

О ВЫЖИГАНИИ АМЕРИЦИЯ В РЕАКТОРЕ ТИПА БН-1200М

Гулевич А.В., Гурская О.С., Декусар В.М., Елисеев В.А., Зарапина Э.М.,
Троянов В.М. (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ», г. Обнинск, Россия)

Введение

Америций (главным образом – это пороговый изотоп ^{241}Am), традиционно относят к наиболее опасным минорным актинидам, неизбежно присутствующим в отработавшем ядерном топливе (ОЯТ) [1–4]. В основном он образуется при распаде изотопа ^{241}Pu . ^{241}Am имеет период полураспада 432,2 года и отличается высокой радиоактивностью и заметным (~ 115 Вт/кг) удельным тепловыделением. Под облучением нейтронами он трансмутирует в опять же пороговый изотоп ^{242}Cm . Последний отличается чрезвычайно высоким тепловыделением (120 кВт/кг) и, в свою очередь, под облучением трансмутирует в делящийся ^{243}Cm . Изотопы кюрия, имеющие в основном короткие периоды полураспада, следует хранить. Спустя сравнительно небольшое время они распадаются в изотопы плутония, которые можно будет добавить в топливо.

Изотопы америция и кюрия химически близки к ряду продуктов деления и выделяются вместе с ними, практически реализованных промышленных технологий выделения америция и кюрия пока не существует. После выделения плутония и распада кюрия радио- и химическую активность ОЯТ на протяжении многих тысяч лет будет определять именно америций. Поэтому настоящая работа посвящена выжиганию только америция, при этом рассматриваются следующие основные способы его трансмутации в быстрых натриевых реакторах [1, 5–11]:

- гомогенная трансмутация в топливе;
- гетерогенное выжигание в специальных сборках без замедлителя в боковом экране (БЭ);
- гетерогенное выжигание в специальных сборках с замедлителем в БЭ.

Нейтронно-физические аспекты выжигания америция

При первом способе выжигания америция возникает проблема крайне высокого тепловыделения продуктов его трансмутации, что существенно ограничивает возможности гомогенного выжигания, поскольку увеличение допустимого остаточного тепловыделения выгружаемых ТВС в тракте выгрузки далеко не всегда возможно. Например, в БН-800 из-за сравнительно короткой выдержки отработавших ТВС во внутриреакторном хранилище, обусловленной его проектной емкостью, возможности трансмутации внешнего америция в активной зоне вообще исключены. Более того, даже использование в реакторе БН-800 плутония с высоким содержанием ^{241}Pu (более 13 %) может приводить к превышению проектных пределов по остаточному тепловыделению, поскольку америций в любом случае будет образовываться в активной зоне.

В реакторе типа БН-1200М [7, 8] ситуация несколько проще: из-за двухлетней выдержки ОЯТ во внутриреакторном хранилище большая часть ^{242}Cm успевает распасться, поэтому в этом реакторе гомогенное выжигание америция возможно. Следует также отметить, что гетерогенное выжигание америция (в концентрированном виде) в ограниченном количестве сборок активной зоны следует признать нереализуемым именно из-за многократного роста остаточного тепловыделения в них.

Второй способ предполагает гетерогенное выжигание америция в облучательных устройствах (ОУ) без замедлителя в БЭ. Чтобы в этом случае вписаться в проектные ограничения по мощности ОУ, добавка америция в материал бокового экрана должна быть небольшой. Соответственно, небольшим будет и объем трансмутации.

Высокое остаточное тепловыделение ОЯТ с америцием – не единственная проблема этого способа. За одну кампанию трансмутирует не более 1/3 загруженного америция, а превращается в продукты деления еще меньше ~10%. Оставшийся америций надо выделять из ОЯТ и трансмутировать повторно (обременение). Поэтому фактически количество америция, которое необходимо трансмутировать, возрастает, что приводит к неизбежному росту экономических затрат и безвозвратных потерь.

