

ПРОТАКТИНИЙ-231 – НОВЫЙ ВЫГОРАЮЩИЙ ПОГЛОТИТЕЛЬ НЕЙТРОНОВ

Г.Г. Куликов, Е.Г. Куликов, А.Н. Шмелев, В.А. Апсэ

НИЯУ МИФИ

115409 Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31

Р

Для компенсации избыточной реактивности в ядерных реакторах используются такие выгорающие поглотители, как гадолиний и эрбий. При этом дочерние нуклиды, образующиеся в результате поглощения на гадолинии и эрбии, не играют существенной роли с точки зрения нейтронно-физических процессов, протекающих в активной зоне реактора. Представляет интерес выбор такого выгорающего поглотителя, дочерние нуклиды которого оказывали бы благоприятное влияние на развитие цепной реакции деления.

Исследуются нейтронно-физические свойства нового выгорающего поглотителя – ^{231}Pa , а также возможности его наработки в существенных количествах. Аналогом цепочки нуклидных превращений, начинающихся с ^{231}Pa , является цепочка, начинающаяся с ^{237}Np . Улучшение размножающих свойств в ^{237}Np -цепочке проявляется только в быстром спектре нейтронов, а ^{231}Pa -цепочка характеризуется значительным положительным нейтронным балансом как в быстром, так и в тепловом спектрах нейтронов. С этой точки зрения ^{231}Pa -цепочка уникальна. Кроме того, если ^{237}Np может быть наработан в ядерных реакторах в результате радиационного захвата ^{235}U , то наработка ^{231}Pa в заметных количествах возможна только через пороговые (n,2n)- и (n,3n)-реакции на ^{232}Th , для реализации которых необходимы нейтроны сверхвысоких энергий. Таких нейтронов практически нет даже в быстрых реакторах, но они имеются в термоядерных установках. Нарработка ^{231}Pa в термоядерных установках и его последующее использование в ядерных реакторах позволит раскрыть потенциальные возможности термоядерных установок для радикального увеличения глубины выгорания топлива ядерных реакторов. Таким образом, ^{231}Pa является новым и уникальным выгорающим поглотителем, который ранее не предлагался.

При выполнении работы использовались библиотеки оцененных ядерных данных JENDL-4.0 и ENDF/B-V, а также расчетный комплекс SCALE-4.3.

В отличие от традиционно используемых выгорающих поглотителей на основе гадолиния и эрбия предлагаемый в работе изотоп протактиния выглядит более привлекательно, поскольку позволяет не только скомпенсировать начальный запас реактивности, но и обеспечить глубокое выгорание за счет высоких размножающих свойств дочерних нуклидов. Существенные количества протактиния могут быть наработаны в гибридных термоядерных реакторах (ГТР), которые являются источниками нейтронов (а не источниками энергии), и параметры которых уже достигнуты к настоящему времени на экспериментальных установках США, Японии, Англии.

Ключевые слова: выгорающий поглотитель, протактиний-231, гадолиний, эрбий, глубокое выгорание, сверхдлинная кампания, стабилизированные размножающие свойства.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из способов компенсации избыточной реактивности является использование выгорающих поглотителей нейтронов. Это вещества с высоким сечением поглощения тепловых нейтронов, неподвижно размещаемые в активной зоне и медленно истощаемые при работе реактора за счет поглощения ими нейтронов, из-за чего на их месте образуются дочерние нуклиды с существенно меньшими сечениями поглощения, что приводит к высвобождению запаса реактивности. Следует отметить, что при этом дочерние нуклиды не играют какой-либо существенной роли с точки зрения нейтронно-физических процессов, протекающих в активной зоне реактора.

Основными назначениями выгорающих поглотителей нейтронов являются

- частичная компенсация избыточной реактивности в начале кампании;
- по возможности полное освобождение реактивности (за счет полного прогорания) в конце кампании;
- выравнивание поля энерговыделения.

В настоящее время наиболее широко применяемыми выгорающими поглотителями являются оксиды гадолиния (Gd_2O_3) и эрбия (Er_2O_3), которые применяются в реакторах типа ВВЭР и РБМК соответственно [1, 2]. Следует подчеркнуть, что эти материалы играют роль только поглотителя нейтронов для компенсации избыточной реактивности.

В работе предлагается новый выгорающий поглотитель нейтронов – оксид протактиния (PaO_2). Отличительной особенностью ^{231}Pa является то, что его дочерние продукты ^{232}U и ^{233}U являются делящимися материалами, способными поддерживать цепную реакцию деления. Таким образом, протактиний может выполнять одновременно две функции – выгорающего поглотителя и стартового нуклида цепочки превращений, способствующей поддержанию размножающих свойств топлива [3, 4].

