

# ВЫЖИГАНИЕ МАЛЫХ АКТИНИДОВ В ВОДО-ВОДЯНЫХ РЕАКТОРАХ. I. МНОГОКРАТНАЯ РЕЦИРКУЛЯЦИЯ МАЛЫХ АКТИНИДОВ НА ПРИМЕРЕ ОДНОГО РЕАКТОРА ВВЭР

**Ю.А. Казанский, Г.В. Карпович**

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ  
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*



Исследуются возможности и условия сжигания в водо-водяном реакторе собственных накапливаемых малых актинидов (МА). Использовалась простейшая расчётная модель – бесконечно протяжённая среда с распределением и составом всех материалов тепловыделяющей сборки активной зоны реактора, аналогичного ВВЭР-1200, с двуокисью урана с начальным обогащением 4,95% по  $^{235}\text{U}$ . Модель выжигания была представлена в виде итераций, каждая из которых моделирует топливную кампанию длительностью четыре года без перегрузок топлива. На старте цикла в специальные твэлы загружаются малые актиниды, извлекаемые из переработанного ОЯТ реактора ВВЭР-1200. После окончания топливной кампании все МА извлекаются из ОЯТ и используются в новой итерации.

В результате расчётов выяснилось, что масса МА в цикле после трёх – семи итераций (в зависимости от количества выделенных твэлов для размещения и накопления МА) стремится к равновесному состоянию (независимо от добавки МА каждые четыре года). Иными словами, выделенные твэлы для загрузки МА играют роль своего рода печи, в которую в каждой итерации загружаются МА из предыдущей итерации, накопленные в данном реакторе. После нескольких итераций превращённая в осколки деления сжигаемая масса МА сравнивается с поступающей. Включение МА указанным способом в топливный цикл превращает минимум 86% МА в осколки деления без ущерба энерговыработке АЭС. Важно, что МА выгружаются из реактора временно после очередной итерации с целью освобождения от осколков деления и для добавления новой порции МА. После прекращения работы реактора выгружается в хранилище около 16% от всего количества наработанных МА за всю историю жизни реактора. Начальный состав топливной композиции в избранных для загрузки МА твэлах отличается от остальных только количеством МА и массой  $^{238}\text{U}$ . Используемая в работе упрощённая расчётная модель (без ежегодных перегрузок реактора) повлияла на глубину выгорания и, естественно, на длительность работы – значение  $k_{\infty} < 1$  становится через 1056 суток вместо реальных 1460 суток с ежегодными перегрузками топлива. Это повлияло на средний состав топлива и, следовательно, на спектр нейтронов, и могло повлиять на основной результат работы – количество выжигаемых МА в разных итерациях. Дополнительные расчёты с учетом ежегодных перегрузок реактора показали, что изменение спектрального состава слабо сказалось на количестве МА в конце топливной кампании (в пределах 2%). Оказалось, что замещение  $^{238}\text{U}$  малыми актинидами в твэлах, количество которых менее десяти,

приводит к потере реактивности. При количестве твэлов для загрузки МА более десяти происходит увеличение реактивности, что позволяет надеяться на выжигание МА, накопленных в нескольких реакторах.

**Ключевые слова:** ВВЭР, малые актиниды, нептуний, америций, кюрий, трансмутация, ядерное топливо, выгорание, замкнутый ядерный топливный цикл.

## ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно, что существенное усложнение (и, естественно, увеличение расходов) получения электроэнергии с использованием ядерной технологии связано с неизбежно высокой радиоактивностью отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). После окончания работы водо-водяного реактора типа ВВЭР-1000 радиоактивность топлива составляет  $9 \cdot 10^{18}$  Бк/тонна (см., например, [1]), что в сотни миллионов раз выше, чем у свежего уранового топлива.

Основной вклад в радиоактивность в первые сотни лет после выгрузки ОЯТ из реактора вносят осколки деления, суммарная радиоактивность урана и плутония составляет около 10%, остальные тяжелые нуклиды – всего лишь несколько процентов.

При хранении ОЯТ происходит снижение его активности в результате радиоактивных превращений ядер. Правда, потребуется не менее 200 тыс. лет, чтобы радиоактивность ОЯТ снизилась до уровня радиоактивности урановой руды, извлечённой из недр для производства ядерного топлива. Кроме того, радиоактивность в хранилищах ОЯТ будет не только уменьшаться за счёт ядерных превращений, но и возрастать за счёт выгрузки из реакторов новых порций ОЯТ. Наконец, соотношения между компонентами выгруженного ОЯТ зависят от сценария топливного цикла и уровня мощности отдельного блока и ядерной энергетики в целом. Можно найти десятки публикаций, связанных с количественными и качественными показателями радиоактивности ОЯТ выгруженного из реактора топлива в зависимости от реализованного топливного цикла. Приведем ссылки на некоторые работы, которые позволят дать краткое описание представлений о радиоактивности ядерной энергетики в зависимости от топливного цикла [2 – 20]. Обычно принимают во внимание следующие составные части ОЯТ – осколки деления (ОД), изотопы урана (основная составляющая ядерного топливного цикла подавляющего большинства ядерных реакторов), изотопы плутония, которые в уран-плутониевом замкнутом топливном цикле и наличии реакторов на быстрых нейтронах могут обеспечить топливными ресурсами планету, как минимум, на тысячелетия, наконец, изотопы нептуния, америция, кюрия, которые называют малыми актинидами (МА).

По имеющимся оценкам [4, 5] в хранилище будет устанавливаться почти стабильный уровень радиоактивности выгружаемого из реактора ОЯТ одновременно с ростом массы выгруженного ОЯТ. В таком приближении оказывается, что в случае замкнутого топливного цикла основными источниками радиоактивности будут ОД и МА, что связано с малым временем нахождения в хранилищах урана и плутония. При реализации замкнутого топливного цикла возможно достичь радиационной эквивалентности – равенства радиоактивности выгруженной из недр Земли и возвращенной в неё в виде долговременных геологических хранилищ [7].

