

УДК 621.039.51

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.16>

Оригинальная статья / Original paper

Моделирование многократного рецикла топлива с минорными актинидами в энергетических реакторах на быстрых нейтронах большой мощности с использованием комплекса SCALE

А.Ю. Хомяков¹, Е.А. Родина², М.Ю. Терновых³, Г.В. Тихомиров³

¹АО «ТВЭЛ»,

115409 Россия, г. Москва, Каширское ш., 49

²АО «Прорыв» Россия,

119607, г. Москва, Раменский бульвар, д. 1

³НИЯУ МИФИ,

115409 Россия, г. Москва, Каширское ш., 31

Реферат. Рассмотрены особенности трансмутации минорных актинидов, нарабатываемых в двухкомпонентной ядерной энергетике, в коммерческих энергетических быстрых реакторах в режиме замыкания топливного цикла. Описана трехэтапная методология расчетного анализа эффективности трансмутации минорных актинидов при их многократном рецикле. Для расчетного моделирования использован многоцелевой модуль TRITON комплекса SCALE-6.2.4. Для адаптации к задачам многократного рецикла проводился поэтапный расчет состава рециклированного топлива в различных схемах с учетом технологических потерь и уровня воспроизводства P_u . Приводятся результаты моделирования трансмутации «собственных» и «внешних» минорных актинидов из ОЯТ ВВЭР на примерах реактора типа БН-1200 с различными видами топлива и реактора БР-1200 с тяжелым теплоносителем. Выполнен сравнительный анализ подходов к оценке эффекта трансмутации минорных актинидов, накапливаемых в топливном цикле двухкомпонентной ядерной энергетике, особенностей, связанных с многократным рециклом топлива с минорными актинидами.

Ключевые слова: актиниды, быстрый реактор, многократный рецикл, нуклидная кинетика, отработавшее ядерное топливо, радиоактивные отходы, топливный цикл, трансмутация.

Для цитирования: Хомяков А.Ю., Родина Е.А., Терновых М.Ю., Тихомиров Г.В. Моделирование многократного рецикла топлива с минорными актинидами в энергетических реакторах на быстрых нейтронах большой мощности с использованием комплекса SCALE. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;3:220–232. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.16>

Введение

Одной из ключевых задач современной ядерной энергетики (ЯЭ) является переход к замкнутому ядерному топливному циклу (ЗЯТЦ) с выжиганием минорных актинидов (МА) как наиболее опасной долгоживущей компоненты радиоактивных отходов (РАО) [1 – 2]. Большинство работ по трансмутации МА в большей степени ориентируются на подходы, развитые для специализированных реакторов-выжигателей, для которых ликвидация МА является приоритетной задачей.

В данной работе анализируется возможность утилизации МА путем их включения в топливный цикл реакторов на быстрых нейтронах (РБН) как опции, параллельной основной функции по выработке электроэнергии. Анализ возможностей трансмутации МА в РБН проводился и ранее, но только сейчас разработчики вплотную подошли к созданию и внедрению серийных коммерчески эффективных РБН. При этом современные проекты реакторов на быстрых нейтронах как со свинцовым, так и с натриевым теплоносителями, предполагают использование активных зон с пониженной теплонапряженностью и плотностью потока нейтронов, недостаточно жестким спектром нейтронов, чтобы деление МА было доминирующим процессом. Эти физические особенности инновационных РБН сами по себе не являются оптимальными для выжигания МА в традиционном понимании и могут приводить к относительно невысокой эффективности выжигания МА, как показано в работе [3].

Поэтому рассматривается задача не создания специальных физических условий для трансмутации МА, а адаптации для этого топливного цикла коммерческих РБН с многократным рециклом МА при оптимальном сочетании с основной функцией по производству электроэнергии путем минимизации возникающих дополнительных затрат. Данный подход с исключением необходимости введения в структуру ЯЭ специализированных выжигателей нацелен на достижение экономически эффективного и системного решения проблемы МА.

Особенности трансмутации МА в энергетических РБН и общая методология оценки ее параметров

Традиционно задача трансмутации связывается с выжиганием МА, накапливаемых в отработавшем ядерном топливе (ОЯТ) тепловых реакторов, составляющих базу ЯЭ и являющихся основными источниками МА в системе. Перед реакторами, претендующими на роль выжигателей МА, ставится задача достижения максимального объема утилизации МА на единичном реакторе для минимизации удельных капитальных затрат, которые являются обременением ЯЭ.

Коммерческие энергетические РБН в первую очередь будут выполнять энергетическую функцию и занимать существенную долю в системе ЯЭ. Энергетическая составляющая является приоритетной и потому оптимальным подходом является возможность решения проблемы МА при минимальном, но достаточном темпе трансмутации. По сути это означает переход от подхода «чем больше трансмутируется МА – тем лучше» к прагматичному подходу «трансмутировать необходимое количество МА с минимальными последствиями». Ориентация на такой системный подход к реализации технологий трансмутации МА в РБН является принципиальной особен-

ностью данной работы. Энергетические быстрые реакторы, как и тепловые, будут производить МА в системе и без применения технологий выжигания МА способствовать дальнейшему росту количества МА. Поэтому системное влияние трансмутации МА в РБН шире – не только и, возможно, даже не столько утилизация накопленных запасов МА от деятельности тепловых реакторов, но и предотвращение накопления МА в будущем за счет трансмутации так называемых «собственных» МА. Как правило, показатели трансмутации рассчитываются только по «внешним» по отношению к РБН МА как разность их масс в загружаемом и выгружаемом топливе. Собственные МА в этом подходе являются лишь фактором, снижающим и искажающим эффективность трансмутации «внешних» МА.