СВОЙСТВА ВЫГОРАЮЩИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ

В реакторе типа ВВЭР в качестве выгорающего поглотителя используется гадолиний природного состава в форме Gd_2O_3 [1]. Природный гадолиний включает в себя семь изотопов, при этом ключевую роль в данном случае играет ^{157}Gd , который характеризуется наибольшим сечением поглощения нейтронов (253 254 барн в тепловой точке, табл. 1). Столь большое сечение поглощения приводит к тому, что если добавить в каждый твэл небольшое количество выгорающего поглотителя на основе Gd_2O_3 , то сильнопоглощающий нуклид ^{157}Gd быстро «сгорит». В связи с этим в реакторах типа ВВЭР используются большие концентрации выгорающего поглотителя на основе гадолиния в ограниченном числе твэлов, так как это приводит к эффекту блокировки поглотителя и позволяет снизить скорость его прогорания (высвобождения реактивности).

В реакторе типа РБМК в качестве выгорающего поглотителя используется эрбий природного состава в форме Er_2O_3 [1]. Природный эрбий включает в себя шесть изотопов, при этом ключевую роль в данном случае играет ^{167}Er (644 барн в тепловой точке, табл. 1). Таким образом, в отличие от гадолиния эрбий имеет не такое большое сечение поглощения нейтронов. В связи с этим если разместить эрбий так же, как и гадолиний (в большой концентрации, в ограниченном числе твэлов), то поглотитель будет выгорать очень медленно. Поэтому в реакторах типа РБМК эрбий равномерно добавляется во все твэлы в относительно небольших концентрациях.

Использование эрбия в реакторах типа РБМК обусловлено тем, что в случае ужесточения спектра нейтронов, сопровождающегося более активным делением ^{239}Pu (резонанс при энергии около 0.3 эВ), поглощение на ^{167}Er способно нивелировать этот эф-

фект (резонанс при энергии около 0.5 эВ).

Таблица 1

Сечение захвата нейтронов в тепловой точке и резонансный интеграл [5]

Нуклид	σ_c (2200 м/с), барн	Резонансный интеграл захвата нейтронов, барн
^{157}Gd	253 254	784
^{158}Gd	2.2	72
^{167}Er	644	3 000
^{168}Er	2.7	38
^{231}Pa	202	540
^{232}U	$(\sigma_c / \sigma_f) = 75 / 77$	$(I_\gamma / I_f) = 172 / 355$
^{238}U	2.7	275
^{232}Th	7.3	84

Гадолиний и эрбий являются классическими выгорающими поглотителями в том смысле, что их дочерние продукты, образующиеся в результате захвата нейтронов, характеризуются значительно меньшими сечениями поглощения (2.2 барн для ^{158}Gd и 2.7 барн для ^{168}Er) по сравнению с исходными нуклидами и, фактически, не играют какой-либо роли в дальнейшем.

В качестве нового выгорающего поглотителя предлагается использовать ^{231}Pa . Данный изотоп является родоначальником цепочки последовательных превращений нуклидов с постепенным улучшением размножающих свойств ($^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{232}\text{U} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow \dots$), которая радикально отличается от цепочек нуклидных превращений, начинающихся с гадолиния и эрбия наличием следующих друг за другом делящихся нуклидов ^{232}U и ^{233}U :

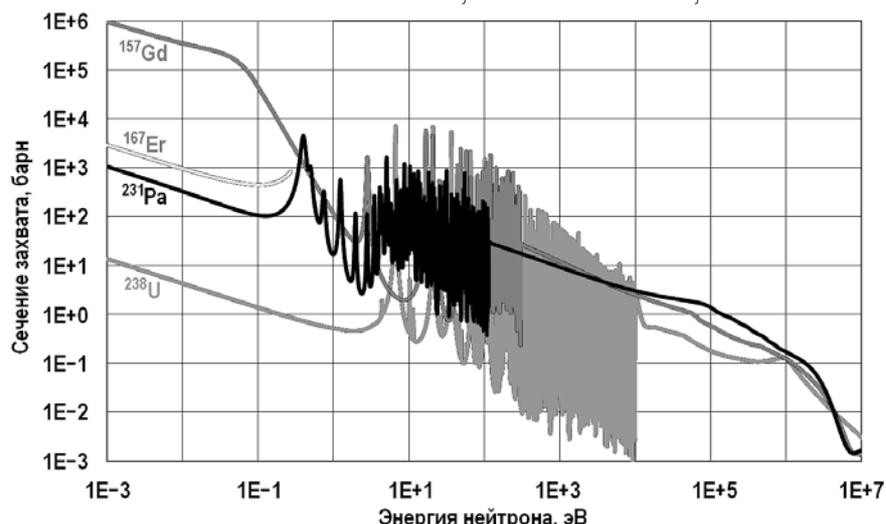
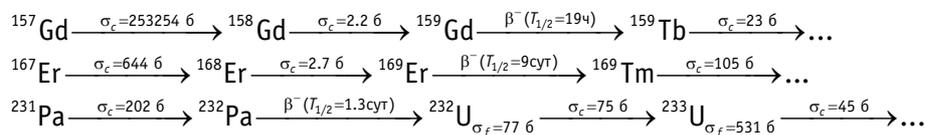