Если ядерная энергетика перестанет работать, то и из реакторов прекратится поступление ОЯТ. Можно предположить, что максимальный срок работы ядерной энергетики около одного – двух тысячелетий (если принять во внимание сегодняшние представления о ресурсах ядерного топлива и о масштабах мирового потребления энергии). Минимальный срок – одно – два столетия (основные возможные причи-

ны – появление новых более эффективных способов получения и использования энергии, смена парадигмы технологического развития и деиндустриализация). Тогда уровень радиоактивности достаточно быстро (сотни лет) снизится на один – два порядка в результате, в основном, радиоактивного распада ОД. И этот уровень будет зависеть от сценария работы ядерной энергетики: наибольший суммарный уровень радиоактивности накопленного ОЯТ будет при открытом топливном цикле, более низкий – при замкнутом топливном цикле по урану и плутонию, и ещё можно снизить уровень радиоактивности ОЯТ, если включить малые актиниды в топливный цикл [4, 5]. Видимо забота о далеком будущем и о «чистоте» ядерной энергетики стали причиной многих исследований по обращению с малыми актинидами [4, 5].

В основе принудительного изменения радиоактивности нестабильных нуклидов используют трансмутацию (изменение состава ядер в результате ядерных реакций под действием нейтронов, что возможно, в принципе, в энергетических реакторах). Идеологии трансмутации и основным её характеристикам была посвящена Международная конференция в Обнинске в 1992 г. [3]. В частности, в докладах этой конференции и в более поздних работах подтверждено, что при облучении МА отмечается рост радиоактивности и затем её спад, скорость которого зависит от времени облучения. За 30 лет облучения в тепловом реакторе радиоактивность спадает примерно в 10 раз, а количество ядер МА снижается примерно в 15 – 25 раз [14, 16].

Трансмутация определенных осколков деления часто обсуждается в научной литературе. Но трансмутация всех осколков деления (повторное размещение в ядерных реакторах) не приводит к заметному снижению радиоактивности [8, 18]. Известны работы, в которых рассматриваются специальные реакторы для выжигания малых актинидов МА [13, 20], в том числе и с использованием в качестве топлива америция. Наконец, есть работы о возможностях утилизации и трансмутации МА в действующих [3, 6, 11, 12, 15, 17, 19] и проектируемых ядерных энергетических реакторах [9, 10].

Результаты исследований представленной работы по своей направленности (использование для выжигания МА действующих и разрабатываемым энергетических реакторов) близки, например, к работам [11, 12, 15, 17, 19]. Основное отличие – это состав выжигаемых тепловыделяющих элементов с МА и замещение обогащённого урана малыми актинидами при условии сохранения уровня производства электроэнергии.

Цель данной работы – подтвердить или опровергнуть возможность выжигания МА в реакторах ВВЭР без ущерба выработке электроэнергии, длительности кампании и расходу ядерного топлива. Данный подход позволяет использовать уже существующие реакторы для решения проблемы накопления МА. Результаты исследований представленной работы по своей направленности (использование для выжигания МА действующих энергетических реакторов) близки, например, к работам [3, 6, 9 – 12]. Основное отличие – это состав выжигаемых тепловыделяющих элементов с МА и замещение обогащённого урана малыми актинидами при условии сохранения уровня производства электроэнергии.

Реализация использования действующих энергетических реакторов создаст сложности при эксплуатации (радиоактивность свежих топливных сборок с малыми актинидами будет существенно превышать радиоактивность топливных сборок ВВЭР). Поэтому надо стремиться сделать минимальное количество реакторов с малыми актинидами. Такие расчёты проведены и результаты будут опубликованы.

### **РАСЧЁТНАЯ МОДЕЛЬ**

Предполагается вводить МА в замкнутый топливный цикл. Моделирование реактора производится в виде одной ТВС. В работе рассматривается топливный цикл, схема которого дана на рис. 1.

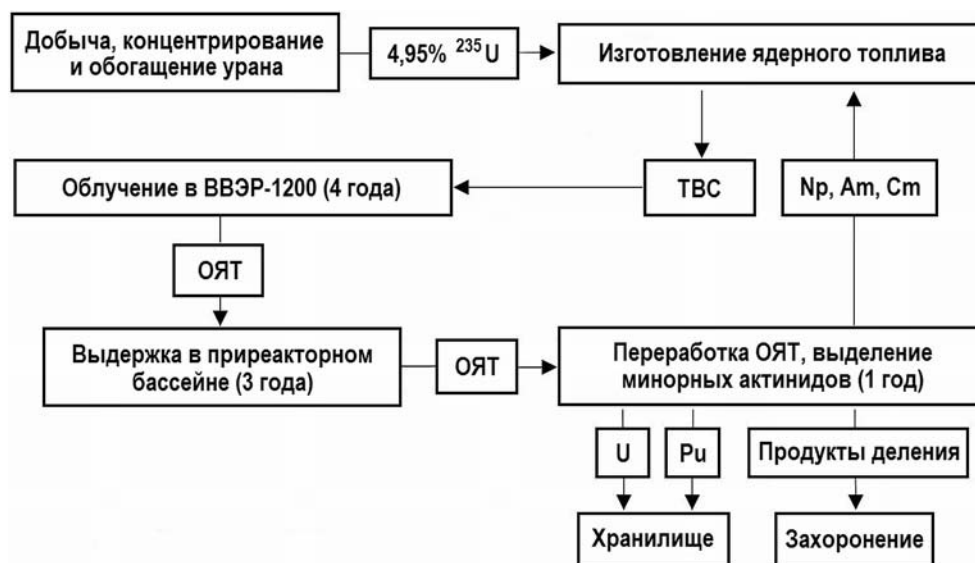


Рис. 1. Схема топливного цикла для реактора на тепловых нейтронах с рециркуляцией малых актинидов

В рамках данного топливного цикла происходит рециркуляция малых актинидов, наработанных в РУ типа ВВЭР-1200: извлеченное ОЯТ выдерживается в бассейне выдержки, после чего направляется на переработку для извлечения Np, Am, Cm. Далее малые актиниды используются в качестве добавки к обогащённому урану, из которого делается свежее ядерное топливо. Срок облучения ядерного топлива – четыре года. Время хранения и переработки ОЯТ в моделируемом топливном цикле также равно четырём годам для удобства расчётов.

Динамика накопления и выгорания тяжелых ядер зависит от геометрии их размещения в активной зоне реактора. Чтобы понять влияние способа размещения МА на результаты их выгорания, замена урана на МА производится в разном количестве твэлов в одной ТВС: 312 (все), 39, 19, 10, 5, 4. Необходимо учитывать, что в одном твэле помещается только 1,5 кг топлива в форме смеси оксидов тяжелых металлов [21].

