

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВОЗМОЖНЫХ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА МАСШТАБЫ ИНСПЕКЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ РЕЖИМА НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ

А.А. Андрианов*, Ю.А. Коровин*, Г.М. Пшакин**

** Обнинский государственный технический университет атомной энергетики, г. Обнинск*

*** ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



В работе исследовано влияние возможных сценариев развития ядерной энергетики на масштабы инспекционной деятельности по обеспечению режима нераспространения. Анализ проведен с использованием системных моделей развития ядерной энергетики на основе оценки динамики роста количества делящихся материалов и динамики изменения его структуры при различных сценариях развития и стратегий обращения с делящимися материалами в топливном цикле. Рассмотрены как эволюционный сценарий развития, подразумевающий сохранение современного инфраструктурного контекста и экстраполяции в будущее современных трендов развития ядерной энергетики, так и инновационный сценарий развития, с внедрением в структуру энергетики инновационной ядерно-энергетической установки и решением с ее помощью системных задач отрасли.

ВВЕДЕНИЕ

Более трех десятилетий созданная Международным агентством по атомной энергии система гарантий обеспечивает уверенность международного сообщества в том, что участники Договора о нераспространении ядерного оружия соблюдают взятые на себя обязательства по его выполнению.

К эволюции системы ядерной энергетики, в постоянно изменяющемся политическом контексте, сопровождаемой чередой смен приоритетов в направлениях развития национальных топливных циклов, адаптировалась и система гарантий Агентства. Процесс этот происходил с различной степенью эффективности, но в целом система гарантий оставалась адекватным и надежным инструментом обеспечения уверенности мировой общности в том, что режим нераспространения не нарушается [1,2].

В последнее время по ряду объективных причин возобновился интерес к ядерной энергетике во всем мире, получивший емкое название «ядерный ренессанс». Потенциально возможный рост спроса на ядерную энергию бросает вызов системе международного контроля. Механизм гарантий должен продолжать служить адекватным инструментом, обеспечивающим нераспространение ядерного оружия и в условиях возрос-

© А.А. Андрианов, Ю.А. Коровин, Г.М. Пшакин, 2007

шего спроса на ядерную энергию. Для этого требуется не только оптимизация системы гарантий Агентства с целью повышения ее эффективности, но и выбор такой стратегии обращения с ядерными материалами на национальном, региональном и глобальном уровнях, которая бы не усложняла деятельность Департамента гарантий МАГАТЭ.

В работе исследовано влияние возможных сценариев развития ядерной энергетики на масштабы инспекционной деятельности по обеспечению режима нераспространения. Анализ проведен на основе оценки динамики роста полного количества ядерного материала в топливном цикле и изменения его составляющих при различных сценариях развития ядерной энергетики и стратегий обращения с делящимися материалами в топливном цикле.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ГАРАНТИЙ В СОВРЕМЕННОМ ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОНТЕКСТЕ

Рассмотрим современное состояние системы международных гарантий и индустрии топливного цикла ядерной энергетики. Это позволит выявить проблемы и определит начальные и граничные условия для прогнозирования перспективных потребностей в инспекционной деятельности.

Современные проблемы системы международных гарантий

По состоянию на конец 2004 г. Агентство имело соглашения по гарантиям с 144 странами. Эти соглашения охватывают 923 установки топливного цикла. На 598 установках было проведено за год 2302 инспекции, которые покрывали порядка

164 000 т ядерного материала, включающих 32 т ВОУ и 89 т выделенного плутония [3].

Динамика развития ядерной энергетики и количества ядерных материалов в единицах значимого количества (SQ), поставленного под гарантии Агентства, представлены на рис.1. Основная тенденция, которая видна из этого графика следующая: количество ядерных материалов, поставленных под гарантии пропорционально интегральной энерговыработке, а не мощности ядерной энергетики. Так, например, в период с 1980 по 2000 гг. при возрастании мощности ядерной энергетики

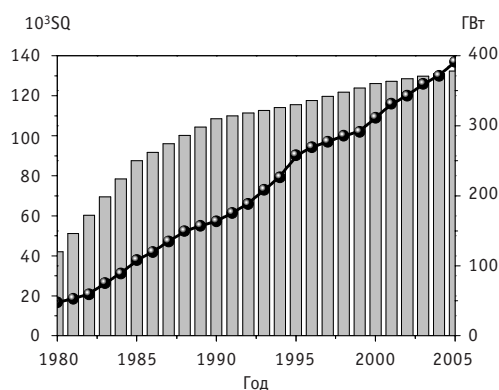


Рис. 1. Динамика роста мощностей ЯЭ и количества ЯМ, поставленных под гарантии

в два раза, прирост количества материалов, находящихся под гарантиями в единицах SQ, составил пять раз. Такая тенденция является следствием современной структуры ядерной энергетики и состояния ее топливного цикла, связанного с отсутствием полномасштабного замкнутого ЯТЦ, и, как следствие, с дисбалансом наработки и потребления ядерных материалов.