Рис. 1. Зависимость сечения захвата ^{157}Gd , ^{167}Er , ^{231}Pa и ^{238}U от энергии нейтронов [5]

То, что ^{231}Pa может играть роль выгорающего поглотителя, можно видеть из табл. 1 и рис. 1, где представлены сечения захвата нейтронов на ^{231}Pa и для сравнения сече-

ния известных выгорающих поглотителей ^{157}Gd и ^{167}Er , а также известного сырьевого нуклида ^{238}U . Для сохранения наглядности сечение захвата ^{167}Er на рис. 1 представлено только до 0.3 эВ, поскольку выше этой энергии оно ведет себя схоже с ^{231}Pa (в том числе резонанс в области 0.5 эВ).

Можно видеть, что в резонансной области энергий нейтронов величины резонансных интегралов захвата нейтронов для ^{231}Pa и ^{157}Gd сопоставимы, а в области тепловых энергий ^{231}Pa является достаточно сильным поглотителем нейтронов (сечение захвата в тепловой точке составляет 202 барн, что существенно больше, чем сечение захвата для сырьевых ^{238}U и ^{232}Th – 2.7 и 7.3 барн соответственно), но не таким сильным поглотителем, как быстро выгорающий ^{157}Gd (253254 барн) и медленнее выгорающий ^{167}Er (644 барн).

За счет относительно большого сечения захвата нейтронов ^{231}Pa уменьшает начальный запас реактивности. Его сечение захвата не столь велико, как у ^{157}Gd и ^{167}Er , поэтому выгорать он будет медленнее, чем эти нуклиды. Это можно расценивать как благоприятный фактор, потому что стабилизация размножающих свойств будет поддерживаться до более глубоких выгораний топлива.

Таким образом, ^{231}Pa как выгорающий поглотитель будет выгодно отличаться следующим образом от гадолиния и эрбия.

Во-первых, его сечение поглощения не так велико, как у гадолиния и эрбия, и поэтому он выгорает существенно медленнее, и стабилизирующее влияние на размножающие свойства реактора сказывается существенно дольше. В то же время сечение поглощения у ^{231}Pa существенно выше, чем у ^{238}U и ^{232}Th , поэтому не потребуются введения чрезмерно большой доли ^{231}Pa , чтобы проявилось его положительное влияние.

Во-вторых, поглощенные в ^{231}Pa нейтроны будут затем возвращены в цепную реакцию благодаря делению дочерних нуклидов, первый из которых ^{232}U является умеренно делящимся нуклидом для тепловых и промежуточных нейтронов. Под «умеренно делящимся нуклидом», здесь понимается, во-первых, то, что его сечение деления существенно меньше, чем для ^{235}U , и, во-вторых, сопоставимость по величине сечений деления и захвата в области как тепловых, так и резонансных энергий нейтронов (рис. 2).

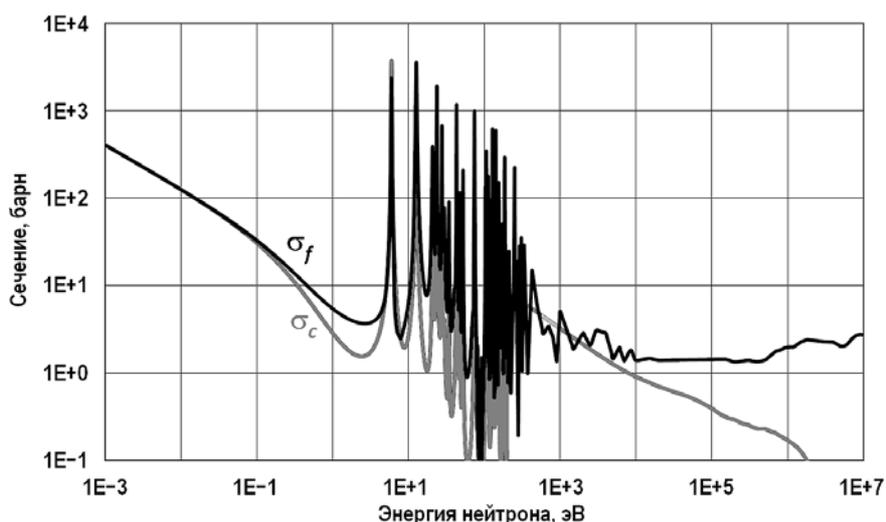


Рис. 2. Зависимость сечений деления и захвата для ^{232}U от энергии нейтрона [5]