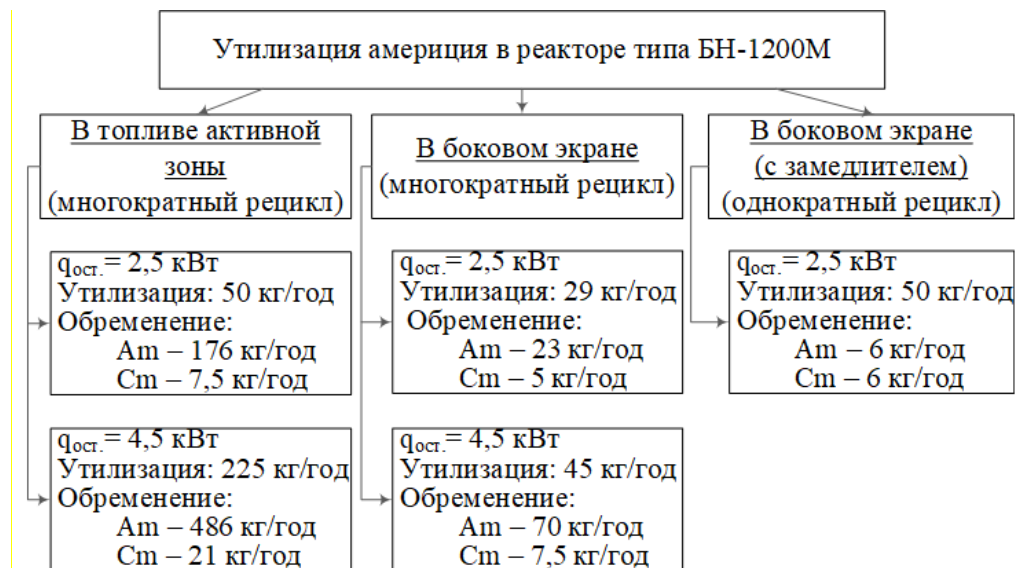
Третий способ – выжигание в БЭ в ОУ с замедлителем [10] – позволяет исключить как проблему высокого остаточного тепловыделения выгружаемых ТВС, так и необходимость многократного рециклирования больших количеств америция. В этом способе также не используется прямое деление ^{241}Am быстрыми нейтронами. Здесь используется высокий (свойственный быстрому реактору) нейтронный поток и большие (свойственные тепловому реактору) нейтронные сечения, т.е. объединяются достоинства быстрого и теплового реакторов.

В процессе последовательных захватов из ^{241}Am образуются делящиеся в тепловом спектре изотопы (например, ^{242}Am , ^{244}Am , ^{243}Cm , ^{245}Cm). В результате за одну кампанию бокового экрана глубина трансмутации америция достигает 95 %, и ~75 % его первоначальной загрузки превращается в продукты деления, а оставшиеся ~25 % будут состоять в основном из пороговых изотопов плутония (^{240}Pu и ^{242}Pu) и изотопа кюрия (^{244}Cm). Плутоний после выделения может быть направлен в топливо, так же, как и плутоний, образовавшийся из ^{244}Cm после его хранения. Недостатком такого способа является повышенный расход нейтронов, поскольку на деление одного ядра америция требуется уже не один, а 2–3 нейтрона. Возможность увеличения производительности такого способа ограничивается уже не остаточным тепловыделением, а дефицитом нейтронов.

На рисунке проиллюстрированы описанные выше способы выжигания америция в реакторе типа БН-1200М. Показаны два варианта тракта реактора: допускающего остаточное тепловыделение выгружаемых ТВС $q_{\text{ост.}}=2,5$ кВт (обоснованная величина в сегодняшнем проекте) и $q_{\text{ост.}}=4,5$ кВт (для специализированного реактора-выжигателя конструкция тракта выгрузки должна быть модернизирована для такого тепловыделения). «Обременением» здесь является количество америция, которое остается после однократного выжигания и которое необходимо выделять, загружать в топливо и трансмутировать повторно. Кроме того, показано накопление кюрия, который требует специального обращения.

Из данных рисунка видно, что в топливе активной зоны этого реактора можно трансмутировать до 50 кг америция в год, что несколько больше количества собственного америция, образующегося при эксплуатации самого реактора и в его топливном цикле. Но расплатой за такой объем будет необходимость рециклирования еще ~175 кг Am/год и необходимость длительного хранения кюрия, образующегося в количестве ~8 кг/год. Точно такой же объем трансмутации можно получить в боковом экране с замедлителем, но объем «обременения» по америцию и кюрию составит всего по 6 кг, кроме того, в осколки превратится до 70% трансмутировавшего Am.

Если допустить возможность увеличения проектных ограничений по остаточному тепловыделению до 4,5 кВт, то существенно увеличатся годовые объемы трансмутации, но увеличится и количество рециклируемого америция со всеми вытекающими последствиями.