Система инспектирования была адекватна и не вызывала озабоченности до конца 90-х годов прошлого столетия: сравнительно небольшие масштабы развития ядерной энергетики и возможность оптимизации практики осуществления инспекций обеспечивали высокую эффективность деятельности Департамента гарантий МАГАТЭ. Для иллюстрации успехов механизма верификации приведем высказывание Бруно Пелло¹, в котором он отмечает, что сокращение ежегодных

¹ Бруно Пелло – заместитель Генерального директора МАГАТЭ по гарантиям с 1993 по 1999 гг.

затрат, связанных с осуществлением гарантий на единицу значимого количества ядерных материалов с 3 тыс. долл. США в 1980 г. до 1 тыс. долл. США в 1995 г. позволило увеличить количество ядерного материала под гарантиями без реального роста бюджета Департамента [4]. Это являлось ярким примером, иллюстрирующим потенциал возможного повышения эффективности системы гарантий, и определяло ее развитие в течение практически двух десятилетий.

Реализовавшийся сценарий развития ядерной энергетики и ее топливного цикла привел к ряду проблем, в итоге вызвавший озабоченность мирового сообщества по поводу эффективности инспекционной деятельности. Пьер Гольдшмит² отмечает: «Гарантии Агентства осуществляются в течение полутора десятилетий при почти полном отсутствии реального роста бюджета... Резервы дальнейшего повышения эффективности и перераспределения персонала для выполнения возросших требований без ущерба для качества работы исчерпаны» [5].

Финансовые ограничения стали реальной проблемой. Связанный с этим риск снижения качества инспекционной деятельности и соответственно доверия к результатам работы Департамента гарантий и МАГАТЭ в целом, вызванный неуклонным ростом ядерного материала, находящегося под гарантиями Агентства, существенно возрос. Бюджет был фактически заморожен в течение 15 лет и на период с 1998 по 2003 гг., составил в среднем порядка 105 млн. долл. в ценах 2003 г. [6].

Временным решением в сложившихся условиях развития виделось повышение бюджета Департамента гарантий, увеличение которого достаточно проблематично в связи с существующей структурой финансирования Агентства. Тем не менее, бюджет увеличился после 47-й Генеральной конференции в 2003 г. (рис. 2 [6]), что еще раз свидетельствует об озабоченности мирового сообщества ситуацией вокруг инспекционной деятельности, характеризующейся специалистами как неадекватное нынешним условиям [1].

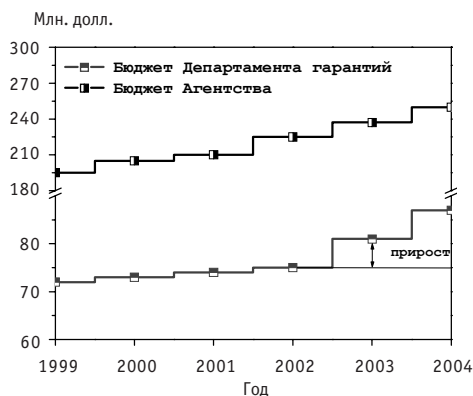


Рис. 2. Бюджет Департамента гарантий

Тенденции развития топливного цикла и их влияние на масштабы инспекционной деятельности

Проанализируем причины, которые привели к этим последствиям. К наиболее значимым факторам можно отнести следующие три обстоятельства:

- возрастание количества ядерного материала, поставленного под гарантии;
- подписание дополнительных протоколов рядом стран;
- применение усовершенствованных средств контроля за незаявленной ядерной деятельностью.

Однако наиболее существенный вклад, по мнению специалистов, вносит первая причина [3].

Количество ядерного материала, поставленное под гарантии Агентства, устойчиво росло в течение предыдущих десятилетий и динамика изменения его структуры представлена на рис.3 [7]. Доля плутония по состоянию на 2004 г. в единицах SQ интегрально составляет порядка 85 % (рис. 4) и, очевидно, что именно он определяет основные затраты на инспекционную деятельность Агентства [8].

² Пьер Гольдшмит - заместитель Генерального директора МАГАТЭ по гарантиям с 1999 по 2005 гг.