Эти свойства ^{232}U определяют меньшее число избыточных нейтронов, появляющихся в результате поглощения нейтрона ядром ^{232}U , чем для ядра ^{235}U (рис. 3). Однако в результате радиационного захвата нейтрона ядро ^{232}U нельзя считать потерянным, так

как оно превращается в нуклид ^{233}U , который является хорошо известным высокоэффективным делящимся нуклидом, – в тепловой точке сечение деления ($\sigma_f = 531$ барн) на порядок превосходит сечение захвата ($\sigma_c = 45$ барн).

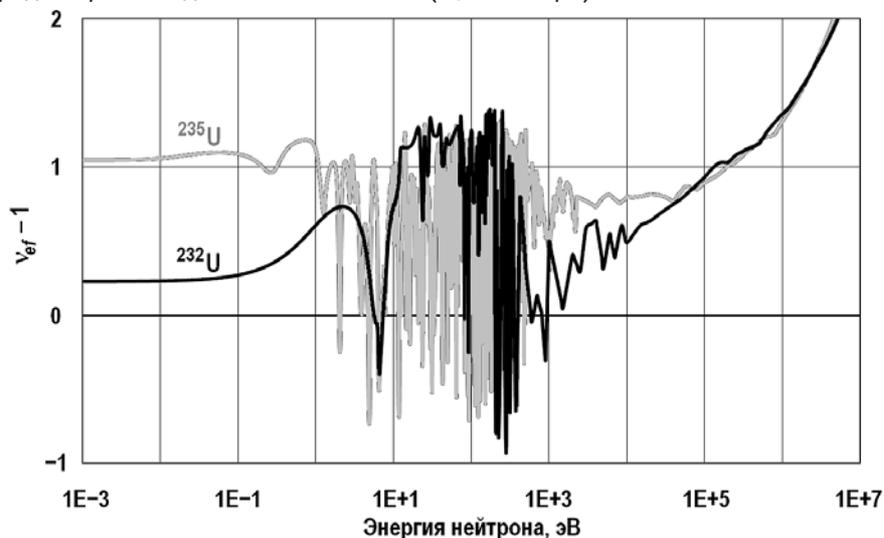


Рис. 3. Зависимость числа избыточных нейтронов в расчете на одно поглощение для ^{232}U (в сравнении с ^{235}U) от энергии нейтрона [5]

Таким образом, при использовании ^{231}Pa в роли выгорающего поглотителя поглощение нейтронов продуктами деления и выгорание делящихся нуклидов в процессе работы реактора в определенной степени компенсируются подпиткой от ^{231}Pa (образование двух следующих друг за другом делящихся нуклидов ^{232}U и ^{233}U). Это открывает принципиальную возможность увеличения кампании топлива и достижения сверхглубокого выгорания.

ДОСТИЖЕНИЕ СВЕРХГЛУБОКОГО ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА БЛАГОДАРЯ ^{231}Pa

Расчеты, связанные с выгоранием топлива, представляют собой расчеты эквивалентной ячейки, выполненные с помощью расчетного комплекса SCALE [6 – 8] с использованием библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-V [9]. Рассматривается элементарная ячейка реактора типа ВВЭР-1000 (плотность теплоносителя 0.72 г/см³) с оксидным топливом в предположении, что конструкционным материалом теплоделяющих элементов является мартенситная сталь МА956, имеющая следующий состав: 74.5% Fe + 20% Cr + 4.5% Al + 0.5% Ti + 0.5% Y₂O₃ [10].

Изменение коэффициента размножения нейтронов в процессе выгорания для двух случаев (без выгорающего поглотителя и использование выгорающего поглотителя на основе ^{231}Pa) представлено на рис. 4.

