

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ РИСКОВ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ

А.А. Андрианов

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, г. Обнинск



Представлена методика и приведены примеры использования подхода к оценке привлекательности сценариев пролиферации¹ с использованием методов поддержки принятия решений при многих критериях, сформулированной в виде задачи многокритериальной оптимизации, позволяющей учесть как особенности национальной ядерной инфраструктуры, так и возможные стратегии поведения пролифератора.

Ключевые слова: распространение, оценка риска, ядерный топливный цикл, многокритериальная оптимизация.

Key words: proliferation, risk assessment, nuclear fuel cycle, multi-objective optimization.

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние в области количественной оценки рисков несанкционированного распространения характеризуется отсутствием согласованной и общепринятой методологии оценки риска и, как следствие, в общем случае, процедура принятия решения не формализована многообразием так называемых «атрибутивных» и «сценарных» моделей оценки риска, а также ориентацией на анализ ситуаций, в которых пролифератором является государство [1, 2].

К некоторым последним тенденциям развития расчетного инструментария в данной предметной области следует отнести включение в рассмотрение ситуаций, в которых пролифератором могут быть негосударственные субъекты² (террористические группировки, криминальные элементы и пр.); учет наличия нескольких целей (многокритериальность задачи), динамики развития событий и неопределенности исходных данных; построение модели пролиферационного акта для выявления связи между переменными модели и их связи с индикаторами риска.

Недостаток сценарных подходов к оценке рисков несанкционированного распространения, основанных на математическом аппарате вероятностного анализа безопасности, управляемых конечных марковских цепей и ряда других, заключа-

¹ Здесь и далее используется непосредственный перевод англоязычной терминологии, широко используемой в данной предметной области в рамках крупнейших международных проектов.

² Non-State actors – негосударственные субъекты (терминология из глоссария МАГАТЭ).

ется в том, что в их рамках возможно рассмотрение только относительно небольшого количества сформулированных экспертом сценариев. Это связано прежде всего с трудоемкостью процесса подготовки исходных расчетных данных, необходимых для количественной характеристики сценариев. Как следствие, «смешенные» сценарии пролиферации (единовременная реализация комбинации нескольких исходных сценариев с достижением по каждому из них частичного успеха) из рассмотрения выпадают.

Боле того, считая, что пролифератор обладает необходимыми компетенциями, следует признать, что он стремится всевозможными путями повысить эффективность своих действий (снизить время пролиферации, затраты и прочие показатели, характеризующие конкретный сценарий). В связи с этим возникает задача многокритериальной оптимизации, позволяющая учитывать особенности национальной ядерной инфраструктуры и возможные стратегии поведения пролифератора. В результате решения этой задачи можно определить наиболее желательные для пролифератора сценарии и дать информацию для экспертов по выявлению наиболее уязвимых мест национальной ядерной инфраструктуры. В частности, информация, полученная из анализа возможных сценариев поведения пролифератора, может быть использована для регламентирования проверок систем безопасности, оценки вклада различных факторов и систем в показатели защищенности и выбора приоритетных направлений по ее повышению.

Данного рода анализ может быть осуществлен на основе атрибутивных подходов, которые в этом контексте является естественным дополнением к сценарным. Их использование позволяет сформулировать набор сценариев для последующего рассмотрения в рамках вероятностных моделей и оценить чувствительность к исходным данным, выявив тем самым значения необходимых параметров, которые могут быть задействованы пролифератором при реализации определенного сценария.

Следует отметить, что оценку наиболее привлекательных вариантов следует проводить с использованием методов поддержки принятия решений при многих критериях, потенциал которых в настоящий момент не реализован должным образом в данной предметной области. Это связано с тем, что априорно невозможно сформулировать интегральный показатель риска, поэтому предварительно следует определить взаимосвязи между отдельными составляющими риска и идентифицировать мотивации, намерения, потенциальные возможности пролифератора, после чего можно либо предложить способ их агрегирования, либо сформировать набор критериальных ограничений. Это позволяет учитывать особенности пролифератора и специфику системного окружения [3].

Такой подход может быть отнесен к категории «интегрированные подходы к оценке риска», основанные на объединении нескольких методик и направленные на устранение недостатков, присущих отдельным методикам, и расширение сферы их возможного приложения. Предложенная методика оценки риска построена на основании объединения сценарных и атрибутивных подходов с использованием методов поддержки принятия решений при многих критериях.

ОПИСАНИЕ ПОДХОДА

Множество неуплучшаемых решений

В отличие от традиционных подходов к выбору оптимального решения, в которых решение выбирается на основании одного из критериев или свертки нескольких, в рамках предлагаемого реализованы методы векторной постановки задачи, основанные на принципе компромисса, что обеспечивает приемлемое по совокупности значений факторов решение [4, 5].

