. Maslov V. M., Baba M., Hasegawa A., Kornilov N. V., Kagalenko A. B., Tetereva N. A. Neutron Data Evaluation of ^{231}Pa . International Atomic Energy Agency, INDC(BLR)-019, 2004. 126 p.

13. Babichev A. P., Babushkina N. A., Bratkovsky A. M. et al. *Physical Quantities. Handbook*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p. (in Russian).

14. Safety of Nuclear Power Reactors, World Nuclear Association. Available at: <http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx> (accessed Mar 10, 2019).

15. Bekurtz K., Wirtz K. *Neutron Physics*. Moscow. Atomizdat Publ., 1968. 456 p. (in Russian).

16. Bell D., Glasstone S. *Nuclear Reactor Theory*. Van Nostrand Reinhold Company, 1970, 494 p. Available at: <http://lib.wwer.ru/fizika-yadernyh-reaktorov/bell-teoriya-yader-reaktorov.zip> (accessed Mar 10, 2019) (in Russian).

17. Thomas W. K., Belle R. U. *Dynamics and Control of Nuclear Reactors*. Academic press, 2019. 402 p.

18. *Calculator: Water Steam Pro*. Available at: <http://www.wsp.ru/en/> (accessed Mar 10, 2019).

19. Kuteev B. V., Khripunov V. I. Modern Consideration of Hybrid Thermonuclear Reactor. *VANT. Ser: Termoyadernyj Sintez*. 2009, iss. 1, pp. 3-29 (in Russian).

20. Shmelev A. N., Kulikov G. G., Kurnaev V. A., Salahutdinov G. H., Kulikov E. G., Apse V. A. Hybrid fusion-fission reactor with a thorium blanket: Its potential in the fuel cycle of nuclear reactors. *Physics of Atomic Nuclei*. 2015, v. 78, pp. 1100-1111. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778815100117>

21. Krumbein A., Lemanska M., Segev M., Wagschal J. J., Yaari A. Reaction Rate Calculations in Uranium and Thorium Blankets Surrounding a Central Deuterium-Tritium Neutron Source. *Nuclear Technology*, 1980, v. 48, pp. 110-116. DOI: <https://doi.org/10.13182/NT80-A32457>

22. Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management. *IAEA Nuclear Energy Series*, 2018. 72 p.

Authors

Baatar Tuul, PhD Student

E-mail: tuulnea@gmail.com

Kulikov Evgeny Gennadievich, Associate Professor

E-mail: egkulikov@mephi.ru