В подходе данной работы предлагается выделять и оценивать параметры трансмутации «собственных», «внешних» МА и всех МА в системе («системные» МА) с учетом потенциального накопления МА от работы РБН с рециклом только U и Pu. С практической точки зрения это позволит оценить потенциальный выигрыш, в том числе экономический, от снижения объема захораниваемых РАО двухкомпонентной ЯЭ. Корректное выделение трансмутации «внешних» МА важно при оказании услуг топливного цикла внешним, например, зарубежным, заказчиком.

Второй методический аспект касается учета полноты трансмутации МА к определенному моменту времени. Основная функция технологий фракционирования, рецикла и трансмутации МА – снижение количества и опасности МА в РАО. В случае перехода к многократному рециклу МА при переработке ОЯТ РБН в РАО попадают только технологические потери МА, уровень которых в соответствии с требованиями, принятыми в проектом направлении «Прорыв», составляет ~0,1%. Оценки только по технологическим потерям, отражая снижение МА в захораниваемых РАО, не учитывают остатки МА на реальный момент окончания последнего рассматриваемого цикла облучения, могут казаться излишне оптимистичными. Однако общий подход к развитию системы с РБН предполагает, что по окончании работы одного быстрого реактора оставшиеся топливные материалы не будут являться РАО, а будут использоваться в последующих РБН. Таким образом, эффект по снижению опасности РАО по утилизируемым МА можно признать окончательным и не зависящим от невыгоревшего остатка.

Тем не менее, оценки количества трансмутированных МА в топливном цикле на конкретный момент времени с учетом невыгоревшего остатка и накопления Ст может характеризовать технико-экономическую эффективность технологии обращения с МА. Поэтому такие оценки также необходимы. В заключение отметим, что утилизация долгоживущих РАО в условиях деградирующей ЯЭ, при которой отсутствует потребность в использовании регенерированных материалов, представляет совершенно другую техническую и технологическую проблему и не является предметом обсуждения в рамках данной работы.

Для корректной и системной оценки параметров трансмутации в рамках данной работы принята следующая общая трехэтапная методология. На первом этапе проводится моделирование накопления МА в случае рецикла только U и Pu. На втором этапе проводится расчет многократного рецикла топлива РБН с включением и рециклированием МА с определением остатка МА после каждого цикла облучения. Сравнение с результатами расчета первого этапа позволяет оценить параметры трансмутации «собственных» МА. На третьем этапе рассматривается совместный рецикл собственных

и подгружаемых внешних МА с определением параметров системной трансмутации МА и выделением трансмутации «внешних» МА.

Требуется определить параметры, используемые в данной методологии. Под термином «утилизация» понимается количество МА, извлекаемых из РАО для рецикла в топливном цикле РБН и определяющих эффект применения технологий трансмутации в части снижения массы захораниваемых РАО. «Остаток» МА после рецикла утилизированных, вычисляемый в процессе моделирования, характеризует отложенную часть проблемы. Разность масс утилизированных МА и остатка есть масса «трансмутированных» МА. При расчете массы утилизируемых МА (суммы N_p , A_m и C_m) учитывается C_m из ОЯТ как РБН, так и ВВЭР, так как он реально извлекается из РАО, хотя формально в течение ~60-ти лет будет только храниться. В остатке учитывается наработка C_m при трансмутации A_m и N_p , которая уменьшает эффект от их суммарной физической трансмутации. Под относительной эффективностью трансмутации по массе в данной работе мы понимаем долю трансмутированных МА от утилизированных МА в процентах. Для C_m формально эффективность является отрицательной.

Расчетная схема моделирования

В данной работе в качестве основной вычислительной базы выбран многоцелевой модуль TRITON комплекса SCALE-6.2.4 [4], разработанного в ORNL (США) для анализа вопросов ядерной и радиационной безопасности топливного цикла. Расчетная цепочка данного модуля обеспечивает автоматизированное выполнение последовательных вычислений нейтронных констант на базе ENDF/B-VII, переноса нейтронов в 252-групповом приближении в 2D-геометрии (модуль NEWT) и нуклидной кинетики с использованием программы ORIGEN. Обобщенная схема моделирования многократного рецикла топлива на базе комплекса SCALE-6.2.4 приведена на рис. 1. Для обеспечения моделирования многократного рецикла топлива расчетная цепочка дополнена расчетами состава рециклированного топлива с учетом технологических потерь, уровня воспроизводства P_u , сочетания наработки и трансмутации «собственных» МА РБН и «внешних» МА, накопленных в ОЯТ ВВЭР. При расчете состава регенерированного топлива доля нуклидов МА в топливе определялась схемой рецикла, доля P_u – по методике корректировки массовой доли в зависимости от изотопного состава P_u . Суммарный баланс по массе подводился за счет урана.