Данный подход является основой большинства современных методов принятия решений при многих критериях, где базовым понятием служит понятие множества недоминируемых решений – множество Парето. Следует отметить, что любое из решений, принадлежащих множеству Парето, не может быть улучшено одновременно по всем частным критериям.

ОБЩАЯ СХЕМА ПОДХОДА

Описанную методологию можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рис. 1.

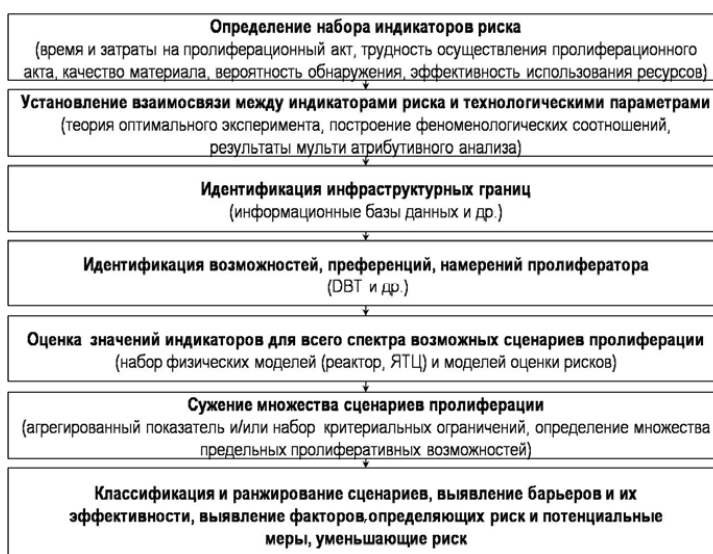


Рис. 1. Схема подхода

Индикаторами могут быть следующие показатели [1]: время пролиферации (PT – Proliferation time); затраты на пролиферационный акт (PC – Proliferation cost); трудности осуществления пролиферационного акта (PTD – Proliferation technical difficulty); качество делящегося материала (FMT – Fissile material type); вероятность обнаружения (DP – Detection probability); эффективность использования средств обнаружения (DRE – Detection resource efficiency).

Вид каждого из индикаторов может быть определен на основе построения модели поведения нарушителя и модели средств реагирования. В рассмотрение могут быть включены инфраструктурные особенности, отражающиеся в виде формируемых дополнительно ограничений.

Для реализации данного подхода были разработаны диалоговая система стохастической многокритериальной оптимизации и интерактивная система визуального анализа границ множества достижимости.

Способы учета стратегии поведения пролифератора

Способы определения набора сценариев, учитывающих стратегии поведения пролифератора, могут состоять в формировании критериальных ограничений и построении агрегированного показателя.

Формирование критериальных ограничений. После того как определен набор предельных осуществимых сценариев, совокупность которых удовлетворяет условию парето-эффективности, для окончательного отбора необходимо задать совокупность ограничений на индикаторы, отражающие возможные предпочтения

пролифератора, и отобрать из набора предельных осуществимых сценариев удовлетворяющие данной совокупности ограничений:

$$\begin{aligned} PT_{\min} \leq PT_i \leq PT_{\max}, \\ PC_{\min} \leq PC_i \leq PC_{\max}, \\ \dots \\ DRE_{\min} \leq DRE_i \leq DRE_{\max}. \end{aligned}$$

Построение агрегированного показателя. Интегральный показатель риска конкретного сценария может быть оценен в относительных единицах в виде мультипликативной свертки по каждому сценарию. Параметры свертки могут быть определены экспертно на основании многофакторного сопоставления взаимосвязи индикаторов риска и определения предпочтений пролифератора:

$$R_i = \left[\left(\frac{PT_i}{\min(PT)} \right)^{k_{PT}} \cdot \left(\frac{PC_i}{\min(PC)} \right)^{k_{PC}} \times \left(\frac{PTD_i}{\min(PTD)} \right)^{k_{PTD}} \times \left(\frac{FMT_i}{\max(FMT)} \right)^{k_{FMT}} \times \left(\frac{DP_i}{\min(DP)} \right)^{k_{DP}} \times \left(\frac{DRE_i}{\min(DRE)} \right)^{k_{DRE}} \right]^{-1}.$$

Стратегия поведения пролифератора может быть «агрессивной» (пролифератор стремится достичь своей цели за кратчайшее время, не скупясь на ресурсы), «скрытой» (пролифератор стремится с наименьшими затратами достичь своей цели, сделав максимально незаметными свои действия), «умеренной» (пролифератор стремится с умеренными рисками обнаружения, затратами и за приемлемое время достичь своей цели).