Расчёт выгорания ядерного топлива производится следующим образом:

- вместо моделирования всей активной зоны ядерного реактора (с использованием ТВС с разной глубиной выгорания) применяется модель одной ТВС реактора типа ВВЭР-1200 из 312 твэлов, размещённой в бесконечной размножающей среде из самой себя (на внешних гранях ТВС установлено зеркальное граничное условие), в этой же модели производится расчёт выгорания на всю топливную кампанию (четыре года);

- для размещения МА используется разное количество твэлов, что позволяет выбрать оптимальное количество твэлов для размещения МА, изучить влияние блокировки сечений МА и, следовательно, темп выжигания малых актинидов;

- нормировка выгорания делается исходя из тепловой мощности реактора ВВЭР-1200 (3220 МВт) в предположении равномерного распределения энерговыделения по ТВС (в таком случае на одну ТВС приходится 19,75 МВт);

- после четырёхлетней кампании (1460 дней облучения) облучения топлива вся масса накопленных МА замещает  $^{238}\text{U}$ .

В расчётах контролировались масса и изотопный состав МА, а также глубина выгорания топлива как с добавкой МА, так и без них, что позволяет оценить влияние МА на неравномерность энерговыделения по сравнению со стандартным топливом.

Расчёты проводились с помощью комплекса нейтронно-физического моделирования Serpent 2.1.30 (VTT, Финляндия) [22] с использованием базы оцененных ядерных данных JEFF 3.1.1, поставляемой производителем комплекса [23].

### ВЫГОРАНИЕ ТОПЛИВА С ФИКСИРОВАННЫМ СТАРТОВЫМ КОЛИЧЕСТВОМ $^{235}\text{U}$ В КАЖДОМ ТВЭЛЕ

Сначала было произведено моделирование выгорания ядерного топлива в случае, когда зафиксировано стартовое количество  $^{235}\text{U}$  в каждом твэле. Первый расчёт с эталонной сборкой с обогащением  $X = 4,95\%$  был принят за нулевую итерацию. В результате выгорания такой ТВС накапливается 776 г малых актинидов (массы основных изотопов:  $^{237}\text{Np}$  – 410 г;  $^{241}\text{Am}$  – 195 г;  $^{243}\text{Am}$  – 118 г;  $^{244}\text{Cm}$  – 47 г;  $^{245}\text{Cm}$  – 4 г). Далее происходит возвращение наработанных малых актинидов в ТВС, номер итерации показывает количество возвратов МА в реактор.

Как видно из результатов расчёта, количество МА в топливном цикле стремится к некоторому значению, после которого достигается динамическое равновесие. Само равновесное количество МА в топливном цикле зависит от количества твэлов, используемых под размещение МА – чем больше выделено твэлов, тем быстрее наступает равновесие и тем меньше загрузка МА в реакторе. Масса топлива в одном твэле составляет 1,5 кг. С учетом данных, представленных на рис. 2, максимальная доля ядер малых актинидов в твэлах, выделенных под их размещение, составляет 26%.

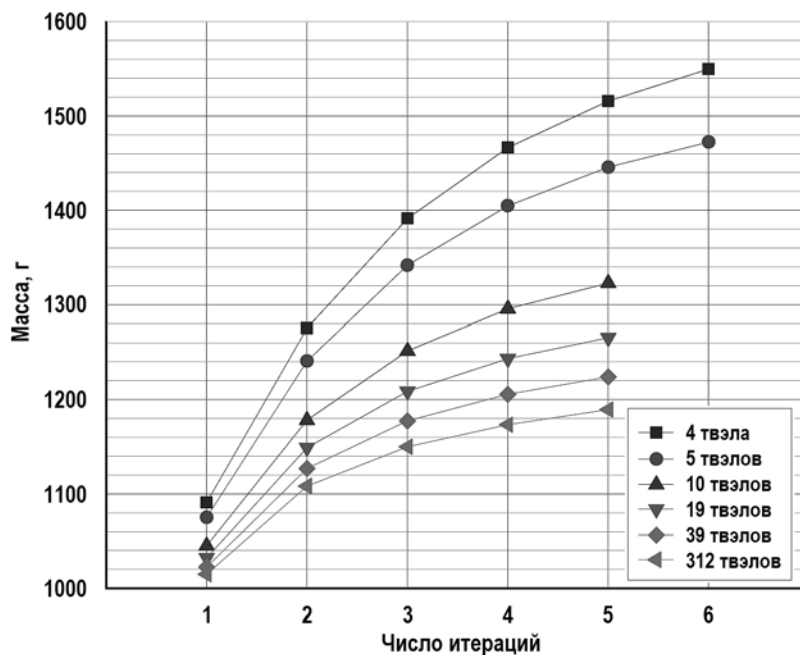


Рис. 2. Зависимость массы малых актинидов в ТВС на конец кампании от количества рециркуляций для разных количеств твэлов, выделенных под размещение МА

Следует отметить, что для каждого изотопа время наступления динамического равновесия различается. Быстрее всего на него выходят  $^{237}\text{Np}$ , Am,  $^{244}\text{Cm}$ . Далее масса малых актинидов обогащается тяжелыми изотопами кюрия, возрастает накопление изотопов калифорния. Плутоний, извлекаемый из топлива с ранее добавленными МА для их выжигания, содержит до 8,5%  $^{238}\text{Pu}$ . Этот изотоп накапливается за счёт радиационного захвата нейтронов  $^{237}\text{Np}$ .  $^{238}\text{Pu}$  характеризуется большим удельным тепловыделением за счёт радиоактивного распада (0,57 Вт/г) и затрудняет обращение с извлеченным из ОЯТ плутонием (особенно при его использовании для

изготовления ядерных боеприпасов). Однако проблема загрязненного плутония на деле не стоит – концентрацию  $^{238}\text{Pu}$  можно легко снизить до 2% и менее за счёт смешения с плутонием из стандартного выгоревшего топлива.