Для проведения расчетов по модулю TRITON на основе работ [5–8] подготовлены модели ячейки, представляющие окруженные слоем межкассетного теплоносителя стан-



Рис. 1. Общая схема расчетного моделирования характеристик топлива с МА при многократном рецикле

дартные чехловые ТВС реактора типа БН-1200 с натриевым теплоносителем и бесчехловые ТВС реактора типа БР-1200 со свинцовым теплоносителем. В реакторе БН-1200 возможно использование смешанного оксидного (МОКС) или нитридного (СНУП) топлива, в БР-1200 – СНУП-топливо. Для БН-1200 также рассмотрено топливо с введением аксиальной прослойки. Оценки балансов материалов по всему реактору выполнялись исходя из загрузки 432-х ТВС в стартовую активную зону БН-1200, 397-ми ТВС для БР-1200, схемы с четырехкратной частичной перегрузкой топлива для основного массива ТВС. Один рецикл топлива включал в себя четырехкратное (для основного массива) облучение по 330 эфф. сут. с перегрузкой топлива длительностью 35 сут. и длительностью ЯТЦ 3 года.

Моделирование топливного цикла реакторов на быстрых нейтронах с многократным рециклом основных актинидов

На первом этапе для оценки масштаба проблемы накопления МА в РБН мощностью 1200 МВт проведены расчеты многократного рецикла смешанного топлива основных актинидов, т.е. U и Pu, без рецикла МА. Результаты удельного и интегрального накопления Am в топливе в зависимости от рецикла приведены на рис. 2 и рис. 3 соответственно. Накопление Am на рис. 2 показывает существенную неравномерность

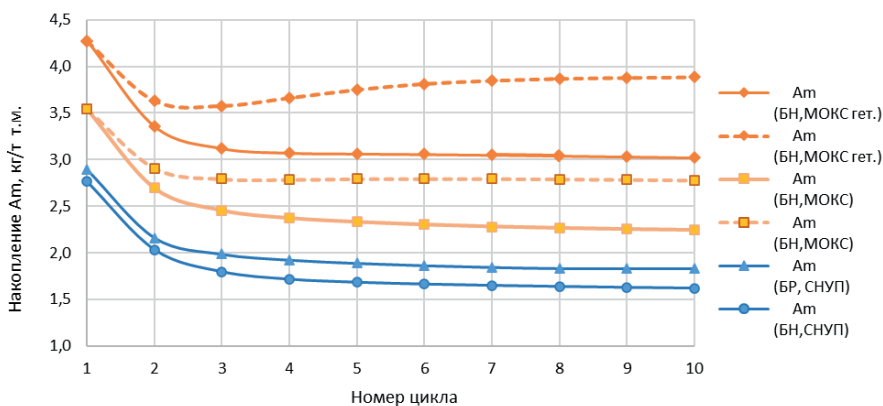


Рис. 2. Удельное накопление Am в ОЯТ РБН в зависимости от номера рецикла топлива без утилизации МА

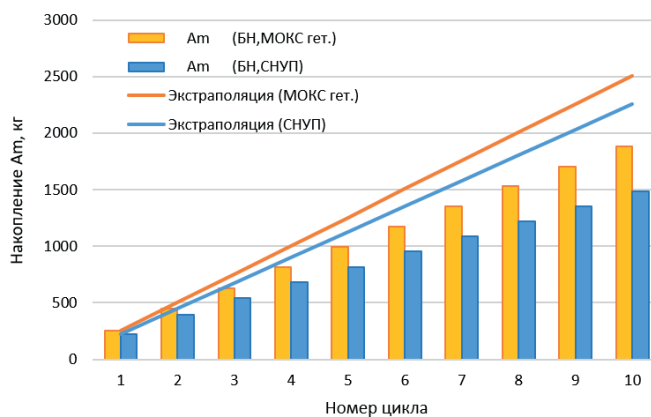


Рис. 3. Интегральное накопление Am при многократном рецикле Pu и U (гистограмма) в сравнении с экстраполяцией расчетов однократного рецикла (линейный график)

накопления, достигающую 40 – 50%, которая, в основном, связана с изменением изотопного состава Pu, а частично и Am, при рециклировании. Аналогичные результаты получены и для накопления Cm, в меньшей степени – для Np.

Отметим важную особенность эффекта многократного рецикла, связанную с рециклом топлива с использованием зон воспроизводства с обедненным ураном. Для демонстрации и оценки величины эффекта были рассмотрены варианты рецикла гомогенного и гетерогенного (т.е. с аксиальной прослойкой) МОКС-топлива только по смешанному топливу (пунктирные кривые на рис. 2) или путем совместной его переработки с аксиальными зонами воспроизводства. Во втором случае низкофоновый Pu зон воспроизводства, смешиваясь с Pu основного топлива, изменяет изотопный состав рециклируемого топлива в сторону уменьшения доли изотопов ^{241}Pu и ^{242}Pu , существенно снижая наработку Am и Cm. Этот пример показывает, что эффект многократного рецикла на трансмутацию МА может быть связан не только с повторным их облучением с увеличением интегрального флюенса нейтронов, но и с более сложной нуклидной кинетикой наработки собственных МА.