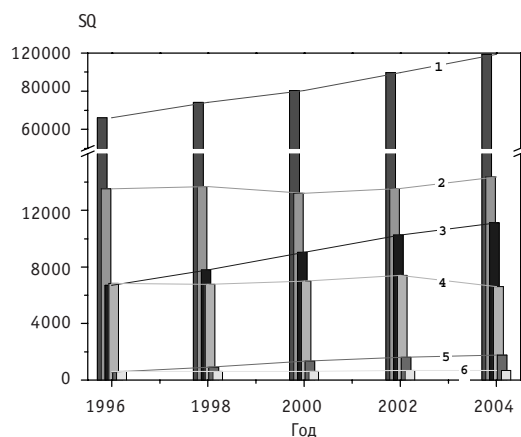


Рис. 3. Динамика изменения структуры ЯМ (в единицах SQ), поставленных под гарантии: 1 – плутоний в облученном топливе, 2 – НОУ, 3 – выделенный плутоний, 4 – сырьевые материалы, 5 – плутоний в свежем топливе, 6 – ВОУ

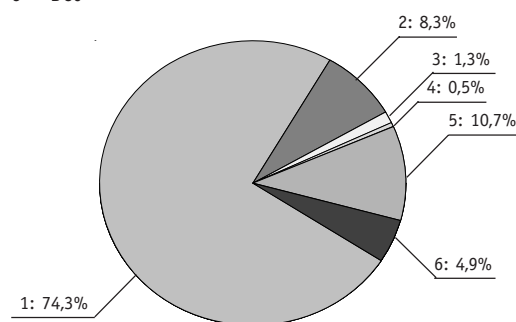


Рис. 4. Структура ЯМ (в единицах SQ), находящихся под гарантиями в 2004 г. 1 – плутоний в облученном топливе; 2 – выделенный плутоний; 3 – плутоний в свежем топливе; 4 – ВОУ; 5 – НОУ; 6 – сырьевые материалы

Такая структура ядерных материалов, поставленных под гарантии, является отражением современной тенденции накопления в мире различных форм плутония. Так, например, накопление выделенного гражданского плутония будет сохраняться, как минимум, до 2010 г. Это обусловлено дисбалансом его наработки и потребления (примерно 30 тPu/г против 12 тPu/г соответственно). Декларированные запасы плутония в странах, принявших на себя принципы обращения с плутонием по состоянию на 2001 г. составили порядка 230 т [9]. К гражданскому плутонию следует присовокупить и плутоний, выводимый из оборонных программ, суммарно составляющий порядка 70 т.³

Есть основания полагать, что относительный вклад других ядерных материалов (НОУ, ВОУ, сырьевые материалы) в общий баланс будет уменьшаться со временем в связи с вовлечением их в энергопроизводство и соответственно сокращением их складских запасов, а также продолжением тенденции накопления плутония в различных формах. Элементарные оценки показывают, что в мире производится порядка 7 кг плутония в час, что не может не вызывать настороженность мирового сообщества.

В настоящее время под гарантии поставлено чуть более 50% от всего количества наиболее привлекательных ядерных материалов, принадлежащих гражданской ядерной энергетике (табл. 1). В основном это материалы неядерных государств. Отсутствие прогресса в процессе разоружения в ядерных странах вызывает

Таблица 1

Оценка количества гражданских ядерных материалов и материалов, поставленных под гарантиями

	Оценки количества ядерного материала [9]	Поставлено под гарантии
ВОУ	175 т	32 т (667 SQ)
Выделенный плутоний	238 т (+ ~70 т. избыточный для целей обороны)	89 т (11124 SQ)
Плутоний в ОЯТ	1334,5 т	795,1 т (99395 SQ)
Плутоний в свежем топливе	33,2 т	14,3 т (1777 SQ)

³ Межправительственное Соглашение об утилизации плутония, заявленного как плутоний, не являющийся более необходимым для целей обороны, между США и Российской Федерацией было подписано в 2000 г.

ет недовольство в остальных государствах, которые все настойчивее начинают требовать распространение на гражданский сектор ядерных стран полномасштабных процедур гарантий. Очевидно, что увеличение количества ядерных материалов, находящихся под гарантиями в 2 раза, даже если это произойдет постепенно, вызовет обострение и без того серьезных проблем с финансированием инспекционной деятельности Агентства.

Сохранение тенденций развития индустрии топливного цикла, как минимум, в краткосрочной перспективе дает основания полагать, что замедление темпа роста количества ядерного материала, находящегося под гарантиями в будущем, не произойдет. Напротив, в том случае, если произойдет ренессанс ЯЭ, о котором все чаще говорят эксперты, то темпы роста увеличатся в несколько раз, и режим гарантий обязательно вновь столкнется с серьезными финансовыми и кадровыми проблемами в будущем [11].