Зависимость объема выжигания америция от способа и проектных ограничений

Исходные данные для технико-экономической модели

Выполнение экономических оценок выжигания америция затруднено вследствие отсутствия достоверных стоимостных данных по дополнительным затратам, связанным с его выжиганием. Необходимость дополнительных затрат по всем статьям расходов – инвестиционным, эксплуатационным и топливным – не вызывает сомнений. Однако можно полагать, что главные дополнительные расходы будут иметь место по статье «топливные затраты», в то время как остальные статьи изменятся в сторону увеличения в пределах 1–2%. Поэтому дальнейшее рассмотрение технико-экономической эффективности трансмутации америция проведено через призму только топливных расходов. При этом рост капитальных и эксплуатационных затрат в данной работе не учитывался.

Топливные затраты однозначно связаны с удельными стоимостями на переделы топливного цикла. Определяющее значение для технико-экономической оценки эффективности реакторного выжигания америция имеет стоимость тепловыделяющих сборок или ОУ, содержащих америций.

В настоящее время достоверные данные по стоимостям имеются только для урановых ТВС тепловых реакторов, которые, естественно, не содержат америций. При этом реальная цена, по которой реализуются такие ТВС на рынке, во всем мире представляет коммерческую тайну производителей топлива и его покупателей. Поэтому имеющиеся в открытой литературе стоимости представляют собой, как правило, экспертные оценки, полученные по косвенным данным. Приводимые ниже оценки относятся к оксидному таблеточному топливу.

По оценкам зарубежных специалистов, удельная стоимость фабрикации урановых ТВС для легководных реакторов (в расчете на 1 кг тяж. мет.) составляет около 300 US\$/кг тяж. мет. По этим же оценкам стоимость изготовления ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом для легководных реакторов превышает стоимость изготовления урановых ТВС примерно в 5 раз, а для быстрых реакторов – еще не менее, чем в 2 раза. Таким образом, удельная стоимость изготовления ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом для быстрых реакторов (~3000 US\$/кг) на порядок превышает стоимость изготовления уранового топлива для тепловых реакторов.

Возможными технологиями изготовления оксидного топлива с добавкой америция могут быть таблеточная технология, применяемая при изготовлении обычного оксидного

топлива без минорных актинидов, либо технология виброуплотнения [4] при ее обосновании. Весьма перспективным выглядит также использование металлического топлива с америцием. Используемые при этом металлургические операции, такие как экструзия топливного сердечника, могут значительно снизить стоимость изготовления такого топлива, к тому же они лучше приспособлены к неизбежной автоматизации технологических процессов при вовлечении в топливо минорных актинидов.

Высокое энерговыделение, значительные γ и нейтронная активности по сравнению с топливом на основе урана или плутония – все это требует особого внимания при изготовлении и переработке топлива с добавкой америция.

Важным вопросом, требующим конструкторско-технологической проработки, является технология изготовления и переработки (при необходимости) ОУ для гетерогенного выжигания америция в боковом экране (как с замедлителем, так и без него).

Стандартная промышленная практика изготовления топлива из низкофонового плутония с использованием герметичных перчаточных боксов с локальной защитой вряд ли будет применимой. Можно полагать, что операции по фабрикации и репроцессингу топлива/облучательных устройств со значительным содержанием америция должны проводиться дистанционно в горячих камерах с высоким уровнем автоматизации (роботизации), предназначенных как для работы в эксплуатационных режимах, так и при ремонтах и замене оборудования [12].

Влияние добавки америция в топливо быстрых реакторов на стоимость изготовления такого топлива достоверно неизвестно. Поскольку рассматриваемые технологии находятся на опытно-демонстрационном уровне, информация о стоимости переработки и рефабрикации такого топлива, которую можно найти в открытой литературе, имеет значительные разбросы, а также тенденцию к увеличению в силу все возрастающих требований по безопасности и не до конца проработанных технологий [12]. Вследствие этого, а также малотоннажности производства, стоимость изготовления такого топлива должна быть больше, чем при фабрикации топлива без америция.