Интегрально неучет многократного рецикла топлива в рассмотренных вариантах приводит к завышению накопления Am на ~30 – 50%, Cm – на ~20 – 40%. Полученные результаты ясно показывают необходимость моделирования многократного рецикла топлива для получения корректных оценок состава топлива и накопления в нем МА.

Моделирование топливного цикла быстрых реакторов с многократным рециклом и трансмутацией собственных МА

В соответствии с принятой методологией на втором этапе определены числовые показатели способности РБН по выжиганию собственных МА в результате гомогенной трансмутации по схеме многократного рецикла, приведенной на рис. 4.

Моделирование начинается с формирования топлива стартовой загрузки активной зоны РБН из складских запасов обедненного U и энергетического Pu из ОЯТ тепловых реакторов (в расчетах использовался ОЯТ ВВЭР-1000 с выдержкой семь лет). После его облучения, выдержки ОЯТ во внутриреакторном хранилище (ВРХ) и переработки с фракционированием PAO Pu, U, Np и Am возвращаются в цикл в составе регенери-

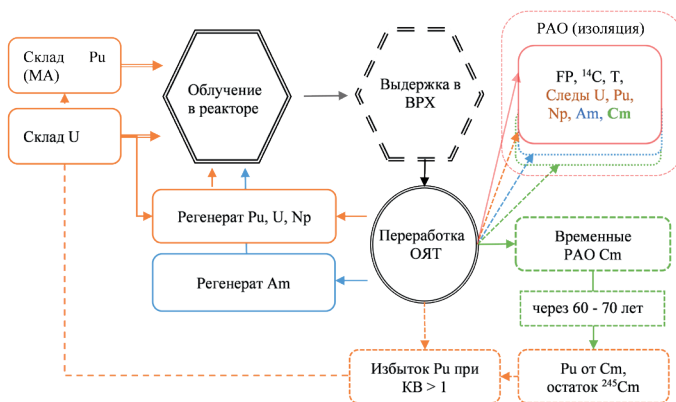


Рис. 4. Схема рецикла топлива и МА в топливном цикле РБН-1200

рованного топлива. В состав РАО попадают все осколки деления (FP), ^3T , ^{14}C (значимо для СНУП-топлива), а также технологические потери актинидов в количестве $\sim 0,1\%$ от массы ОЯТ. Для Cm предусмотрено хранение в течение ~ 60 -ти лет до распада основной его части в изотопы Pu, которые далее будут утилизированы вместе с остатками ^{245}Cm . Этот вариант рецикла Cm позволяет исключить его из состава РАО, предназначенных для окончательного захоронения, но с кюриевыми РАО, носящими временный характер.

Результаты накопления Am в рециркулируемом топливе со стабилизацией на равновесном уровне, при котором скорости наработки и трансмутации МА оказываются равными, приведены на рис. 5. Равновесное содержание Am в топливе существенно зависит от доли Pu и модификации его изотопного состава при многократном рецикле. Особенно это проявляется для МОКС-топлива при совместной переработке с зонами воспроизводства. Для различных вариантов РБН, топлива и его рецикла равновесное содержание Am составит 0,35 – 0,80%.

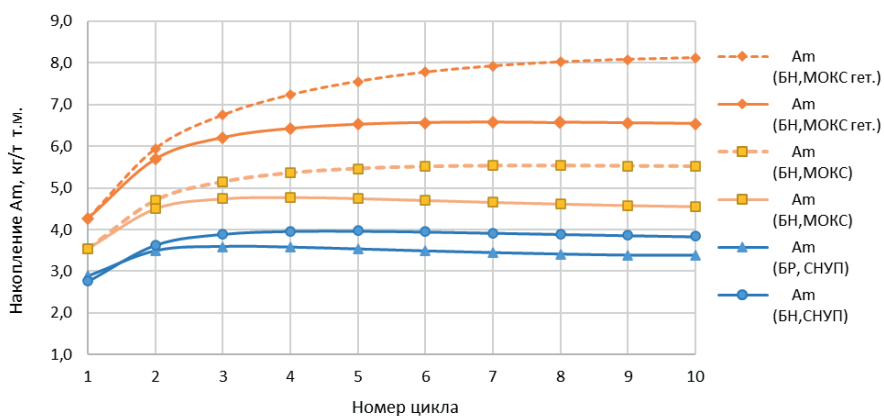


Рис. 5. Накопление Am ОЯТ РБН-1200 при рецикле собственных МА

Интегральные параметры утилизации и трансмутации Am с учетом остатка собственного Am на момент завершения каждого рецикла для двух крайних вариантов СНУП- и МОКС-топлива с аксиальной прослойкой приведены на рис. 6.