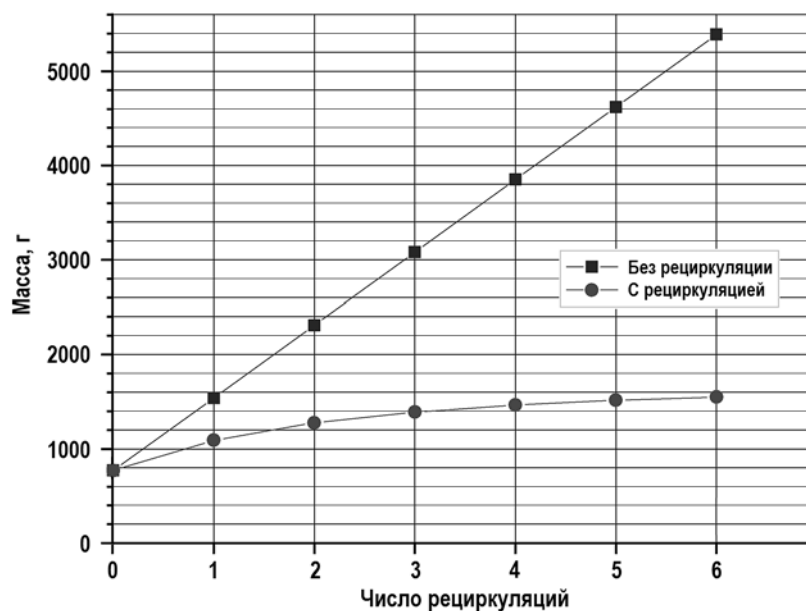


Рис. 3. Сравнение масс МА в топливном цикле при наличии и отсутствии рециркуляции

Но можно ли не делать постоянную рециркуляцию, а ограничиться несколькими возвратами МА в реактор? Сокращение количества рециркуляций позволяет уменьшить объём радиационно опасных работ при организации топливного цикла. Для ответа на этот вопрос необходимо сравнить количество малых актинидов в топливном цикле в двух случаях: когда МА складировались без переработки и когда они возвращаются в реактор после каждой переработки ОЯТ. В случае без рециркуляции считается, что на склад каждый раз поступает постоянное количество малых актинидов, а их распад не учитывается в общей динамике, так как лежащие на складе МА не проходят регулярную очистку от продуктов их радиоактивного распада.

Рисунок 3 показывает, что если организовывать рециркуляцию малых актинидов, то её надо делать постоянно, так как выигрыш в количестве выжигаемых МА растёт с каждым их возвратом в реактор.

За проектное время эксплуатации одного реактора ВВЭР-1200 (60 лет) топливо полностью заменяется 15 раз. Если не производить рециркуляцию МА, то за все время эксплуатации реактор наработает почти 1900 кг малых актинидов. С рециркуляцией (по наихудшему сценарию) это количество уменьшается до 261 кг; таким образом, в осколки деления превращаются 86% МА.

Для выяснения причины роста равновесного количества МА по мере увеличения плотности их размещения необходимо рассчитать среднее соотношение макросечений радиационного захвата и деления всех тяжёлых ядер для топлива с МА первой итерации, когда состав малых актинидов во всех вариантах их размещения является одинаковым. Среднее соотношение рассчитывается по формуле

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \Sigma_c^i}{\sum_{i=1}^n \Sigma_f^i},$$

где  $\Sigma_c^i$  – макросечение радиационного захвата;  $\Sigma_f^i$  – макросечение деления  $i$ -го изотопа.

Таблица 1

**Соотношение макросечений радиационного захвата и деления всех тяжелых ядер для топлива с МА**

Число твэлов с МА, шт.	4	5	10	19	39	78	156	312
Концентрация МА, мас. %	12,78	10,23	5,11	2,69	1,31	0,66	0,33	0,16
$\langle\alpha\rangle$ для топлива с МА	3,39	2,93	1,94	1,40	1,05	0,87	0,77	0,72

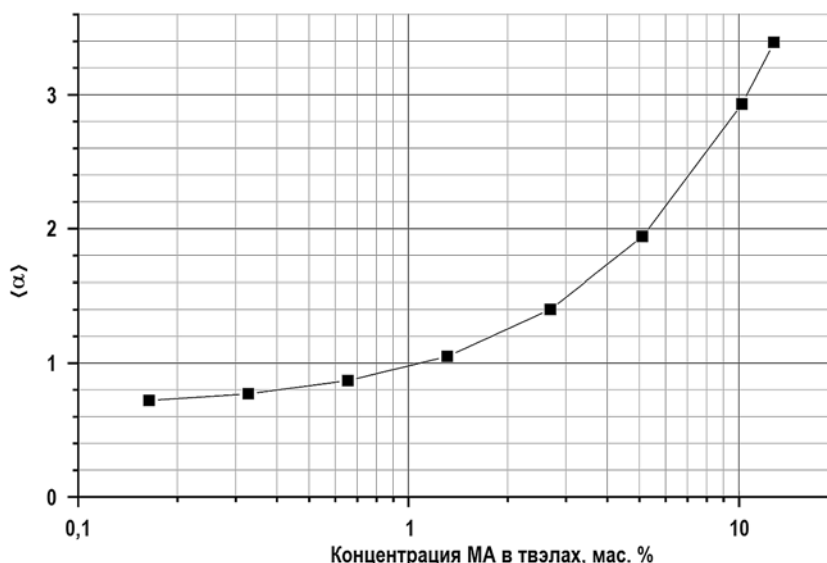


Рис. 4. Соотношение сечений радиационного захвата к делению всех тяжелых ядер для топлива с МА

Для сравнения – для уран-оксидного топлива ВВЭР-1200 с обогащением 4,95% в начале кампании  $\langle\alpha\rangle = 0,67$ .

Как видно из рис. 4, с увеличением концентрации малых актинидов в твэлах, сечения деления блокируются сильнее, нежели сечения радиационного захвата. Поэтому плотное размещение МА в реакторе нецелесообразно с точки зрения скорости их трансмутации в осколки деления, а также соблюдения требуемого запаса реактивности реактора в начале кампании.

Рециркуляция МА не должна приводить к сокращению топливной кампании (и, как следствие, энерговыработки АЭС). Поэтому необходимо рассчитать время выхода ТВС с МА на  $k_{\infty} = 1$  и критичность в конце её топливной кампании, сравнить её с показателями эксплуатируемой ТВС, в которую МА не загружаются ( $T(k_{\infty} = 1) = 1083$  сут).