По данным работы [12], верхняя оценка стоимости изготовления металлического топлива для быстрого реактора, содержащего америций для гомогенного выжигания, составит до 7500 US\$/кг при производительности порядка 50—70 т тяж. мет./год. По-видимому, стоимость изготовления оксидного таблеточного топлива с америцием (с учетом его более сложной технологии изготовления и летучести оксида америция) будет еще больше. Поэтому для оксидного топлива это значение можно принять за номинал. Переход к изготовлению ОУ и выжигательных сборок для гетерогенного выжигания может привести к возрастанию затрат на их изготовление по меньшей мере еще вдвое.

Отметим, что в литературе не удалось найти сведений о том, к какому содержанию америция в топливе/облучательных устройствах относятся стоимостные показатели фабрикации/репроцессинга. Вместе с тем, в литературе при обсуждении гомогенного выжигания обычно указывается его содержание не более 5% от суммы тяжелых атомов топлива.

При рассмотрении технико-экономических показателей была принята следующая ценовая модель:

1. Использовались два варианта цен: а) рекомендованное в [2] значение стоимости фабрикации ТВС со смешанным уран-плутониевым топливом для быстрых реакторов 3500 US\$/кг тяж. мет. и б) более оптимистичное значение в 2000 US\$/кг тяж. мет., оцененное с учетом значительного коридора неопределенностей в работе [2] и близкое к принятому в проекте Прорыв. Эти цены соответствуют «чистому» топливу, не содержащему «внешний» америций.

2. Значения цен фабрикации и переработки ТВС с америцием принимались экспертно. При этом допускалось, что содержание америция вплоть до 1 % от массы тяжелого металла не увеличивает их стоимость изготовления по сравнению с «чистыми» ТВС.

3. Добавка 5% Am приводит к возрастанию стоимости фабрикации в варианте а) до 7500 US\$/кг тяж. мет., в варианте б) до 4000 US\$/кг тяж. мет.

4. Аналогично, стоимость переработки ОЯТ без америция составит 800 US\$/кг тяж. мет., содержащего 5% Am – 1500 US\$/кг тяж. мет.

5. Для других содержаний америция стоимость фабрикации и переработки определялась линейной интерполяцией.

6. Зависимость остальных составляющих топливных затрат (транспортировка, хранение и пр.) от содержания америция не учитывалась.

7. Как было указано выше, зависимость капитальных и эксплуатационных затрат энергоблоков от содержания америция не учитывалась.

Важно подчеркнуть, что методология определения цен для всех рассмотренных опций выжигания америция была полностью идентична.

Все эти данные должны актуализироваться по мере поступления информации. Все цены указаны в долларах США 2020 г. с учетом среднегодового курса 1\$ = 72 руб.

Оценка материальных потоков и балансов

В таблице 1 представлены данные по ежегодной загрузке и выгрузке минорных актинидов при гомогенном выжигании Am в ТВС активной зоны при его различном содержании. Отметим, что равновесное содержание Am в топливе активной зоны для рассматриваемого варианта реактора типа БН-1200М составляет около 0,9% от суммы тяжелых атомов топлива.

Таблица 1

Балансы ежегодно загружаемого и выгружаемого америция, кг тяж. мет.

Топливо		Am	Cm
0% («чистое» топливо)	загружено *	6,7	0,0
	выгружено	37,4	1,3
	Δ^{**}	30,7	1,3
0,9% (равновесное содержание Am)	загружено	79,4	0,0
	выгружено	79,4	3,6
	Δ^{**}	0,0	3,6
2% Am	загружено	175,0	0,0
	выгружено	140,0	6,2
	Δ^{**}	–35,0	6,2
3% Am	загружено	265,8	0,0
	выгружено	202,5	8,6
	Δ^{**}	–63,4	8,6
5% Am	загружено	432,3	0,0
	выгружено	311,2	13,0
	Δ^{**}	–121,1	13,0
* «чистое» топливо содержит америций, образовавшийся за счет распада ^{241}Pu при хранении и обращении с ним; ** Δ – разница между выгруженным и загруженным количеством Am, кг тяж. мет.			

В таблице 2 представлены данные для гетерогенного выжигания америция с замедлителем в БЭ быстрого реактора. При этом рассматривалась только «чистая» активная зона (америций в топливе образуется только вследствие распада ^{241}Pu) или активная зона с внешним америцием в количестве, соответствующем равновесному его

содержанию. Поскольку в данном случае минорные актиниды в инертной матрице (без урана) загружаются в ОУ, располагаемые в первом ряду бокового экрана, в табл. 2 указано не процентное содержание минорных актинидов, а их абсолютная годовая загрузка.