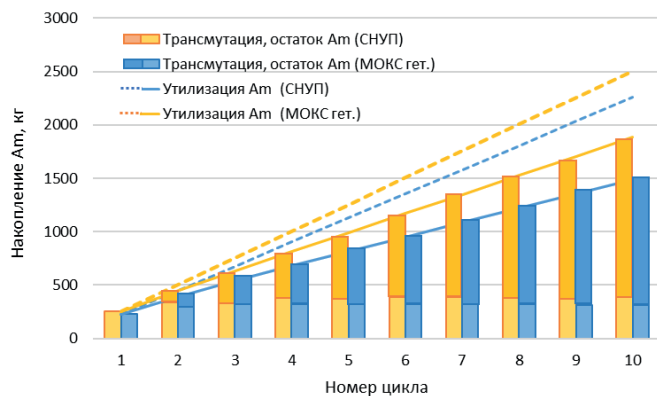


Рис. 6. Интегральные параметры утилизации и трансмутации Am в СНУП- и МОКС (рет.)-топливе при рецикле собственных и экстраполяция утилизации с первого цикла (пунктирные линии)

За время работы реактора мощностью 1200 МВт будет трансмутировано ~80% Am и Np, в абсолютных единицах – 1,2 – 1,5 т по Am и ~150–200 кг Np. Малое количество трансмутированного Np является следствием его малого накопления в топливе РБН, а отнюдь не неспособностью РБН к его трансмутации. Пунктирные прямые – оценки утилизации Am исходя из расчета первого цикла работы топлива в РБН – показывают завышение на ~30 – 50% реального объема утилизации собственного Am.

Накопление Cm в ОЯТ РБН при рецикле Am также существенно неравномерно по тем же причинам, что и для Am. Однако для Cm по интегральному эффекту экстраполяция с первого цикла даст существенно заниженные показатели накопления Cm примерно в три раза (см. рис. 7). Вовлечение Am в топливо приводит к существенному росту накопления Cm. По сравнению с вариантом рецикла только U и Pu за время жизненного цикла реактора масса Cm возрастет с ~80 до ~330 кг для СНУП-топлива и с ~140 до ~510 кг для гетерогенного МОКС- топлива.

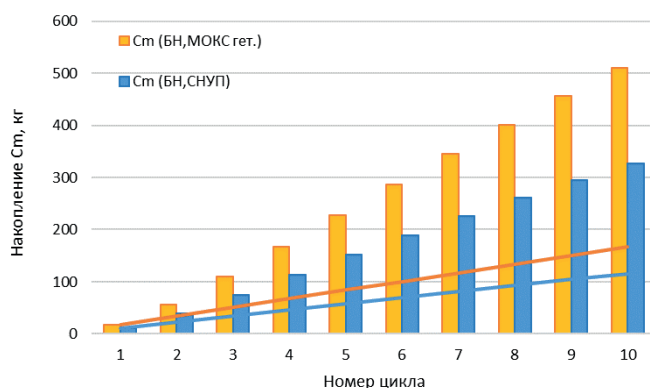


Рис. 7. Интегральная масса выгруженного Cm при рецикле собственных МА

Моделирование топливного цикла РБН с трансмутацией внешних МА от переработки ОЯТ тепловых реакторов

Традиционная типичная оценка параметров трансмутации накопленных МА тепловых реакторов (которые здесь мы называем внешними) заключается в определении разности масс МА, загруженных в топливо и выгруженных в составе ОЯТ после однократного облучения. Предполагается, что последующие облучения будут повторяться с теми же результатами. Такая оценка трансмутации МА является разностью между реальным объемом трансмутированных внешних МА и накоплением МА в топливе быстрого реактора, т.е. она занижает реальный показатель трансмутации внешних МА. С учетом того, что Am и Cm не являются моноизотопами, такая оценка хоть в целом и передает общее снижение их массы, но не является вполне корректной из-за возможного различия изотопного состава МА ВВЭР и РБН. Кроме того она не передает системный эффект снижения реального объема МА в РАО от двух источников их производства в двухкомпонентной ядерной энергетике, который нужно отсчитывать не от уровня накопленных внешних МА, а от накопления в системе с учетом наработки МА от РБН в режиме рецикла только U и Pu.

Моделирование рецикла внешних МА выполнялось на третьем этапе расчетов в соответствии с описанной выше методологией. Внешние МА от реакторов ВВЭР добавляются в стартовое топливо до определенной, заданной пользователем, концентрации. При многократном рецикле они дополнительно подгружаются и рециркулируются, но так, чтобы не превысить заданное предельное значение. В соответствии с методологией в расчетах разделяется трансмутация внешних МА и накопление-трансмутация собственных МА. На начальном этапе накопление собственных МА снижает системный эффект трансмутации МА. Но при достижении равновесного содержания МА разность загружаемых и выгружаемых МА точно дает оценку трансмутации внешних МА, так как содержание собственных в топливе уже не изменяется. Таким образом, традиционная и системная оценки отличаются на величину массы остатка собственных МА в ОЯТ последнего рецикла.