Как видно из рисунка, в случае отсутствия выгорающего поглотителя (50% ^{235}U + 50% ^{238}U) начальный запас реактивности весьма существенен: $K_{\infty}(0) \approx 1.7$; при этом достижимое выгорание составляет 34% т.а. При использовании ^{231}Pa в качестве выгорающего поглотителя (50% ^{235}U + 50% ^{231}Pa) коэффициент размножения нейтронов остается практически неизменным и близким к единице на протяжении всей кампании, что свидетельствует о том, что поглощение нейтронов продуктами деления и выгорание имеющихся в топливе делящихся нуклидов почти полностью компенсируются воспроизводством новых делящихся нуклидов из выгорающего поглотителя.

Спектр нейтронов становится резонансным благодаря значительному поглощению в протактинии, существенная часть которого (около 80%) переходит в делящиеся нукли-

ды (^{232}U и ^{233}U), успевающие выгорать, поддерживая таким образом реактивность и обеспечивая сверхглубокое выгорание, около 51% т.а. (см. рис. 4).

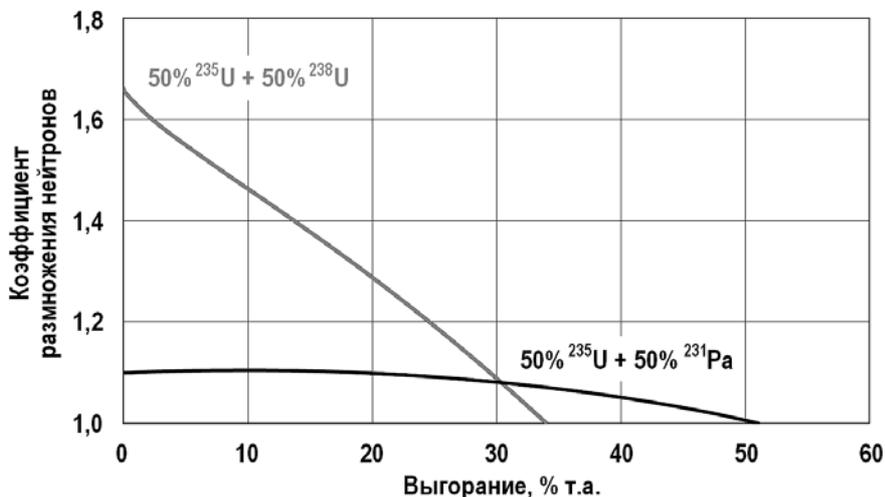
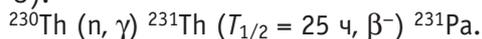


Рис. 4. Достижение сверхглубокого выгорания в реакторе типа ВВЭР-1000 за счет использования ^{231}Pa в качестве выгорающего поглотителя

Если предположить, что реактор имеет загрузку по тяжелому металлу, аналогичную реактору типа ВВЭР-1000 (около 66-ти тонн), и работает на тепловой мощности 3000 МВт, то данное выгорание соответствует длительности кампании около 35-ти лет.

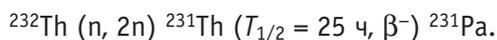
О ВОЗМОЖНОСТИ НАРАБОТКИ ПРОТАКТИНИЯ ^{231}Pa

В связи с тем, что в отличие от гадолиния и эрбия протактиний практически отсутствует в природе, возникает вопрос о его наработке в значимых количествах для использования в качестве выгорающего поглотителя. По-видимому, возможны два способа наработки протактиния. Первый способ заключается в облучении в энергетических реакторах ^{230}Th , присутствующего в урановых рудах (^{230}Th – продукт α -распада ^{234}U):



Недостатком данного способа является низкое содержание ^{230}Th в урановой руде – всего 16 г/т. При существующем уровне производства урана в мире (~ 60 000 т/г [11]) это означает возможность наработки менее тонны протактиния в год, однако данный способ был успешно использован в США в 50 – 60-е гг. XX в. [12].

Второй способ наработки протактиния состоит в облучении ^{232}Th жесткими термоядерными нейтронами в бланкете гибридного термоядерного реактора (ГТР) [13]:



Поскольку образование ^{231}Pa происходит через пороговые ядерные реакции $(n, 2n)$ и $(n, 3n)$, то, по-видимому, наиболее эффективно данный изотоп может быть наработан в ториевом бланкете ГТР, характеризующегося высокоэнергетическим спектром нейтронного поля [13]. Концепция ГТР заключается в следующем: зона термоядерной реакции рассматривается как источник термоядерных нейтронов, управляющий цепной ядерной реакцией в подкритическом бланкете, в котором происходит размножение нейтронов и энергии [14, 15].