Таблица 2

**Балансы ежегодно загружаемых и выгружаемых минорных актинидов
в облучательных устройствах БЭ, кг тяж. мет.**

Топливо		Am	Cm
Загрузка 27,9 кг/год	загружено	27,9	0,0
	выгружено	1,6	3,01
	Δ^*	-26,3	3,01
Загрузка 55,6 кг/год	загружено	55,6	0,0
	выгружено	6,1	5,85
	Δ^*	-49,5	5,85
* Δ – разница между выгруженным и загруженным количеством минорных актинидов, кг тяж. мет.			

При этом в варианте с «чистой» активной зоной (без дополнительного америция) ежегодно нарабатывается 30,7 кг америция, суммарное фактическое выжигание этого актинида в ОУ с замедлителем (при годовой загрузке в них 55,6 кг америция) составит лишь 18,8 кг/год. При уменьшении загрузки америция в ОУ до 27,9 кг/год объем выжигания становится меньше объема его образования, поэтому в реакторе вместо выжигания будет происходить наработка америция.

Для варианта с равновесным америцием в активной зоне и ОУ с замедлителем в БЭ ситуация другая. Поскольку дополнительной наработки америция в активной зоне в этом случае нет, то при загрузке в ОУ 27,9 кг Am/год в реакторе происходит его выжигание в объеме 26,3 кг/год. При увеличении загрузки америция в боковой экран до 55,6 кг/год масса ежегодно выжигаемого америция увеличивается до 49,5 кг. «Платой» за такое повышение эффективности является необходимость постоянного рецикла собственного америция в топливе активной зоны.

Оценка миссии по выжиганию америция от тепловых реакторов

Оценим стоимость миссии по выжиганию 33 тонн америция, который будет накоплен в ОЯТ российских тепловых реакторов к 2035 году [3], с использованием гомогенного и гетерогенного способов трансмутации в реакторе типа БН-1200М.

В таблице 3 сведены результаты технико-экономического анализа данной миссии для обоих вариантов уровней цен (а и б), описанных выше. В расчетах было принято, что безвозвратные потери америция при изготовлении топлива и переработке ОЯТ составляют 0,1%.

Эффективность трансмутации определена, как отношение массы трансмутировавшего америция в процессе очередной микрокампании к массе америция, загруженного перед началом этой микрокампании. Эта величина хорошо иллюстрирует наличие «обременения», которое состоит в том, что по физическим ограничениям мы не можем трансмутировать весь загруженный америций за один проход через активную зону, а вынуждены извлекать непротрансмутировавший америций из ОЯТ быстрого реактора, перерабатывать, а затем снова запускать в топливо на трансмутацию.

Под общим количеством трансмутировавшего америция за всю миссию выжигания 33 т америция понимается произведение ежегодной загрузки америция на количество реакторо-лет, требующихся для выполнения этой миссии. Тогда количество собственного америция, т.е. уже наработанного в быстром реакторе и выжженного там же, будет разностью между общим количеством америция и 33 т внешнего америция.

Чтобы исключить противоречия между табл. 1 и 2 (в табл. 1 количество Am указано в %, в табл. 2 – в кг/год), в табл. 3 количество Am указывается также в кг/год. Заметим, что «чистое» топливо в любом случае содержит америций (не более 0,1% тяж. мет.), образовавшийся из ^{241}Pu за время логистики и хранения.

Таблица 3

Технические оценки эффективности миссии по выжиганию 33 т Am

Параметр	Гомогенное выжигание в а.з.					Гомогенное в а.з./ гетерогенное в БЭ	
Загрузка Am, кг/год	79,4	175,2	265,8	432,3	711,0	62,3* 6,7 / 55,6	135** 79,4 / 55,6
Выгрузка Am, кг/год	79,4	140,0	202,4	311,2	486,0	43,5 37,4 / 6,1	85,5 79,4 / 6,1
Эффективность трансмутации, отн. ед.	0,0	0,20	0,24	0,28	0,32	0,30 (-) в а.з.***/ 0,89 в БЭ	0,37 0,0 в а.з./ 0,89 в БЭ
Am общий/ собственный, т	выжи- гание внеш- него Am невоз- можно	165 / 132	137 / 104	118 / 85	104 / 71	109 / 76	90 / 57
Период миссии, реакторo-лет		943	515	273	147	1755	667
Общая стоимость миссии (а/б), млрд \$		19,8 / 11,8	21,4 / 12,1	23,4 / 13,1	24,0 / 13,2	15,0 / 5,9	5,7 / 2,3
Удельная стоимость выжигания (а/б), млн \$/кг Am		0,60 / 0,36	0,65 / 0,37	0,71 / 0,40	0,73 / 0,40	0,45 / 0,18	0,17 / 0,07
Увеличение ТСС одного блока (а/б), коп./кВт·ч		16/9	31/18	65/41	122/67	9/4	6/3
*Чистое топливо (содержит Am, образовавшийся за время логистики и хранения)							
**Топливо, содержащее америций в равновесном количестве							
***Трансмутация отсутствует, имеет место фактическая наработка							