На рисунке 8 приведены результаты оценки трансмутации внешнего Am в двух описанных подходах и сравнения с экстраполяцией результатов однократного облучения. Различие оценок двух подходов в наибольшей степени проявляется при малых концентрациях МА, занижая трансмутацию внешних до ~30%. С ростом количества

утилизируемых внешних МА РБН приближается к типичному выжигателю, сближаются и оценки трансмутации. Что касается экстраполяции результатов расчетов одного рецикла, то следует отметить серьезную недооценку эффекта трансмутации Am, которая может превышать 100% (см. рис. 8).

Итоговые результаты расчетов интегральной массы и баланса утилизируемых МА в топливном цикле РБН на примере БН-1200 со СНУП-топливом приведены на рис. 9.

Рисунок 9 демонстрирует динамику изменения параметров по рециклам, в частности, уменьшение и стабилизацию абсолютных остатков МА, рост объема утилизируемых и трансмутируемых МА. При концентрации МА на уровне ~2% в топливном цикле РБН может быть утилизировано примерно восемь тонн МА, из которых из которых ~80% будут трансмутированы.

Динамика относительной эффективности трансмутации утилизируемых МА, демонстри-

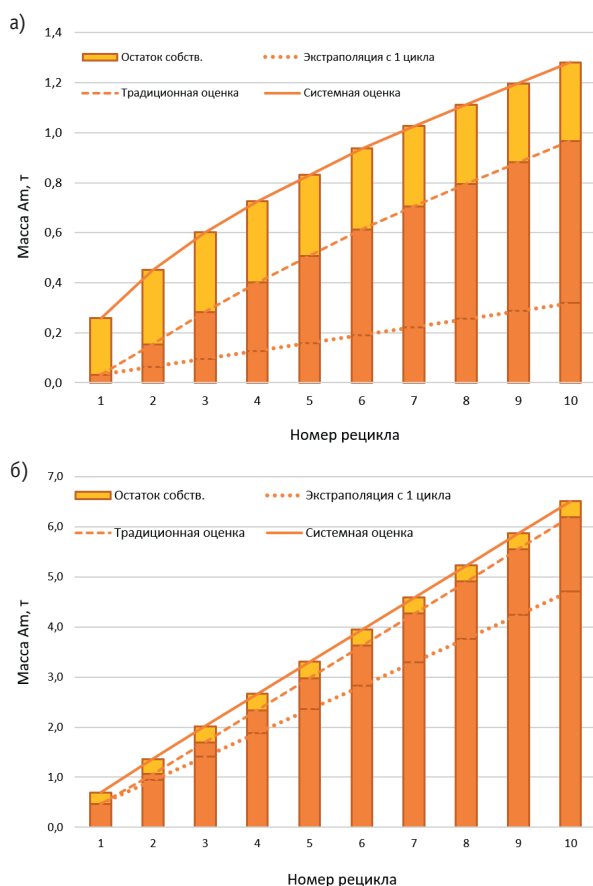


Рис. 8. Сравнение результатов трансмутации внешнего Am при многократном рецикле и экстраполяции расчетов однократного при концентрациях в топливе ~0,7% (а) и ~4% (б) соответственно

Моделирование многократного рецикла топлива с минорными актинидами в энергетических реакторах на быстрых нейтронах большой мощности с использованием комплекса SCALE

рующая существенный рост при увеличении количества рециклов, приведена на рис. 10. Нужно учитывать, что в процессе рециклов все время идет подгрузка внешних и накопление собственных МА, и разные группы загружаемых МА к каждому моменту времени прошли разное количество рециклов. В частности, с этим связана задержка роста эффективности трансмутации собственных МА, которые, прежде чем быть трансмутированными, должны быть накоплены. Для A_{m1} и N_r эффективность приближается к 90%, а параметры трансмутации суммы МА сдерживаются отсутствием трансмутации S_m . Полученные результаты, отражающие временной характер трансмутации МА, должны быть учтены при технико-экономической оценке затрат на их трансмутацию (хранение остатков, в том числе S_m и т.п.).

С точки же зрения эффективности утилизации МА по снижению количества МА в РАО, то она составляет во всех случаях ~99,8% и определяется технологическими потерями. С экономической точки зрения данный параметр характеризует (хотя и не полно) потенциальный эффект от снижения затрат на захоронение РАО. Полученные