Ниже представлена серия примеров использования описанной методики, которые по мере необходимости могут быть расширены и конкретизированы, а описанная методика может быть применена и для других элементов ядерной инфраструктуры. Несмотря на модельный характер задач, описанная методика может быть использована в системах поддержки принятия решений по оценке уязвимости национальной ядерной инфраструктуры.

ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Оценка привлекательности сценариев незаявленного производства ВОУ с использованием центрифужной технологии

Постановка задачи и исходные предположения. Задача заключается в оценке привлекательности сценариев незаявленного производства высокообогащенного урана (ВОУ) в количестве 1 SQ с учетом стратегий поведения пролифератора при условии, что у него уже имеется каскад по обогащению и возможность добавлять к этому каскаду новые центрифуги.

Исходными сценарными параметрами являются количество центрифуг в первоначальном каскаде, годовая разделительная работа центрифуги, единичная мощность каждой центрифуги, число центрифуг, добавляемых к каскаду ежедневно, тип исходного материала, обогащение отвалов.

На основании этой информации рассчитываются значения индикаторов сценариев производства 1 SQ ВОУ. Показателями, количественно характеризующими конкретный сценарий пролиферации, являются время производства 1 SQ (PT); затраты на сценарий, пропорциональные общему количеству используемых центрифуг (PC); показатель, пропорциональный мощности центрифуги (PTD); показатель, пропорциональный обогащению урана (FMT). Сделано предположение, что

каждая новая центрифуга легко добавляется к каскаду таким образом, что она может мгновенно внести вклад в совокупную работу разделения.

Пролифератор принимает решение о выборе наиболее привлекательного сценария на основании требований минимизации времени пролиферации, затрат, технической сложности и максимизации качества делящегося материала.

Взаимосвязь индикаторов риска с параметрами модели для различных сценариев хищения НОУ. Увеличение количества используемых центрифуг влечет увеличение затрат на реализацию данного сценария, но приводит к сокращению времени, необходимого для достижения цели пролифератора. На рисунках 2–5 приведена взаимосвязь различных индикаторов риска для случая, когда исходным материалом служит низкообогащенный уран (4%); обогащение ВОУ составляет 90%, а обогащение отвалов равно 1%. Мощность каждой центрифуги составляет 3 кг ЕРР в год. Начальное количество центрифуг варьировалось от 50 до 1500 и учитывалось, что пролифератор имеет возможность добавлять до 10 центрифуг ежедневно.

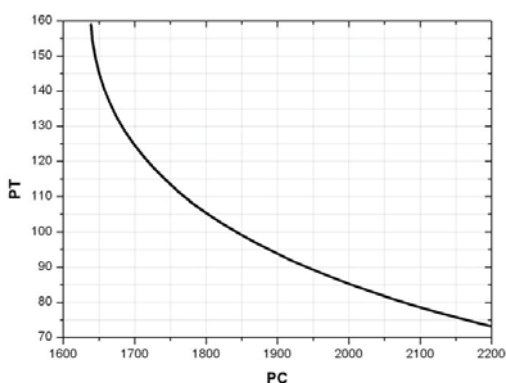


Рис. 2. Взаимосвязь индикаторов РТ (дней) и РС (у.е.)

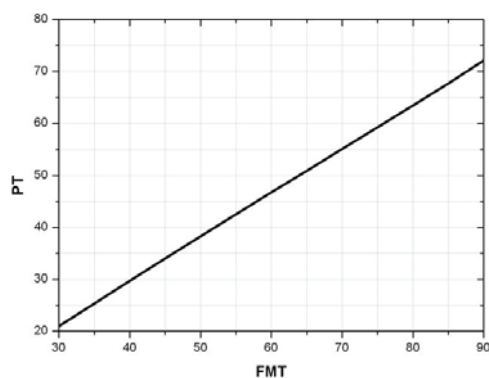


Рис. 3. Взаимосвязь индикаторов РТ (дней) и FMT (%)

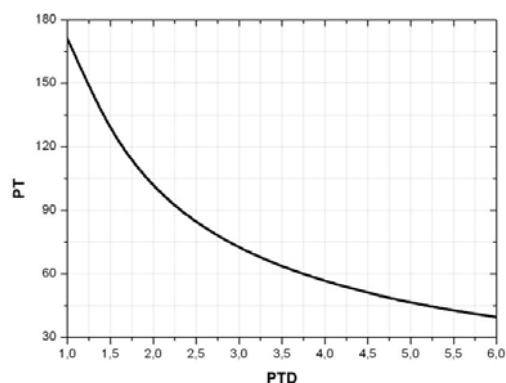


Рис. 4. Взаимосвязь индикаторов РТ (дней) и РТД (кг ЕРР/г.)