Из представленных данных видно, что привлекательной оказывается гетерогенная трансмутация с замедлителем в боковом экране: ~0,9 кг трансмутировавшего за один «проход» америция на 1 кг загруженного, при этом «обременение» составляет ~10% от количества загруженного Am и не требует немедленной переработки. После выдержки 70–100 лет основная часть кюрия превратится в изотопы плутония, а суммарная активность оставшихся америция и кюрия снизится в несколько раз относительно исходной.

Отметим, что при гомогенном выжигании эффективность трансмутации для рассмотренных вариантов (от 2% до практически нереализуемых 8,5% Am) составляет 0,20–0,32, что означает необходимость 3–4 оборотов этого америция в топливном цикле реактора. По сути, для выжигания 33 т Am необходимо рециклировать через активную зону не 33 т, а от 105 до 165 т Am! Кроме того, чем меньше содержание Am превышает его равновесное значение, тем менее эффективно осуществляется его выжигание: в пределе – при равновесном его содержании — выжигания внешнего америция вообще не происходит. Это проявляется в увеличении временных затрат на выполнение данной миссии.

Наиболее эффективным является вариант, когда совмещается гомогенная трансмутация «собственного» америция при равновесном его содержании в активной

зоне и гетерогенная трансмутация «внешнего» Am в боковом экране в ОУ с замедлителем. Эффективность такого комбинированного способа составляет максимальную величину среди рассмотренных вариантов – 0,37, а общее количество рециклированного америция через активную зону за всю миссию минимально – 57 тонн; остальные 33 тонны практически за один проход «сгорают» в боковом экране!

Сравним длительности миссий на примере задачи по выжиганию 33 т америция. Из приведенных в табл. 3 результатов видно, что гомогенная трансмутация при содержании америция в загружаемом топливе 3% потребует порядка 9 энергоблоков с работой каждого в режиме выжигания в течение всего проектного ресурса в 60 лет. Сокращение количества реакторов вдвое потребует увеличения содержания америция в топливе до ~5%. При этом до ~3,3 кВт увеличивается остаточное энерговыделение выгружаемых ТВС, что превышает действующий проектный предел в 2,5 кВт.

Оценки показывают, что дальнейшее увеличение начального содержания америция до 8,5% позволяет сократить количество требуемых энергоблоков еще вдвое, т.е. фактически до работы 2–3 энергоблоков в течение их проектного срока. Однако при этом еще более возрастет требование к допустимому остаточному энерговыделению выгружаемых ТВС – до 4,5 кВт/ТВС. Для обоснования такого предела необходимо принятие масштабных технических, инфраструктурных и организационных решений.

Переход к гетерогенному выжиганию америция в боковой зоне воспроизводства в специальных ОУ с замедлителем нейтронов и с отказом от выжигания америция в активной зоне фактически возвращает нас к варианту «чистого топлива» в активной зоне. Этот вариант дает ежегодную наработку 30,7 кг Am в топливе активной зоны. С учетом этой наработки реальная трансмутация америция составит 18,8 кг в год. В этом случае для трансмутации 33 т Am потребуется наибольшее количество реакторо-лет – 1755. Безвозвратные потери при этом даже несколько ниже по сравнению с вариантами гомогенной трансмутации для 2–8,5% Am.