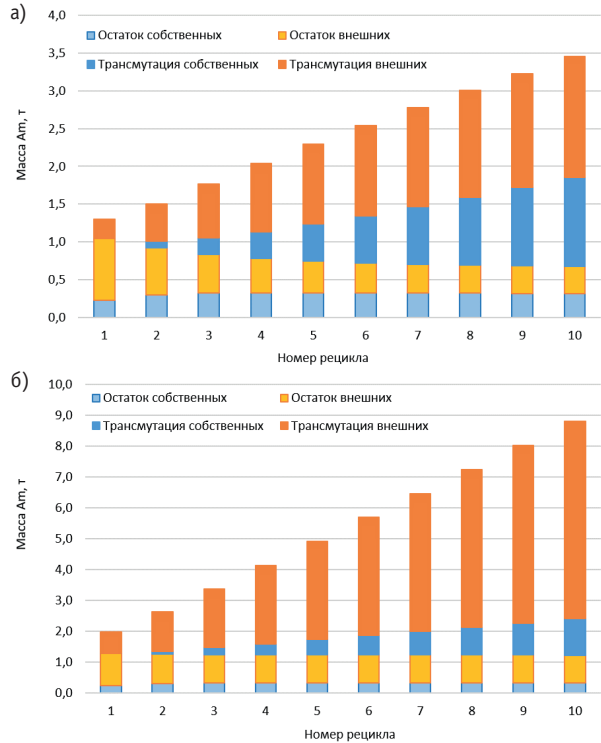


Рис. 9. Баланс МА при утилизации в реакторе типа БН-1200 со СНУП-топливом в соответствии с принятой методологией при концентрациях в топливе ~1% (а) и ~4% (б) соответственно

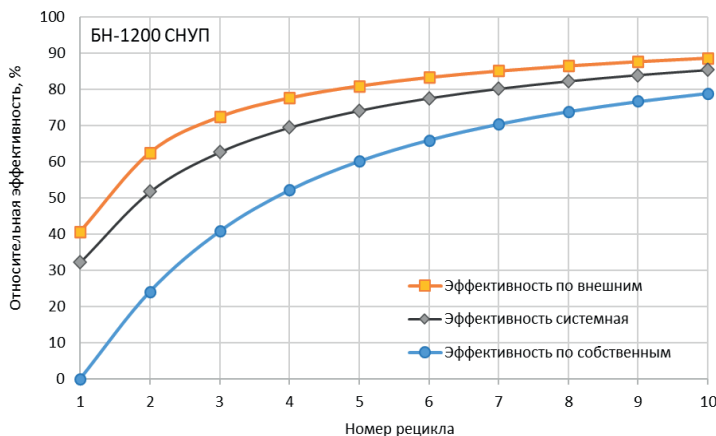


Рис. 10. Изменение эффективности трансмутации A_{m1} при рецикле в реакторе типа БН-1200

характеристики трансмутации МА также дают основания для оценки снижения радиоэкологической опасности захораниваемых РАО, что предполагается сделать на следующем этапе исследований.

Заключение

Использование коммерческих энергетических быстрых реакторов для целей трансмутации МА требует корректировки традиционных подходов, ориентированных на реакторы-выжигатели. В данной работе разработана методология, основанная на трехэтапном моделировании многократного рецикла топлива и системном подходе к оценке параметров трансмутации с учетом двухцелевой роли РБН в двухкомпонентной ЯЭ.

На основе расчетов с использованием комплекса SCALE-6.2.4, адаптированного к расчету многократного рецикла за счет внешнего формирования состава рециклированного топлива, проведен анализ изменения состава топлива при многократном рецикле и его влияния на количественные характеристики трансмутации МА с учетом отложенного решения по Ст.

Проведено сравнение с традиционными способами оценки параметров трансмутации. Показано, что экстраполяция расчетов однократного облучения на жизненный цикл РБН дает завышение накопления собственного Ам и, наоборот, существенную недооценку трансмутации внешнего. Существенно недооценивается и накопление Ст. Показано влияние на параметры трансмутации МА рецикла с совместной переработкой основного смешанного топлива и уранового топлива зон воспроизводства. Разработанная методология и отработка ее реализации показали возможность применения для эффективного и быстрого анализа различных вариантов замыкания ЯТЦ по МА.

Литература

1. Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors. Handbook of Russian Nuclear Power. (Gen. Ed. of Evgeny O. Adamov. Academic Press an imprint of Elsevier, 2022, 431 p., ISBN: 978-0-323-99308-1.
2. Адамов Е.О., Власкин Г.Н., Лопаткин А.В. и др. Радиационно-эквивалентное обращение радиоактивных нуклидов в ЯТЦ – эффективная альтернатива отложенному решению проблемы накопления ОЯТ. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2015;6:15–25. EDN: VIDOZD.
3. Хомяков А.Ю. Эффективность трансмутации минорных актинидов в реакторах на быстрых нейтронах при различных критериях. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2024;3:77–89. EDN: JLXHIW.
4. Wieselquist W.A., Lefebvre R.A., Jessee M.A. (Eds.). SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (2020). URL: <https://www.ornl.gov/file/scale-62-manual/display> (дата обращения 28.12.2021).
5. Vasilyev B.A., Vasyaev A.V., Gusev D.V. et al. Current status of BN-1200M reactor plant design. *Nuclear Engineering and Design*. 2021;382:111384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111384>
6. Vasiliev B.A., Belov S.B., Kiselev A.V. et al. Unification of the BN-1200 reactor core designs with MOX and MNUP fuel. *Nuclear Engineering and Design*. 2021;382:111387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111387>
7. Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П. и др. Моделирование топливного цикла реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2021;4:66–75. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.06>

8. Баловнев А.В., Давыдов В.К., Жирнов А.П. и др. Исследование нейтронно-физических характеристик реактора БР-1200 при трансмутации америция. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2023;1:91–104. EDN: CRPXCC.