Именно поэтому оказывается крайне важным координация усилий Департамента гарантий Агентства с национальной политикой обращения с ядерными материалами, направленных на придание топливному циклу такой структуры, в которой фактор масштаба существенно не отражался бы на стоимости осуществления инспекционной деятельности Агентства. Кардинальным решением проблем является вовлечение плутония в энергопроизводство, которое не только сократит его складские запасы, но и ограничит темпы ввода мощностей обогатительных предприятий, что коррелируют с новыми инициативами, нацеленными на укрепление режима нераспространения [1].

Для ответа на вопрос, каким образом должен быть реализован процесс циркуляции топлива в цикле, который обеспечивал бы нечувствительность средств поддержания режима нераспространения к масштабам ЯЭ, рассмотрим факторы, определяющие эффективность системы гарантий и теоретический инструментарий, позволяющий осуществлять такие оценки.

Факторы, определяющие эффективность системы гарантий и их связь с эвристическими моделями оценки риска распространения

Цель проведения инспекций – своевременное определение переключения значимого количества ядерного материала. Два основополагающих параметра, на основе которых строится вся техническая структура гарантий, – это значимое количество и своевременность обнаружения⁴. В соответствии с критериями по гарантиям в зависимости от количества и физико-химического состояния ядерных

материалов определяются частота инспекций на ту или иную установку, трудозатраты и соответственно стоимость инспекционной деятельности [12,13]. В табл. 2 представлены величины значимых количеств различных ядерных материалов и время, необходимое для их конверсии в оружейно-пригодную форму.

Расчет стоимости проведения инспекции является прямым методом, позволяющим оптимизировать инспекционную деятель-

Таблица 2

Значимые количества и длительность конверсии форм ЯМ

	Значимое количество	Длительность конверсии
Плутоний выделенный	8 кг	7–10 дней
Плутоний в смеси	8 кг	1–3 недели
Плутоний в ОЯТ	8 кг	1–3 месяца
ВОУ выделенный	25 кг	7–10 дней
ВОУ в смеси	25 кг	1–3 недели
ВОУ в ОЯТ	25 кг	1–3 месяца
НОУ	75 кг	3–12 месяцев

⁴ Параметр «время обнаружения» по порядку величины равен длительности конверсии материала, находящегося на разных стадиях топливного цикла, в оружейно-пригодную форму.

ность, но его использование ограничено объемами доступной для анализа информации. Однако ряд выводов может быть сделан на основе приблизительных оценок. Так, например, в работе [14] на основе расчета стоимости трудозатрат на инспектирование инновационной установки с быстрым натриевым реактором и сопутствующими предприятиями топливного цикла (перерабатывающий завод, хранилище выделенного плутония и завод по производству смешанного топлива), сделан вывод о том, что затраты на осуществление гарантий Агентства на предприятиях топливного цикла примерно от 5 до 30 раз выше, чем затраты на осуществление гарантий Агентства непосредственно на АЭС. Это, как утверждают авторы, приводит к тому, что для снижения затрат на поддержание режима нераспространения необходима централизация услуг по переработке ОЯТ и изготовлению свежего топлива при минимально возможных складских запасах выделенного плутония, определяемых потребностями обеспечения перегрузки АЭС.

Остановимся на теоретических подходах, используемых при анализе проблемы нераспространения. Предложенные в последнее время модели оценки риска распространения на базе методов системного анализа позволяют углубиться в понимание проблемы, избежав при этом объективных сложностей, связанных с отсутствием конкретной информации по инспекционной деятельности, но также они дают возможность учесть наиболее важные системные факторы.

Разработанные к настоящему моменту модели количественной оценки риска распространения для всего топливного цикла можно условно разделить на две группы: так называемые «сценарные» и атрибутивные модели. Большинство из них основано на следующих методах – Делфи, сравнительных оценок, многофакторного анализа, вероятностного анализа риска, нечетких множеств и интервальной алгебры.

Некоторые из атрибутивных подходов были распространены на анализ развивающихся ядерно-энергетических систем для того, чтобы учесть фактор масштаба ядерной энергетики, динамику ее развития и всевозможные системные ограничения [15–19]. В этой области наибольшее распространение получили методы мультиатрибутивного анализа. Один из эвристических упрощенных подходов, который был успешно использован в ряде исследований по оценке перспектив развития ядерной энергетики – «подверженность риску распространения» – был предложен Р. Краковски (Лос-Аламос) [15]. Этот подход представляет собой гибрид более ранней работы в этой области П. Силвенноинена и А. Папазаглоу [17,18]. С целью конкретизировать этот подход и придать ему практическую значимость в работе Р. Брогли [19] метод получил дальнейшее развитие, где был связан с методологией уровней привлекательности (attractiveness level), разработанной Министерством энергетики США и предназначенной для классификации ядерных материалов.