Совместное с гетерогенным выжиганием в ОУ бокового экрана рециклирование америция на уровне его равновесного количества в активной зоне позволяет исключить его дополнительную наработку в ней. Тем самым увеличивается масса ежегодно выжигаемого америция до 49,5 кг/год, радикально сокращается требуемое количество реакторо-лет до 667, и уменьшаются безвозвратные потери, которые становятся минимальными среди всех рассмотренных вариантов выжигания за время миссии – 90 кг. Однако за счет отказа от немедленной переработки ОУ, в них будет накапливаться остаточный америций. Его масса за всю миссию по выжиганию составит 12 % от исходной – около 4,1 т. После длительного хранения эти ОУ можно будет однократно переработать, а америций пустить снова в цикл, что учтено в оценке длительности миссии.

Удельная стоимость выжигания америция в данной работе определена как отношение дополнительных топливных затрат, связанных с наличием в цикле америция, к массе выжженного америция (33 т), для вариантов цен а) и б).

Последняя строка табл. 3 убедительно показывает, что увеличение начального содержания америция в топливе приводит к увеличению топливной составляющей стоимости (ТСС) и, соответственно, стоимости усредненного киловатта электроэнергии (показатель LCOE). Отметим, что требования к LCOE реакторов БН-1200 без утилизации минорных актинидов составляют, по данным работы [13], от 1,30 до 2,30 руб./кВт·ч в зависимости от нормы дисконтирования при топливной составляющей стоимости 20 коп./кВт·ч.

Общая стоимость миссии по гомогенному выжиганию 33 т Am в соответствии с данными табл. 3 составляет 20–24 млрд US\$ для цен варианта (а) на топливные переделы и 12–13 млрд US\$ для варианта (б).

Для комбинированной опции (гомогенное выжигание в топливе активной зоны с равновесным америцием и гетерогенное в специальных сборках с замедлителем в боковом экране) эти затраты существенно снижаются до 5,7 млрд и 2,3 млрд US\$ соответственно для вариантов цен (а) и (б).

Также при переходе от чисто гомогенной к комбинированной опции происходит существенное снижение удельных затрат на выжигание америция. Для цен варианта а) эти значения составят $\sim(0,6-0,7)$ млн US\$/кг Am в гомогенной опции и 0,17 млн US\$/кг Am в комбинированной. Для варианта сниженных цен (б) эти значения составят, соответственно, $\sim 0,4$ и 0,07 млн US\$/кг Am.

Расчеты показали, что технико-экономические показатели гомогенной опции слабо зависят от содержания выжигаемого америция. Это обусловлено тем, что значения указанных показателей представляют собой дробно-линейную функцию относительно его содержания. При высокой удельной стоимости изготовления топлива (или ОУ) зависимость технико-экономических показателей от массы рециклируемого америция практически исчезает. Однако переход на другой уровень цен, в данном случае к ценам варианта (б), приводит к существенному улучшению технико-экономических показателей.

Следует отметить, что при гомогенном выжигании америция для реакторных блоков, вовлеченных в данную миссию, ТСС (связанная именно с выжиганием 33 тонн внешнего Am) практически линейно зависит от содержания америция в топливе и весьма значительна по сравнению с приведенной выше ТСС блоков БН-1200, не участвующих в выжигании Am. Единственный способ снижения оцениваемого показателя для каждого отдельного блока – это распространение миссии на возможно большее количество реакторов и увеличение ее длительности, как это, собственно, и предполагается в проекте Прорыв для БР-1200 [13], где внешние минорные актиниды предлагается использовать в качестве компенсаторов изменения реактивности всех быстрых реакторов на начальном этапе (до 30 лет) эксплуатации. Несмотря на малую величину для каждого отдельного реактора, это неизбежно отразится на экономике всей системы быстрых реакторов, вовлеченных в процесс гомогенного выжигания минорных актинидов в топливе.

Вариант комбинированного выжигания внешнего америция в боковом экране с замедлителем при рециклировании собственного Am в топливе активной зоны на равновесном уровне представляется наиболее многообещающим и минимальным с точки зрения воздействия на экономику системы, и может рассматриваться в перспективе в качестве потенциальной услуги, предоставляемой быстрыми натриевыми реакторами для утилизации минорных актинидов от зарубежных тепловых реакторов.