Поступила в редакцию 19.06.2026

После доработки 21.08.2026

Принята к опубликованию 10.09.2026

Авторы

Хомяков Андрей Юрьевич, главный эксперт,

E-mail: AYKhomyakov@tvel.ru

Родина Елена Александровна, начальник отдела, к.т.н.,

E-mail: ELARodina@rosatom.ru

Терновых Михаил Юрьевич, старший преподаватель,

E-mail: myternovykh@mephi.ru

Тихомиров Георгий Валентинович, зам. директора ИЯФТ, профессор, д.ф.-м.н.,

E-mail: gvtikhomirov@mephi.ru

UDC 621.039.51

Modeling of Multiple Fuel Recycling with Minor Actinides in High-Capacity Fast Power Reactors Using the Code System SCALE

Khomiakov A.Yu.¹, Rodina E.A.², Ternovykh M. Yu.³, Tikhomirov G.V.³

¹TVEL JSC,

49 Kashirskoe Sh., 115409 Moscow, Russia

²Proryv JSC,

1 Ramensky Boulevard, 119607 Moscow, Russia

³MEPhI,

31 Kashirskoe Sh., 115409 Moscow, Russia

Abstract

The features of minor actinide (MA) transmutation, generated in a two-component nuclear power system, within commercial fast power reactors operating in a closed fuel cycle are examined. A three-stage methodology for the computational analysis of MA transmutation efficiency during multiple recycling is described. The multi-purpose module TRITON of the code system SCALE-6.2.4 was used for the simulation. To adapt the tool for multiple recycling tasks, a step-by-step calculation of the recycled fuel composition was performed for various schemes, accounting for technological losses and plutonium breeding ratios. The results of modeling the transmutation of “intrinsic” and “external” MAs (from VVER spent nuclear fuel) are presented using the examples of a BN-1200 type reactor with various fuel types and a BR-1200 heavy liquid metal cooled reactor. A comparative analysis was carried out regarding approaches to evaluating the transmutation effect of MAs accumulated in the two-component nuclear power fuel cycle, as well as specific features associated with the multiple recycling of fuel containing MAs.

Keywords: actinides, fast reactor, multiple recycling, nuclide kinetics, spent nuclear fuel, radioactive waste, fuel cycle, transmutation.

For citation: Khomiakov A.Yu., Rodina E.A., Ternovyykh M.Yu., Tikhomirov G.V. Modeling of Multiple Fuel Recycling with Minor Actinides in High-Capacity Fast Power Reactors Using the Code System SCALE. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;3:220–232. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.3.16> (in Russian).

References

1. Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors. Handbook of Russian Nuclear Power. (Gen. Ed. of Evgeny O. Adamov. Academic Press an imprint of Elsevier, 2022, 431 p., ISBN: 978-0-323-99308-1.
2. Adamov E.O., Vlaskin G.N., Lopatkin A.V., Rachkov V.I., Khomiakov Iu.S. Radiation equivalent treatment of radioactive nuclides in nuclear fuel cycle – effective alternative to the delayed solution of spent nuclear fuel accumulation problem. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energetics*. 2015;6:15–25. EDN: VIDOZD (in Russian).
3. Khomiakov A.Yu. Efficiency of Minority Actinide Transmutation in Fast Reactors under Various Criteria. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2024;3:77–89. EDN: J LXHIW (in Russian).
4. Wieselquist W.A., Lefebvre R.A., Jessee M.A. (Eds.). SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39, Version 6.2.4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN (2020). URL: <https://www.ornl.gov/file/scale-62-manual/display> (accessed Dec. 28, 2021).
5. Vasilyev B.A., Vasyaev A.V., Gusev D.V., Marova E.V., Staroverov A.I., Shepelev S.F. Current status of BN-1200M reactor plant design. *Nuclear Engineering and Design*. 2021;382:111384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111384>
6. Vasiliev B.A., Belov S.B., Kiselev A.V., Eliseev V.A., Khomiakov Iu.S., Rodina E.A. Unification of the BN-1200 reactor core designs with MOX and MNUP fuel. *Nuclear Engineering and Design*. 2021;382:111387. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111387>
7. Balovnev A.V., Davydov V.K., Zhirnov A. P. Moiseev A.V., Soldatov E.O. Modeling of the Fuel Cycle in a Fast Reactor with Lead Coolant. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021;4:66–75. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.06> (in Russian).
8. Balovnev A.V., Davydov V.K., Zhirnov A. P., Moiseev A.V., Soldatov E.O. Research of Neutron-Physical Characteristics of the BR-1200 Reactor during Americium Transmutation. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2023;1:91–104. EDN: CRPXCC (in Russian).

Authors

Andrei Yu. Khomiakov, chief expert,

E-mail: AYKhomyakov@tvel.ru

Elena A. Rodina, head of department, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: ELARodina@rosatom.ru

Mikhail Yu. Ternovyykh, senior lecturer,

E-mail: myternovyykh@mephi.ru

Georgiy V. Tikhomirov, associate director INPHE, professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: gytikhomirov@mephi.ru