В основе всех вышеупомянутых подходов лежит учет следующих трех факторов: (1) количество ядерного материала, (2) его привлекательность с точки зрения использования в оружейных программах и (3) длительность обращения с материалами в определенной точке топливного цикла.

Основную трудность при работе с этими моделями представляют оценки фактора привлекательности вследствие субъективности при ее определении. Ситуацию не изменяют и использование новейших математических аппаратов, таких как нечеткие множества и интервальная алгебра. Однако важным оказывается следующее обстоятельство: оценки, проведенные на основе различных подходов, как показано в [21], приводят к качественно одинаковым тенденциям, что говорит о наличии точек соприкосновения в различных подходах, и тем самым возможности их включения в самосогласованный пакет инструментов оценки риска распространения.

Техническая структура гарантий, по сути, строится на тех же принципах: более привлекательный материал, у которого наименьшее время конверсии в оружей-

но-пригодную форму, следует чаще и тщательнее inspectировать. Различие лишь проявляется в нормативах, регламентирующих деятельность Департамента гарантий Агентства. Для иллюстрации этого утверждения на рис. 5 представлены в относительных единицах параметры, определяющие частоту inspectирования и факторы привлекательности плутония (по материалам работы [20], в которой была использована методика Р. Краковски). Четко прослеживаемая корреляция этих величин позволяет говорить об отражении в этом подходе основных факторов, регулирующих инспекционную деятельность. В следующем разделе при анализе инновационного развития ЯЭ на базе быстрых реакторов будут обсуждены результаты расчетов на основе методики Р. Краковски.

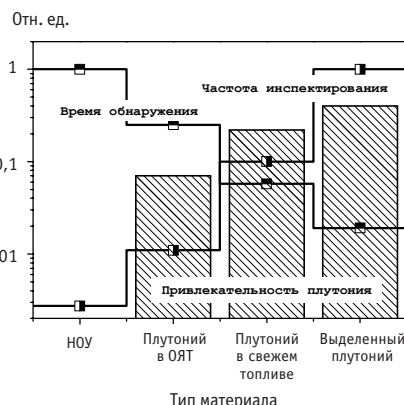


Рис. 5. Корреляция параметров inspectирования и факторов привлекательности плутония (методика Р. Краковски)

В заключение отметим, что опыт применения описанных подходов позволяет с уверенностью сказать, что они дают разумные и объяснимые результаты, позволяют не только выявлять проблемы, но и намечать пути их решения, тем самым способствуя оптимизации структуры ЯЭ и стратегии обращения с делящимися материалами в цикле по фактору нераспространения. Последнее является важным, поскольку имеет непосредственное отношение к повышению эффективности мер поддержания режима нераспространения.

СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ПЛУТОНИЯ В ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ

В предыдущем разделе было показано, что плутоний определяет наиболее значимый вклад в полное количество ядерных материалов поставленных под гарантии и, тем самым, затраты на inspectирование материалов, содержащих плутоний, оказываются существенными. Поэтому крайне важным оказывается определение наиболее вероятной динамики накопления плутония в топливном цикле при возможных сценариях развития ЯЭ, а также ответ на вопрос – как можно эффективно уменьшить его количество в цикле?

Тенденции накопления плутония при эволюционном сценарии развития

Оценим динамику накопления плутония в топливном цикле при экстраполяции в будущее современных тенденций развития ядерной энергетики и сохранении сложившихся инфраструктурных ограничений. Под этим подразумевается, что реализуются намерения ряда стран в плане перевода части своего реакторного парка на смешанное уран-плутониевое оксидное топливо (МОХ), как потенциальная возможность снижения темпов накопления гражданского плутония и сокращения потребления природного урана.

При расчетах приняты следующие предположения. Рассмотрены два типа тепловых реакторов: легководные реакторы с водой под давлением, использующие урановое и смешанное оксидное топливо (1/3 загрузки МОХ-топлива в активные зоны реакторов с однократным рециклом плутония) и тепловые реакторы с малой глубиной выгорания топлива. Было принято, что через 5 лет перерабатывается 30 % от всего выгружаемого из легководных реакторов отработавшего уранового топлива. В качестве опорных точек при расчетах были использованы декларированные запасы выделенно-

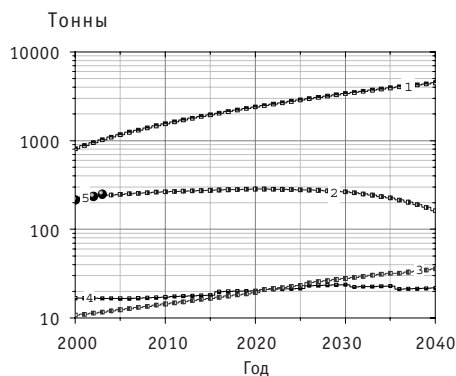


Рис. 6. Изменение количества плутония в ЯТЦ: 1 – плутоний в ОЯТ, 2 – выделенный плутоний, 3 – потребляемый плутоний, 4 – ежегодно складированный плутоний, 5 – декларированные запасы плутония

го гражданского плутония [9].