Скорости реакций в ториевом бланкете ГТР определены в работе [16] на основе эксперимента, а в работе [17] – на основе расчета. В работе [16] D-T-источник 14 МэВ нейтронов располагался в центре ториевого цилиндра; в работе [17] скорости ре-

акций получены расчетным путем с использованием библиотеки ядерных данных ENDF/B-IV. Следует отметить, что экспериментальные и расчетные данные по скорости захвата нейтронов в тории достаточно хорошо совпадают (табл. 2). Расчет скорости пороговой (n, 2n)-реакции на 38% превышает экспериментальное значение, а пороговой (n, 3n)-реакции занижает в два раза.

Таблица 2

Скорости реакций в ториевом бланкете ГТР в расчете на один 14 МэВ нейтрон

Реакция	Эксперимент [16]	Расчет [17]
$^{232}\text{Th} (n, f)$	0.174 ± 0.01	0.193
$^{232}\text{Th} (n, \gamma) \dots ^{233}\text{U}$	1.63 ± 0.10	1.58
$^{232}\text{Th} (n, 2n) \dots ^{231}\text{Pa}$	0.42 ± 0.04	0.58
$^{232}\text{Th} (n, 3n) ^{230}\text{Th}$	0.30 ± 0.05	0.15

Таблица 3

Изотопный состав топлива ГТР с ториевым бланкетом, кг изотопа / т топлива

Изотоп	Время облучения, сут				
	200	400	600	800	1000
^{231}Pa	0.68	1.30	1.85	2.33	2.75
^{232}U	0.03	0.13	0.29	0.51	0.78
^{233}U	1.77	3.94	6.09	8.23	10.3

Высокая вероятность ядерных реакций (n, 2n) и (n, 3n) существенно сказывается на соотношении нарабатываемых нуклидов в ториевом бланкете ГТР с высокоэнергетическим спектром нейтронного поля по отношению к тем же нуклидам, образующимся при облучении тория в спектре нейтронов ядерных реакторов. Результаты расчета изотопного состава ториевого топлива, облучаемого в течение 1000 сут в бланкете ГТР, приведены в табл. 3 [13]. Нейтронная нагрузка на первую стенку реактора принята равной 1 МВт/м².

Из таблицы 3 следует, что скорость наработки ^{231}Pa в ториевом бланкете ГТР составляет около 1 кг/т топлива в год. Исходя из экспериментальных данных о скорости пороговых реакций (n, 2n) и (n, 3n) в ториевом бланкете ГТР (см. табл. 2) оценена возможность наработки протактиния в ториевом бланкете, окружающем термоядерный реактор типа ITER (термоядерная мощность 500 МВт) 800 кг ^{231}Pa в год [18 – 20].

Поэтому можно заключить, что хотя в будущем благодаря термоядерным реакторам наработка протактиния станет возможной в существенных количествах, в настоящее время его накопление затруднительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено нейтронно-физическое обоснование использования ^{231}Pa в качестве выгорающего поглотителя, который в отличие от традиционно используемых гадолиния и эрбия способен не только компенсировать избыточную реактивность, но и существенно повысить выгорание топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта 13.9748.2017/8.9.

Литература

1. Characteristics and Use of Urania-Gadolinia Fuels. IAEA-TECDOC-844. – Vienna: IAEA, 1995.
2. Renier J.-P.A., Grossbeck L. Development of improved burnable poisons for commercial nuclear power reactors. Oak Ridge National Laboratory, 2001.
3. 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 // J. Nucl. Sci. Technol. – 2011. – Vol. 48. – No. 1. – PP. 1-30.

4. Куликов Г.Г., Куликов Е.Г., Крючков Э.Ф., Шмелев А.Н. Повышение глубины выгорания и защищенности топлива легководных реакторов при совместном введении в его состав ^{231}Pa и ^{237}Np // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 80-92.

5. 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.

6. SCALE: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design. Электронный ресурс: <http://scale.ornl.gov/scale> (дата доступа 07.07.2017).

7. Rearden B.T., Jessee M.A. SCALE Code System, Oak Ridge National Laboratory report ORNL/TM-2005/39.

8. Цветков П.В. Объединенный одномерный расчет изменения состава топлива в процессе облучения в реакторе и радиационных характеристик облученного топлива с помощью комплекса программ SCALE (версия 4.3). – Москва, 1998.

9. 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.

10. Incoloy – Википедия (свободная энциклопедия). Электронный ресурс: <https://en.wikipedia.org/wiki/Incoloy> (дата доступа 07.07.2017).

11. Nuclear Energy Agency. Uranium 2014: Resources, Production and Demand. – 2014.

12. Stewart D.C., Macias E.S., Basile L.J., Milsted J. Buildup of radioactive products in thermal reactors. III // ANL-7486, Technical Report. – 1968.