Таблица 2

**Время выхода ТВС с МА на  $k_{\infty} = 1$**

Число твэлов с МА, шт.	4	5	10	19	39	312
$T(k_{\infty} = 1)$ , сут	1052	1052	1053	1055	1056	1058

Как видно из таблицы, добавление МА в ТВС несколько ухудшает её размножающие свойства –  $k_{\infty}$  опускается до единицы за меньшее время. Это означает, что ТВС с малыми актинидами теряют свой запас реактивности раньше, нежели ТВС без МА. Чтобы понять, нужно ли добавлять дополнительные делящиеся ядра (повышать обогащение урана, добавлять плутоний и т.д.) для поддержания критичности реактора, проверим влияние малых актинидов на реактивность реактора в конце топливной кампании.

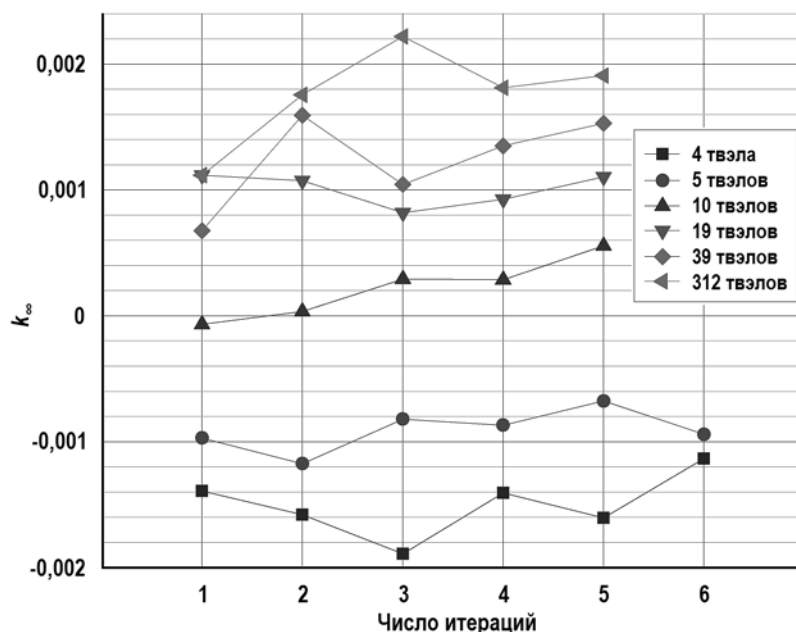


Рис. 5. Влияние малых актинидов на реактивность реактора при различном количестве ТВЭЛов, выделенных для их размещения. Реактивность реактора без МА в конце кампании принята нулевой

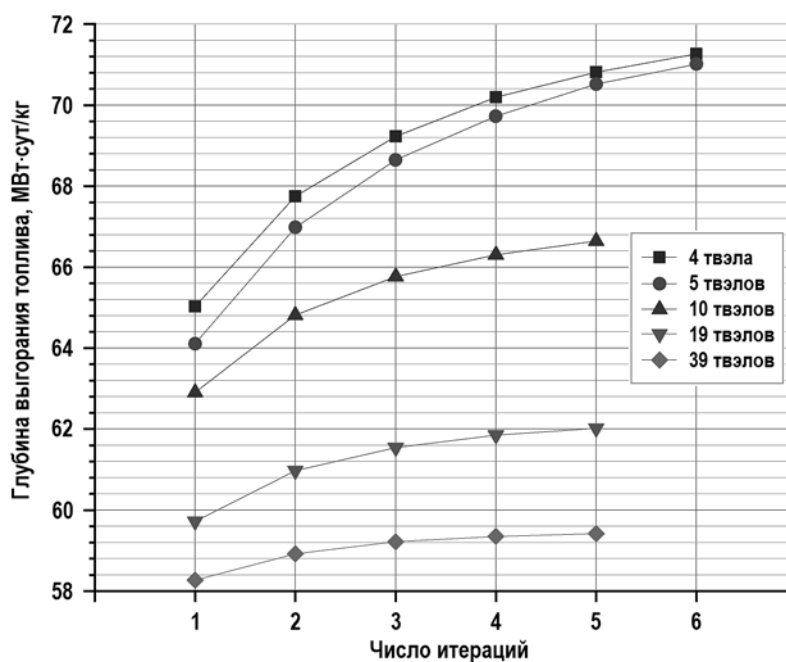


Рис. 6. Зависимость глубины выгорания топлива с добавлением малых актинидов в конце топливной кампании от количества рециркуляций – для разных сценариев размещения МА в ТВС

Рисунок 5 демонстрирует две важные закономерности:

- чем меньше ТВЭЛов выделено под размещение МА, тем меньше  $k_{\infty}$  под конец кампании, что связано с эффектами блокировки сечений тяжелых ядер (сечения деления блокируются сильнее, нежели сечения радиационного захвата);

- для некоторых сценариев  $k_{\infty}$  в конце топливной кампании оказывается больше, чем у ТВС без малых актинидов – этот факт не противоречит прежним выводам



на основании данных из табл. 2, поскольку ТВС с добавлением МА характеризуется меньшим темпом потери реактивности, чем эталонная сборка без миноров за счёт наработки делящихся нуклидов из МА, не способных к делению в тепловом спектре. Это даёт надежду на реализацию топливного цикла с заменой обогащённого урана в начале очередной итерации на малые актиниды.

Следующий важный параметр – глубина выгорания топлива в твэлах, в которые были загружены МА (рис. 6).

Для сравнения – уран-оксидное топливо 4,95% в реакторе ВВЭР-1200 за четыре года выгорает до 57 МВт·сут/кг.

Расчёт глубины выгорания топлива с МА показывает, что при росте концентрации МА в топливе глубина выгорания возрастает. Это объясняется дополнительным вкладом малых актинидов в энерговыделение за счёт деления.

### УЧЁТ СПЕКТРАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ В НАКОПЛЕНИИ МА

Вышеприведённые результаты были получены на модели одной ТВС в бесконечной размножающей среде с расчётом топливной кампании в четыре года. В реальности реактор каждые 1 – 1,5 года останавливается на перегрузку, в ходе которой часть выгоревшего топлива заменяется на свежее. Поэтому ТВС находится в окружении других сборок с разным выгоранием топлива. В итоге спектр нейтронов в модели несколько отличается от спектра нейтронов в реакторе с перегрузками топлива. А различия в спектре неминуемо приводят к разным темпам накопления МА.