Расчеты показывают, что для сценария роста ЯЭ в 1% в год и выполнения странами принятых на себя обязательств по обращению с плутонием, накопление полного количества выделенного плутония начнет уменьшаться со второй половины следующего десятилетия, достигнув максимума в 300 т ориентировочно в 2020г. Дальнейшее снижение складских запасов плутония будет проходить со средним темпом в 6 т/г (рис.6). Однако количество плутония в отработавшем топливе будет продолжать расти, дойдя к середине века до величины порядка 5.7 тыс.т. В подобной ситуации говорить о снижении трудозатрат на инспекционную дея-

тельность не приходится. В структуре ядерных материалов поставленных под гарантии возрастет доля плутония, заключенного в отработавшем топливе, снижение запасов которого будет проблематично при сохранении современных тенденций развития в дальнейшем.

Многokrатный рецикл плутония: преимущества с точки зрения нераспространения

Как известно, плутоний не может быть многократно рециклирован в традиционных легководных реакторных системах – количество возможных рециклов ограничено проблемами снижения их уровня безопасности. Поэтому для оценки преимуществ многократного возврата плутония в энергопроизводство, рассмотрим его рецикл в инновационной реакторной установке с быстрым реактором без расширенного воспроизводства топлива. Будучи внедренными в структуру ядерной энергетики, эти установки способны эффективно вовлечь в энергопроизводство плутоний практически любого изотопного состава, существенно уменьшить его складские запасы, а также перейти в перспективе в режим самообеспечения топливом, не приводя к накоплению плутония во внешнем топливном цикле.

Оптимизация по критерию минимизации подверженности риску распространения в рамках подхода Р. Краковски, о котором говорилось ранее, проведенная в работе [22], позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, для снижения интегрального риска распространения плутония необходимо прекращение его выделения и по возможности форсировать вовлечение плутония в энергопроизводство. Во-вторых, в случае доступности нескольких форм плутония, порядок вовлечения в энергопроизводство определяется степенью его опасности, что, однако, может приводить к временной наработке менее привлекательных форм плутония, вызванной инерционностью процессов топливообмена в цикле и системными ограничениями. В-третьих, несмотря на возможные различные начальные условия развития и разнообразные переходные процессы в ходе развертывания системы, рассматриваемые инновационные установки позволяют перейти в перспективе на развитие, при котором в каждой точке топливного цикла отсутствует накопление плутония и выполняется баланс наработки и его необратимого потребления.

Для иллюстрации на рис.7 приведен прирост интегрального количества плутония в топливном цикле, в независимости от его формы, как функция темпа роста спроса на ядерное электричество и стратегии обращения с ядерными материалами (открытый топливный цикл с промежуточным хранением ОЯТ и накопленного

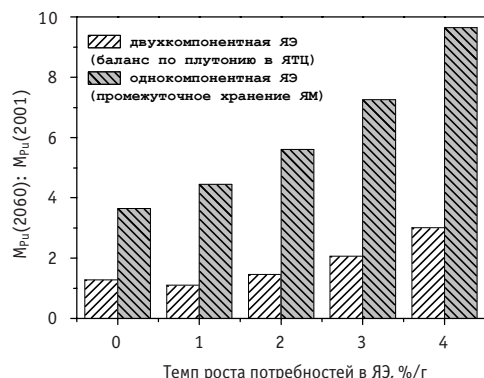


Рис. 7. Прирост полного количества плутония за 60 лет

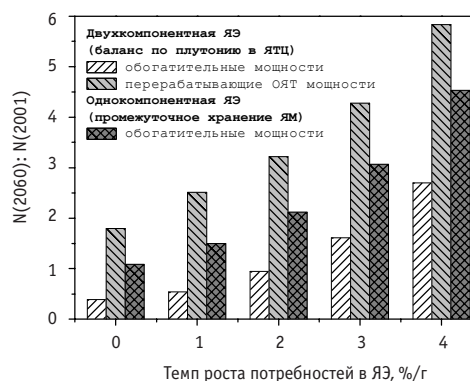


Рис. 8. Прирост средних потребностей в мощностях предприятий топливного цикла

плутония, а также замкнутый топливный цикл с балансом по плутонию в двухкомпонентной ЯЭ). Как видно из рис.7 в случае реализации инновационного сценария развития ЯЭ темпы прироста плутония становятся менее чувствительны к масштабу ЯЭ.