13. Марин С.В., Шаталов Г.Е. Изотопный состав топлива в blankets гибридного термоядерного реактора с ториевым циклом // Атомная энергия. – 1984. – Т. 56. – Вып. 5. – С. 289-291.

14. Кутеев Б.В., Хрипунов В.И. Современный взгляд на гибридный термоядерный реактор // ВАИТ. Серия: Термоядерный синтез. – 2009. – Вып. 1. – С. 3-29.

15. Leonard B.R. A Review of Fusion-Fission (hybrid) Concepts. // Nuclear Technology. – 1973. – Vol. 20. – PP. 161-178.

16. Shieff H.E.J., Goodfellow H., Gray J., Mullender M.L., Weale J.W. Measurements of the reaction rate distributions produced in a large thorium cylinder by a central source of DT neutrons. United Kingdom Atomic Energy Authority, 1977.

17. Krumbein A., Lemanska M., Segev M., Wagschal J.J., Yaari A. Reaction rate calculations in Uranium blankets surrounding a central Deuterium-Tritium neutron source // Nuclear Technology. – 1980. – Vol. 48. – PP. 110-116.

18. 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. – № 10. – PP. 1100-1111.

19. Куликов Г.Г., Шмелев А.Н., Гераскин Н.И., Куликов Е.Г., Апсэ В.А. Перспективный топливный цикл ядерной энергетике РФ с привлечением незначительного количества тория от термоядерного источника нейтронов с Th-blankетом // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 1. – С. 111-118.

20. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Geraskin N.I., Kulikov E.G., Apse V.A. Advanced nuclear fuel cycle for the RF using actinides breeding in thorium blankets of fusion neutron source // Nuclear Energy and Technology. – 2016. – Vol. 2. – Iss. 2. – PP.147-150.

Поступила в редакцию 27.10.2016 г.

Авторы

Куликов Геннадий Генрихович, ведущий инженер

E-mail: ggkulikov@mephi.ru

Куликов Евгений Геннадьевич, старший преподаватель

E-mail: egkulikov@mephi.ru

Шмелев Анатолий Николаевич, профессор

E-mail: shmelan@mail.ru

Апсэ Владимир Александрович, заведующий НИС

E-mail: apseva@mail.ru

UDC 621.039.544.8

PROTACTINIUM-231 – NEW BURNABLE NEUTRON ABSORBERKulikov G.G., Kulikov E.G., Shmelev A.N., Apse V.A.

NRNU MEPhI

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

ABSTRACT

To compensate reactivity excess in nuclear reactors burnable neutron absorbers such as gadolinium and erbium are used. Their daughter nuclides resulting from neutron absorption by erbium and gadolinium play no important role in terms of neutron-physical processes occurring in the reactor core. A burnable neutron absorber, daughter nuclides of which would have a beneficial effect on fission chain reaction, is of a great interest.

The aim of the work is to study neutron-physical properties of new burnable neutron absorber – ^{231}Pa , and possibilities of its producing in significant quantities. The chain of isotopic transformations starting from ^{231}Pa is an analogue to the chain of isotopic transformations starting from ^{237}Np . However, gradual improvement of neutron-multiplying properties in ^{237}Np -chain can be only achieved in fast neutron spectra while in the case of ^{231}Pa -chain a positive neutron balance can be achieved both in fast and thermal neutron spectra. So, in this sense the chain starting from ^{231}Pa is a unique one. In addition, ^{237}Np can be produced in nuclear reactors as a result of neutron radiative capture by ^{235}U while significant amounts of ^{231}Pa can be only produced through the threshold (n,2n) and (n,3n)-reactions of ^{232}Th under its bombardment by ultra high-energy neutrons. So high-energy neutrons are practically absent even in fast spectrum reactors, these neutrons can be produced by fusion facilities only. Production of ^{231}Pa in fusion facilities and the further use of ^{231}Pa in nuclear power reactors can make it possible to realize some potential capabilities of fusion facilities for radical increase of nuclear fuel burn-up. Thus, isotope ^{231}Pa is a new and unique burnable neutron absorber that was not proposed yet.

During implementation of the work evaluated nuclear data libraries JENDL-4.0 and ENDF/B-V were used, as well as computer software system SCALE-4.3.

We obtained the following results.

1. In contrast to conventional burnable neutron absorbers based on gadolinium and erbium, the isotope of protactinium proposed in this paper seems to be more attractive because it allows us not only to compensate initial reactivity excess, but also to provide high fuel burn-up thanks to good multiplying properties of its daughter nuclides.

2. Significant quantities of protactinium could be produced in hybrid fusion-fission reactors, which are sources of neutrons (not sources of energy), and parameters of which have been already achieved at present time at experimental facilities in USA, Japan, UK.