Чтобы выяснить влияние перегрузок на спектр нейтронов и, соответственно, на темпы накопления и выгорания МА, был проведен дополнительный расчёт на модели ТВС, имитирующей наличие в реакторе топлива с разной глубиной выгорания.

В проверочной модели ТВС делится на четыре группы твэлов (по 78 штук), в каждую группу загружается топливо с выгораниями, соответствующими 0, 1, 2 и 3 годам нахождения в активной зоне реактора. Твэлы равномерно размещены по ТВС, изотопный состав топлива для каждой группы брался из результатов расчёта четырёхлетнего выгорания ТВС с обогащением 4,95% (без выдержки после облучения). Время облучения – 365 дней, мощность ТВС – 19,75 МВт. Контролируемым показателем была масса МА после выгорания. Для наглядности были сравнены массы МА в топливах с одинаковой глубиной выгорания из разных расчётных моделей.

Таблица 3

**Сравнение масс МА при разных сценариях облучения топлива**

Выгорание, МВт·сут/кг	Масса МА в одной ТВС, г		$\Delta = m_1 - m_4$ , г	$\Delta/m_1$ , %
	$m_4$ (четырёхлетнее выгорание)	$m_1$ (с годовыми перегрузками)		
14	98,8	118,0	19,2	16,3
28	226,0	270,8	44,8	16,5
42	417,2	456,4	39,2	8,6
56	658,4*	670,8	12,4	1,8

\* Отличие от результатов рис. 2 объясняется отсутствием четырёхлетней выдержки в бассейне; часть  $^{241}\text{Pu}$  ( $T_{1/2} = 14,3$  г.) через  $\beta$ -распад превращается в  $^{241}\text{Am}$ , учитываемый в массе МА

Результаты, приведённые в табл. 3, показывают, что влияние спектральной составляющей, создаваемой перегрузками ядерного топлива, на темпы накопления МА составляет не более 2% в конце топливной кампании.

## ВЫВОДЫ

Результаты работы позволяют сделать следующие выводы.

1. Реактор типа ВВЭР способен работать в режиме полной рециркуляции малых актинидов.
2. Постоянная рециркуляция малых актинидов в ВВЭР сопровождается установлением их постоянного количества в цикле за счёт достижения динамического равновесия между скоростями наработки и выгорания.
3. Динамический уровень прямо зависит от того, сколько твэлов в каждой ТВС выделено под размещение МА. Чем больше твэлов (и, соответственно, чем меньше концентрация МА), тем быстрее наступает динамическое равновесие и тем меньше масса МА в цикле. Данный эффект объясняется эффектами блокировки сечений деления тяжелых ядер – чем выше их концентрация в топливе, тем больше отношение средних сечений радиационного захвата к делению.
4. МА являются вторичным ядерным топливом. Высокая концентрация МА в твэлах приводит к высокому удельному энерговыделению (и, соответственно, к более высокой глубине выгорания по сравнению со стандартным уран-оксидным топливом), поэтому при выборе количества выделяемых под рециркуляцию твэлов необходимо учитывать технологические пределы по линейной плотности энерговыделения. В противном случае будут происходить пережог оболочек твэлов, а также кризис теплообмена между топливом и теплоносителем.
5. Однократная рециркуляция малых актинидов не имеет особого смысла, поскольку существенный выигрыш в уменьшении их массы достигается только при достижении динамического равновесия в топливном цикле. Постоянная рециркуляция малых актинидов приводит к уменьшению их остаточной массы минимум на 86%.

## ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

Рассмотренные в статье варианты рециркуляции ограничиваются сценарием, когда реактор ВВЭР «сжигает» собственные МА. На практике это означает размещение на каждом энергоблоке с реактором, аналогичным ВВЭР-1200, специального оборудования для обращения со свежим топливом, содержащим малые актиниды (поскольку такое топливо является намного более активным по гамма- и нейтронному излучению, нежели эксплуатируемое ныне топливо на основе обогащённого урана). Поэтому имеет смысл рассматривать сценарии, когда в одном реакторе ВВЭР утилизируются малые актиниды, созданные в нескольких реакторах (или лежащие сегодня на складах делящихся материалов, извлеченных из переработанного ОЯТ).

## Литература

1. Колобашкин В.В., Рубцов П.М., Ружанский П.А., Сидоренко В.Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 382 с.
2. Use of Fast Reactors for Actinides Transmutation. / Proceedings of the Specialists Meeting held in Obninsk, Russian Federation, Oct. 22-24, 1992. IAEA-TECDOC-693, – IAEA, 1993. – 128 p.
3. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A., Glebov V.B., Tsurikov D.F., Morozov A.G. Radiowaste Transmutation in Nuclear Reactors. IAEA-TECHDOC-693. – IAEA, 1993. – PP. 77-86.
4. Казанский Ю.А., Дудкин А.Н., Клинов Д.А. Временное поведение активности отходов ядерной энергетике при различных сценариях использования топлива. // Сборник научных трудов кафедры РКР «Методы и средства моделирования физических процессов в ядерно-энергетических установках». – Обнинск: ИАТЭ, 1993. – 114 с.
5. Казанский Ю.А., Дудкин А.Н., Клинов Д.А. Трансмутация: мода или необходимость? /

- / Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1993. – № 1. – С. 65-69.
6. Слесарев И.С., Сальваторес М., Уематсу М. Возможность трансмутации в существующих и перспективных ядерных энергетических системах. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1994. – № 1. – С. 22-29.
7. Адамов Е.О., Ганев И.Х., Лопаткин А.Н., Муратов В.Г., Орлов В.В. Степень приближения к радиационной эквивалентности высокоактивных отходов и природного урана в топливном цикле ядерной энергетике. // Атомная энергия. – 1996. – Т. 81. – Вып. 6. – С. 403-409.
8. Казанский Ю.А., Клинов Д.А. Эффективность трансмутации осколков деления. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – № 4. – С. 38-46.
9. Ганев И.Х., Лопаткин А.И., Орлов В.В. Гомогенная трансмутация Am, Cm, Np в активной зоне реактора типа БРЕСТ. // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89. – Вып. 5. – С. 355-361.
10. Ганев И.Х., Лопаткин А.И., Орлов В.В. Гетерогенная трансмутация Am, Cm, Np в активной зоне реактора типа БРЕСТ. // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89. – Вып. 5. – С. 362-365.
11. Бергельсон Б.Р., Герасимов А.С., Тихомиров Г.В. Трансмутация долгоживущих актинидов в энергетических реакторах. // Атомная энергия. – 2003. – Т. 95. – Вып. 4. – С. 295-301.
12. Бергельсон Б.Р., Белоног В.В., Герасимов А.С., Тихомиров Г.В. Утилизация Np, Am, Cm в энергетическом реакторе. // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107. – Вып. 2. – С. 82-86.
13. Хорасанов Г.Л., Блохин А.И. Выжигание младших актинидов в жестких нейтронных спектрах. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 3. – С. 96-103; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2013.3.12>.
14. Казанский Ю.А., Романов М.И. Трансмутация малых актинидов в спектре реактора на тепловых нейтронах. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2014. – № 2. – С. 140-148; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.2.15>
15. Wenchao Hu, Bin Liu, Xiaoping Ouyang, Jing Tu, Fang Liu, Liming Huang, Juan Fu, Haiyan Meng. Minor actinide transmutation on PWR burnable poison rods. // Annals of Nuclear Energy. – 2005. – No. 77. – PP. 74-82; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.10.036>.
16. Казанский Ю.А., Иванов Н.В., Романов М.И. Результаты трансмутации малых актинидов в спектре нейтронов реакторов на тепловых и быстрых нейтронах. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 2. – С. 77-84.
17. Washington J., King J. Optimization of plutonium and minor actinide transmutation in an AP1000 fuel assembly via a genetic search algorithm. // Nuclear Engineering and Design. – 2017. – No. 311. – PP.199-212; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.11.030>.
18. Иванов Н.В., Казанский Ю.А., Карпович Г.В. Результаты трансмутации осколков деления в спектре нейтронов теплового и быстрого реакторов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 2. – С. 118-125; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.2.11>.
19. Wenchao Hu, Jianping Jing, Jinsheng Bi, Chuanqi Zhao, Bin Liu, Xiaoping Ouyang. Minor actinides transmutation on pressurized water reactor burnable poison rods. // Annals of Nuclear Energy. – 2017. – No. 110. – PP. 222-229; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.06.039>.
20. Коробейников В.В., Колесов В.В., Каражелевская Ю.Б., Терехова А.М. Исследования возможности выжигания и трансмутации  $^{241}\text{Am}$  в реакторе с америциевым топливом. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 153-163; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.13>.
21. Faghihi F., Roosta F., Ghaemi S. Bagheri S. Core designing of the newly proposed (U+Gd) $_2$  FAs in the VVERs core and comparison with current UO $_2$  FAs // Alexandria Engineering Journal. – 2019. – No. 58. – PP. 647-658; DOI: <https://doi.org/10.1016/>

j.aej.2019.03.010.

22. *Leppaanen J.* SERPENT – a Continuous Energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. User's Manual. – Espoo. VTT Technical Research Centre of Finland, 2015. – 164 p.

23. *Leppaanen J., Viitanen T.*, Cross Section Libraries for SERPENT 1.1.7. – Espoo. VTT Technical Research Centre of Finland, 2013. – 58 p.

Поступила в редакцию 27.05.2021 г.

#### Авторы

Казанский Юрий Алексеевич, профессор, д-р физ.-мат. наук

E-mail: iu.kazansky@yandex.ru

Карпович Глеб Владиславович, преподаватель

E-mail: gleb.karpovich@yandex.ru

UDC: 621.039.516.4

## MINOR ACTINIDES TRANSMUTATION IN PRESSURIZED WATER REACTORS. 1. MULTIPLE RECYCLING OF MINOR ACTINIDES ON THE EXAMPLE OF ONE VVER REACTOR

Kazansky Yu. A., Karpovich G. V.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, NRNU MEPhI

1 Stugorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

#### ABSTRACT

This article explores the possibilities and conditions of combustion in a pressurized water reactor of its own accumulated minor actinides (MA). The simplest computational model is used: an infinitely extended medium with the distribution and composition of all materials of the fuel assembly of the reactor core, similar to VVER-1200, with uranium dioxide having an initial  $^{235}\text{U}$  enrichment of 4.95%. The burnup model is presented in the form of iterations, each of which simulates a fuel campaign lasting 4 years without refueling. At the start of the cycle, special fuel rods are loaded with minor actinides extracted from the reprocessed SNF of the VVER-1200 reactor. After the end of the fuel campaign, all the MAs are removed from the SNF and used in a new iteration.

As a result of calculations, it was found that the MA mass in the cycle after 3–7 iterations (depending on the number of fuel elements allocated for the placement and accumulation of MAs) tends to an equilibrium state (regardless of the MAs added every 4 years). In other words, the fuel rods allocated for loading MAs play the role of a kind of furnace, into which, in each iteration, MAs from the previous iteration accumulated in the given reactor are loaded. After several iterations, the burned MA mass converted into fission products is compared with the incoming one. The inclusion of MAs in this way into the fuel cycle converts at least 86% of MAs into fission products without affecting the power generation of the nuclear power plant. It is important that MAs are temporarily unloaded from the reactor after the next iteration in order to remove fission products and to add a new portion of MAs. After stopping the reactor operation, about 16% of the total amount of MAs generated for the entire history of the reactor's life is discharged into the storage facility. The initial fuel composition in the fuel rods allocated for loading MAs differs from the others only in the amount of MAs and the mass of  $^{238}\text{U}$ . The simplified computational model used in this work (without annual

overloads of the reactor) influenced the burnup depth and, naturally, the duration of operation, i.e., the  $k_{\infty}$  value becomes less than 1 after 1056 days instead of the actual 1460 days with annual fuel overloads. This affected the average fuel composition and, consequently, the neutron spectrum, and could affect the main result of the work, i.e., the number of burned-out MAs in different iterations. Additional calculations, taking into account the annual overloads of the reactor, showed that the change in the spectral composition had little effect on the amount of MAs at the end of the fuel campaign (within 2%). It turned out that the replacement of  $^{238}\text{U}$  with minor actinides in fuel rods, the number of which is less than 10, leads to a loss of reactivity. When the number of fuel rods for loading MAs is more than 10, the reactivity increases, giving hope for burning up MAs accumulated in several reactors.