Отметим также, что острая потребность в строительстве новых обогатительных заводов, вызванная повышенным спросом на услуги топливного цикла, уменьшается более чем в два раза, но при этом средний прирост потребностей в мощностях перерабатывающих заводов увеличивается в 6 раз (рис. 8). В связи с этим возникает вопрос о возможном региональном распределении мощностей предприятий топливного цикла: будут ли они размещены только в ядерных странах, имеющих всю необходимую ядерно-энергетическую инфраструктуру или во вновь построенных международных центрах топливного цикла. Однако поиск ответа на этот вопрос выходит за рамки данной работы.

Безусловно, экономически реализация такой стратегии развития не представляется целесообразной при современных ценах на услуги топливного цикла, даже с учетом затрат на инспекционную деятельность по контролю за всеми гражданскими ядерными материалами. Как показывают оценки, полные затраты за временной интервал в 40 лет будут в ~1.3 раза больше, чем затраты с однократным рециклом плутония в быстрых реакторах. Противоречие национальных программ по развитию индустрии топливного цикла, основанных на экономических соображениях и глобальными потребностями снижения риска распространения, должно быть снято с помощью адекватного компромисса, поиск которого представляется весьма актуальным.

ВЫВОДЫ

Ожидаемое интенсивное развитие ядерной энерготехнологии в ближайшее десятилетие может привести к серьезным проблемам обеспечения эффективности существующей международной системы гарантий. Для предотвращения этого необходима координация работ в области топливного цикла на национальном, региональном и глобальном уровнях и гармонизация их со сложившейся практикой проведения инспекций.

Замыкание топливного цикла по всем представляющим опасность нуклидам и многократный рецикл их приведет к тому, что риск, связанный с возможностью хищения ядерных делящихся материалов, будет пропорционален мощности ядерной энергетики, а не интегральной энерговыработке.

Централизация услуг по переработке отработавшего и изготовлению свежего топлива, минимизация складских запасов ядерных материалов, пригодных для со-

здания ядерных взрывных устройств, существенно сократит затраты на поддержание режима нераспространения и в конечном счете будет способствовать приданию топливному циклу такой структуры, при которой масштабный фактор развивающейся системы ядерной энергетики не отразится существенно на стоимости инспекционной деятельности Агентства.

Литература

1. *ElBaradei M.* Toward a Safer World. – The Economist, 16 October 2003.
2. *Архангельский И.А. и др.* Система международного контроля за мирным использованием атомной энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. IAEA Safeguards Implementation Report for 2004.
4. *Лелло Б.* Гарантии: общая картина/Бюллетень МАГАТЭ, ежеквартальный журнал Международного агентства по атомной энергии. Т. 38. – Вена, Австрия, 1996. – №4. – С. 2-6.
5. *Гольдшмит П.* Укрепленные гарантии: решая текущие и будущие задачи/ Бюллетень МАГАТЭ, ежеквартальный журнал Международного агентства по атомной энергии. Т. 43. – Вена, Австрия, 2001. – № 4. – С. 6-11.
6. *Persbo A., Mayo B. and Peterson M.* An Overview of the Evolution, Operation and Status of Nuclear Safeguards. Доступно на сайте www.verifor.org/case_studies/NuclearSafeguards.pdf
7. IAEA Annual Reports, 1997 – 2004.
8. *Pellaud B.* Proliferation aspects of plutonium recycling. Journal of Nuclear Materials Management. – 2002. – Vol. XXXI. – №1.
9. Информационный циркуляр МАГАТЭ 549.
10. *Albright D., et al.* Global Stocks of Nuclear Explosive Materials, 2005, www.isis-online.org.
11. The IAEA Safeguards System: Ready for the 21st Century. 1997. Доступно на сайте: <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/>
12. IAEA Safeguards Glossary, 2001.
13. *Пшакин Г.М. и др.* Ядерное нераспространение. – М.: МИФИ, 2006.
14. Опробование методологии ИНПРО на примере инновационной технологии быстрых реакторов с натриевым охлаждением и соответствующим топливным циклом: Отчет ФЭИ. Инв. № 11435, 2004.
15. *Krakowski R.* Review of Approaches for Quantitative Assessment of the Risks of and Resistance to Nuclear Proliferation from the Civilian Nuclear Fuel Cycle Los Alamos. National Laboratory document LA-UR-01-169.
16. *Heising C.D., Saragossi I., and Sharafi P.* A Comparative Assessment of the Economics and Proliferation Resistance of Advanced Nuclear Fuel Cycles. Energy 5, 1131, 1980.
17. *Silvennoinen P. and Vira J.* Quantifying Relative Proliferation Risks from Nuclear Fuel Cycles. Prog. Nucl. En. 17(3), 231, 1986.
18. *Papazoglou A., Gyftopoulos E. P., Miller M. M., Rasmussen N. C., and Raiffa A.* A Methodology for the Assessment of the Proliferation Resistance of Nuclear Power Systems. Massachusetts Institute of Technology report MIT-El 78-02/022. September, 1978.
19. *Brogli R. and Krakowski R. A.* Proliferation and the Civilian Nuclear Fuel Cycle: Towards a Simplified Recipe to Measure Proliferation Risk. Paul Scherrer Institute document PSI Bericht Nr. (01-10. August, 2001).
20. *Poplavsky V.M., Chebeskov A.N. Korobeynikov V.V., Tikhomirov B.B.* Comparative analysis of risk of proliferation in open and closed fuel cycles/ Multilateral Technical and Organizational Approaches to the Nuclear Fuel Cycle aimed at Strengthening the Non-Proliferation Regime. Moscow. Russian Federation (July 13 – 15, 2005).
21. *Man-sung Yim, Jun Li, McNelis D.* Further study of a fuzzy logic based barrier method for quantitative assessment of proliferation resistance of nuclear reactor systems. Abstracts of the 47-th INMM Annual Meeting (July 16-20, 2006). – Nashville, Tennessee, USA. – P.125.
22. *Andrianov A.A.* Minimization of proliferation risk exposure on the phase of transition to two-component nuclear power system. Abstracts of the 47-th INMM Annual Meeting (July 16-20, 2006). – Nashville, Tennessee, USA. – P.131.