Key words: burnable absorber, protactinium-231, gadolinium, erbium, high fuel burn-up, very long fuel campaign, stabilized multiplying properties.

REFERENCES

1. Characteristics and Use of Urania-Gadolinia Fuels. IAEA-TECDOC-844. Vienna, IAEA, 1995.
2. Renier J.-P.A., Grossbeck L. Development of improved burnable poisons for commercial nuclear power reactors. Oak Ridge National Laboratory, 2001.
3. 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, no. 1, pp. 1-30.
4. Kulikov G., Kulikov E., Kryuchkov E., Shmelev A. Achievement of Higher Burn-up and Proliferation Protection of LWR Fuel by Introduction of ^{231}Pa and ^{237}Np . *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2011, no. 4, pp. 80-92 (in Russian).
5. 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, no. 4, pp. 291-299 (in Russian).
6. SCALE: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design. Available at: <http://scale.ornl.gov/scale> (accessed 7 Jul. 2017).
7. Rearden B.T., Jessee M.A. SCALE Code System, Oak Ridge National Laboratory report ORNL/TM-2005/39.
8. Cvetkov P.V. Ob'edinennyj odnomernyj raschet izmeneniya sostava topliva v processe oblucheniya v reaktore i radiacionnyh harakteristik obluchennogo topliva s pomoshh'ju kompleksa programm SCALE (versiya 4.3) [Combined one-dimensional calculation of the fuel composition change in the process of irradiation in a reactor and radiation characteristics of irradiated fuel using program SCALE (version 4.3)]. Moscow, 1998 (in Russian).
9. Maslov V.M., Baba M., Hasegawa A., Kornilov N.V., Kagalenko A.B., Teterova N.A. Neutron Data Evaluation of ^{231}Pa . International Atomic Energy Agency, INDC(BLR)-019, 2004.
10. Incoloy – Wikipedia, the free encyclopedia. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Incoloy> (accessed 7 Jul. 2016).
11. Nuclear Energy Agency. Uranium 2014: Resources, Production and Demand. 2014.
12. Stewart D.C., Macias E.S., Basile L.J., Milsted J. Buildup of radioactive products in thermal reactors. III. ANL-7486, Technical Report. 1968.
13. Marin S.V., Shatalov G.E. Izotopnyj sostav topliva v blankete gibridnogo termojadernogo reaktora s torievym ciklom [The isotopic composition of the fuel in the blanket of hybrid fusion reactor with thorium nuclear fuel cycle]. *Atomnaya energiya*. 1984, v. 56, no. 5, pp. 289-291 (in Russian).
14. Kuteev B.V., Hripunov V.I. Sovremennyy vzglyad na gibridnyj termojadernyj reaktor [The modern consideration of the hybrid fusion reactor]. *VANT. Ser. Termoyadernyj sintez*. 2009, v. 1, pp. 3-29 (in Russian).
15. Leonard B.R. A Review of Fusion-Fission (hybrid) Concepts. *Nuclear Technology*, 1973, v. 20, pp. 161-178.
16. Shieff H.E.J., Goodfellow H., Gray J., Mullender M.L., Weale J.W. Measurements of the reaction rate distributions produced in a large thorium cylinder by a central source of DT neutrons. United Kingdom Atomic Energy Authority, 1977.
17. Krumbein A., Lemanska M., Segev M., Wagschal J.J., Yaari A. Reaction rate calculations in Uranium blankets surrounding a central Deuterium-Tritium neutron source. *Nuclear Technology*. 1980, v. 48, pp. 110-116.
18. 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, no. 10, pp. 1100-1111.
19. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Geraskin N.I., Kulikov E.G., Apse V.A. Fuel cycle of Russian nuclear power with involvement of thorium resources and thermonuclear neutron source with Th-blanket // *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. – 2016, №1, pp. 111-118 (in Russian).
20. Kulikov G.G., Shmelev A.N., Geraskin N.I., Kulikov E.G., Apse V.A. Advanced nuclear fuel cycle for the RF using actinides breeding in thorium blankets of fusion neutron source. *Nuclear Energy and Technology*. 2016, v. 2, iss. 2, pp.147-150.

Authors

Kulikov Gennady Genrikhovich, Leading Engineer

E-mail: ggkulikov@mephi.ru

Kulikov Evgeny Gennad'evich, Senior Lecturer

E-mail: egkulikov@mephi.ru

Shmelev Anatoly Nikolaevich, Professor

E-mail: shmelan@mail.ru

Apse Vladimir Aleksandrovich, Head of the Scientific and Research Sector

E-mail: apseva@mail.ru