**Key words:** VVER, minor actinides, neptunium, americium, curium, transmutation, nuclear fuel, burnup, closed fuel cycle.

## REFERENCES

1. Kolobashkin V. V., Rubtsov P.M., Ruzhansky P.A., Sidorenko V.D. *Radiation Characteristics of Irradiated Nuclear Fuel. Handbook*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1983, 382 p. (in Russian).
2. Use of Fast Reactors for Actinides Transmutation. *Proc. of the Specialists Meeting held in Obninsk, Russian Federation, Oct. 22-24, 1992. IAEA-TECDOC-693*. IAEA, 1993, 128 p.
3. Shmelev A.N., Kulikov G.G., Apse V.A., Glebov V.B., Tsurikov D.F., Morozov A.G. Radiowaste transmutation in nuclear reactors. *IAEA-TECHDOC-693*. IAEA, 1993, pp. 77-86.
4. Kazansky Yu.A., Dudkin A.N., Klinov D.A. Temporary behavior of nuclear waste activity under different scenarios of fuel use. *Collection of Scientific Papers of the Reactor Construction Department «Methods and Tools for Modeling Physical Processes in Nuclear Power Plants»*. Obninsk. IATE Publ., 1993, 114 p. (in Russian).
5. Kazansky Yu.A., Dudkin A.N., Klinov D.A. Transmutation: Fashion or Necessity? *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 1993, no. 1, pp. 65-69 (in Russian).
6. Slesarev I.S., Salvatores M., Uematsu M. Possibility of Transmutation in Existing and Prospective Nuclear Power Systems. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 1994, no. 1, pp. 22-29 (in Russian).
7. Adamov E.O., Ganev I.Kh., Lopatkin A.N., Muratov V.G., Orlov V.V. The Degree of Approach to the Radiation Equivalence of High-Level Waste and Natural Uranium in the Fuel Cycle of Nuclear Power. *Atomnaya Energiya*. 1996, v. 81, iss. 6, pp. 403-409 (in Russian).
8. Kazansky Yu.A., Klinov D.A. Efficiency of Transmutation of Fission Products. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2000, no. 4, pp. 38-46 (in Russian).
9. Ganev I.Kh., Lopatkin A.I., Orlov V.V. Homogeneous Transmutation of Am, Cm, Np in the Core of a BREST-type Reactor. *Atomnaya Energiya*. 2000, v. 89, iss. 5, pp. 355-361 (in Russian).
10. Ganev I.Kh., Lopatkin A.I., Orlov V.V. Heterogeneous Transmutation of Am, Cm, Np in the Core of a BREST-type Reactor. *Atomnaya Energiya*. 2000, v. 89, iss. 5, pp. 362-365 (in Russian).
11. Bergelson B.R., Gerasimov A.S., Tikhomirov G.V. Transmutation of Long-Lived Actinides in Power Reactors. *Atomnaya Energiya*. 2003, v. 95, iss. 4, pp. 295-301 (in Russian).
12. Bergelson B.R., Belonog V.V., Gerasimov A.S., Tikhomirov G.V. Utilization of Np, Am, Cm in a Power Reactor. *Atomnaya Energiya*. 2009, v. 107, iss. 2, pp. 82-86 (in Russian).
13. Khorasanov G.L., Blokhin A.I. Burnout of minor actinides in fast neutron spectra. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 3, pp. 96-103; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2013.3.12> (in Russian).

14. Kazansky Yu.A., Romanov M.I. Transmutation of small actinides in the spectrum of a thermal neutron reactor. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2014, no. 2, pp.140-148; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2014.2.15> (in Russian).
15. Wenchao Hu, Bin Liu, Xiaoping Ouyang, Jing Tu, Fang Liu, Liming Huang, Juan Fu, Haiyan Meng. Minor Actinide Transmutation on PWR Burnable Poison Rods. *Annals of Nuclear Energy*. 2005, no. 77, pp. 74-82; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.10.036>.
16. Kazansky Yu.A., Ivanov N.V., Romanov M.I. Results of Transmutation of Small Actinides in the Neutron Spectrum of Thermal and Fast Neutron Reactors. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 2, pp. 77-84 (in Russian).
17. Washington J., King J. Optimization of Plutonium and Minor Actinide Transmutation in an AP1000 Fuel Assembly via a Genetic Search Algorithm. *Nuclear Engineering and Design*. 2017, no. 311, pp. 199-212; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.11.030>.
18. Ivanov N.V., Kazansky Yu.A., Karpovich G.W. Results of Transmutation of Fission Products in the Neutron Spectrum of Thermal and Fast Reactors. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2017, no. 2, pp. 118-125; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.2.11> (in Russian).
19. Wenchao Hu, Jianping Jing, Jinsheng Bi, Chuanqi Zhao, Bin Liu, Xiaoping Ouyang. Minor Actinides Transmutation on Pressurized Water Reactor Burnable Poison Rods. *Annals of Nuclear Energy*. 2017, no.110, pp. 222-229; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.06.039>.
20. Korobeynikov V.V., Kolesov V.V., Karazhelevskaya Yu.B., Terekhova A.M. Investigation of the Possibility of Burning and Transmutation of  $^{241}\text{Am}$  in a Reactor with Americium Fuel. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 2, pp. 153-163 DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.13> (in Russian).
21. Faghihi F., Roosta F., Ghaemi S. Bagheri S. Core Designing of the Newly Proposed (U+Gd) $_2\text{O}_7$  FAs in the VVERs Core and Comparison with Current  $\text{UO}_2$  FAs. *Alexandria Engineering Journal*. 2019, no. 58, pp. 647-658; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.03.010>.
22. Leppaanen J. *SERPENT – a Continuous Energy Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code. User's Manual*. Espoo. VTT Technical Research Centre of Finland, 2015, 164 p.
23. Leppaanen J., Viitanen T. *Cross Section Libraries for SERPENT 1.1.7*. Espoo. VTT Technical Research Centre of Finland, 2013, 58 p.

#### Authors

Kazansky Yury Alekseyevich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: [iu.kazansky@yandex.ru](mailto:iu.kazansky@yandex.ru)

Karpovich Gleb Vladislavovich, Lecturer

E-mail: [gleb.karpovich@yandex.ru](mailto:gleb.karpovich@yandex.ru)