Поступила в редакцию 20.12.2006

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.543.4

Increasing of Security of Export Deliveries of Light Water Fuel due to Recycled Uranium Utilization \ P.N. Alekseev, E.A. Ivanov, V.A. Nevinitza, N.N. Ponomarev-Stepnoi, A.N. Rumyantsev, V.M. Shmelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References – 9 titles.

In current paper we consider a possibility of decreasing proliferation risk, dealing with export deliveries of light water reactors fuel. It is shown, that implementation of recycled uranium make it possible to create fuel with intrinsic self-protection properties relatively diversion scenarios in case of IAEA safeguards breakdown.

УДК 621.039

Analysis of the Influence of Possible Nuclear Energy Development Scenarios on the Scale of Inspection Activity to Maintain the Nonproliferation Regime \ A.A. Andrianov, Yu.A. Korovin, G.M. Pshakin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 2 tables, 8 illustrations. – References – 22 titles.

An analysis of the influence of the possible nuclear energy development scenarios on the scale of inspection activity to maintain the nonproliferation regime is presented in the paper. The study was done based on nuclear energy development models by estimating the dynamics of nuclear materials growth and composition change for different development scenarios and strategies of nuclear materials management in the nuclear fuel cycle. The analysis was performed both for the evolutionary development scenario, assuming conservation of the present-day infrastructure and extrapolation of the current trends of nuclear energy development into the future, and for the innovative development scenario, assuming introduction of innovative nuclear reactor systems into the nuclear energy mix and solution of urgent problems of nuclear energy by means of these systems.

УДК 621.039.54: 004.42

Application of Message Model for Optimization of Two-Component Structure of a Large-Scale Nuclear Power System \ S. Yugay, V. Korobeynikov, M. Bock, Yu. Korovin, E. Fedorova, A. Andrianov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 3 tables, 6 illustrations. – References – 4 titles.

The results of modeling the two-component structure of Russian nuclear power are presented. The assessment of each components share in total electricity generation at NPPs is made. The investigation results demonstrate the application of a software tool MESSAGE for optimizing the structure of energy systems with closed fuel cycle.

УДК 621.039.543.4

Enriched uranium with addition of ^{232}U : protection against uncontrolled proliferation \ E.F. Kryuchkov, V.A. Apse, V.B. Glebov, A.S. Krasnobaev, A.N. Shmelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 2 tables, 1 illustration. – References – 12 titles.

The work considers a way of forming of inherent protective properties of nuclear materials and, first of all, enriched uranium. Protective barriers produced by incorporation of small additions of ^{232}U into the fuel are considered. It is shown that a radiation barrier produced by decay of ^{232}U and daughter products of its radiation chain is more stable in time than a barrier produced by fissile products. At that incorporation ^{232}U into the fuel has positive effect for a system neutron balance.

It is analyzed a protective barrier on the way of unauthorized use of isotope separation technologies for enrichment of uranium which contains ^{232}U . Incorporation of ^{232}U into the uranium hexafluoride leads to make a protective radiochemical barrier on the way of possible unauthorized uranium