Заключение

В настоящее время натриевые быстрые реакторы являются единственной существующей реакторной технологией, которая может всерьез рассматриваться для трансмутации минорных актинидов в промышленных масштабах:

1. В реакторе типа БН-1200М трансмутация америция возможна как в гомогенном варианте в виде добавки в топливо, так и в гетерогенном варианте в ОУ с замедлителем в боковом экране;

2. Расчетные технико-экономические оценки миссии по выжиганию 33 тонн америция, который будет накоплен к 2035 году в ОЯТ тепловых реакторов, показывают предпочтительность комбинированного варианта одновременного использования гомогенной трансмутации собственного америция на уровне его равновесного содержания в топливе активной зоны ($\sim 0,9\%$ тяж. мет.) и гетерогенного выжигания

внешнего америция в боковом экране в ОУ с замедлителем. Удельные затраты на выжигание при этом оцениваются в диапазоне 0,07–0,17 млн US\$/кг Am. Такой результат получен вследствие существенно меньшего «обременения» америцием (невыгоревшим после единичного его прохода через реактор), несмотря на сравнительно небольшой объем выжигания по сравнению с гомогенным выжиганием в активной зоне (при содержании америция в топливе более 3%);

3. С точки зрения эффективности выжигания и безвозвратных потерь наиболее предпочтительным также выглядит гетерогенное выжигание в ОУ с замедлителем, размещаемых в боковом экране. Несмотря на относительно небольшую массу выжигаемого америция, интегральная стоимость гомогенного выжигания из-за «обременения» (в принятых предположениях) представляется существенно более высокой по сравнению с выжиганием в боковом экране;

4. Полученные результаты, несмотря на указанные в докладе неопределенности в принятых исходных данных, позволяют отдать предпочтение комбинированному варианту с «равновесным» выжиганием собственного америция в активной зоне БН-1200М и гетерогенным выжиганием внешнего америция (из ОЯТ тепловых реакторов) в ОУ с замедлителем, размещаемых в боковом экране этого реактора.

Список литературы

1. Гулевич А.В., Елисеев В.А., Клинов Д.А. и др. О возможности выжигания америция в быстрых реакторах // Атомная энергия. 2020. Т. 128. Вып. 2. С. 82–87.
2. Матвеев В.И., Хомяков Ю.С. Техническая физика быстрых реакторов с натриевым теплоносителем / Учебное пособие для ВУЗов. Под ред. В.И. Рачкова. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
3. Homogeneous versus Heterogeneous Recycling of Transuranics in Fast Nuclear Reactors. — Nuclear Science, ISBN 978-92-64-99177-4, OECD 2012. NEA No. 7077. P. 52.
4. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле. Под ред. Н.Н. Пономарева-Степного. М.: Техносфера, 2016.
5. Shropshire D., Williams K., Boore W. e.a. Advanced Fuel Cycle Cost Basis, INL/EXT-07-1207 Rev.1, 2008.
6. Декусар В.М., Зродников А.В., Елисеев В.А. и др. К вопросу накопления и реакторной утилизации америция в ядерной энергетике // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2019. №1. С. 215–223.
7. Декусар В.М., Иванов Р.Э., Деменева И.В. и др. Выбор эффективных сценариев трансмутации МА с учетом экономических затрат / В книге: «Безопасность АЭС и подготовка кадров» // Тезисы докладов XIV международной конференции, 2015. С. 228–229.
8. Camarcat N., Garzenne C., Le Mer J. e.a. Industrial research for transmutation scenarios // Comptes Rendus Mecanique 339, 2011. P. 209–218.
9. Елисеев В.А., Коробейникова Л.В., Леванова М.В. и др. Возможности утилизации младших актинидов в перспективном натриевом быстром реакторе большой мощности // Межд. конф. Глобал-2009, Париж.
10. Жемков И.Ю., Ижutow А.Л., Набойщиков Ю.В. и др. Гетерогенное выжигание минор-актинидов в реакторе на быстрых нейтронах // Сб. докладов отраслевой конференции ЗЯТЦ, Сочи, Россия, 2021. С. 137–146.
11. Троянов В.М., Кислый В.А. Использование технологий пироэлектрохимической грануляции в виброуплотнения для утилизации америция // Атомная энергия. 2018. Т. 124. Вып. 5. С. 261–265.

12. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами. Под общ. ред. Е.О. Адамова. М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. 496 с.
13. *Андреева К.А., Елисеев В.А., Коробейникова Л.В. и др.* Активная зона на МОХ-топливе с использованием младших актинидов для быстрого натриевого реактора типа БН-1200 // Сб. тезисов «Межведомственный XXIII семинар «Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики с замкнутым топливным циклом (Нейтроника-2012)». 2012, Обнинск. С. 52–53.