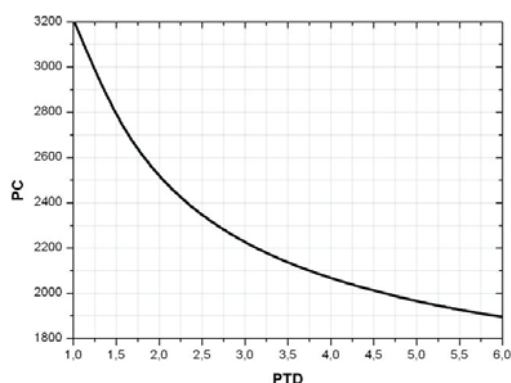


Рис. 5. Взаимосвязь индикаторов РС (у.е.) и РТД (кг ЕРР/г.)

Количественный анализ указанных зависимостей позволяет выявить затраты и выгоды в значениях различных индикаторов риска, связанные с реализацией определенного сценария пролиферации. В частности, может быть оценено насколько к снижению времени пролиферации ведет увеличение общего числа центрифуг, количества вновь добавляемых к каскаду центрифуг, производительность центрифуги, уровень обогащения исходного материала и отвалов, и насколько при

этом возрастут затраты на пролиферационный акт, техническая сложность реализации программы, вероятность обнаружения. Количественные показатели и вклад каждого из элементов могут быть получены на основе описанной модели.

Аппроксимация множества предельно достижимых сценариев пролиферации. Для определения предельно допустимых сценариев пролиферации необходимо осуществить аппроксимацию множества сценариев, удовлетворяющих условию парето-оптимальности и набору инфраструктурных ограничений (табл. 1).

Таблица 1

Инфраструктурные возможности

Параметр	Нижняя грань	Верхняя грань
Обогащение исходного урана, %	0.71	4
Обогащение ВОУ, %	90	
Обогащение отвалов, %	0.1	0.7
Начальное количество центрифуг, шт.	0	1000
Количество вводимых каждый день центрифуг, шт./дней	0	10
Производственная мощность одной центрифуги, кг ЕРР/г.	1	6

Предельные достижимые сценарии пролиферации – это сценарии, совокупность которых удовлетворяет условию парето-эффективности; для них значение любого из частных индикаторов можно улучшить только за счет ухудшения значений хотя бы одного из остальных индикаторов.

Данный этап необходим для того, чтобы исключить из рассмотрения явно неудовлетворительные для пролифератора по заданному набору индикаторов риска сценарии и оценить тем самым предельные пролиферационные возможности.

В пространстве индикаторов РТ, РС и РТD множество предельных пролиферационных возможностей имеет вид, представленный на рис.6. Расчеты сделаны в предположении, что целью пролифератора является производство 1 SQ ВОУ с 90%-ным обогащением.

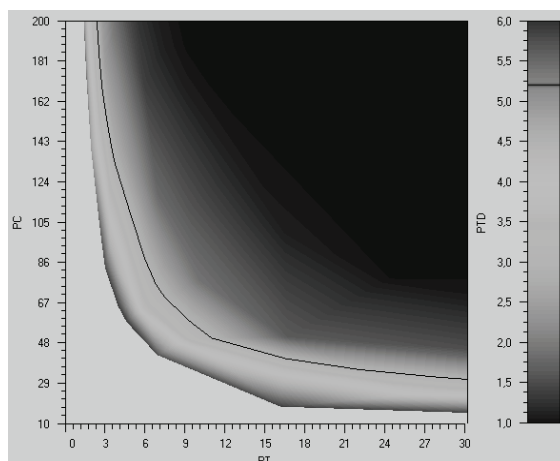


Рис. 6. Взаимосвязь индикаторов РТ (дней) , РС (у.е.), РТD (кг ЕРР/г.)

В конечном счете, для набора эффективных сценариев на основании сформулированных апостериорно агрегированных показателей риска или сформированного набора критериальных ограничений, индивидуальных для каждой из групп

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

пролифераторов, ранжируются сценарии пролиферации в зависимости от технологических возможностей пролифератора и его стратегии поведения.

В таблице 2 представлены индикаторы сценариев, удовлетворяющих условию парето-оптимальности, соответствующие определенным стратегиям поведения пролифератора; в табл. 3 – соответствующий набор параметров, определяющих достижимость данной совокупности индикаторов.

Таблица 2

Индикаторы сценария

Номер	РТ, дней	РС, у.е.	РТД, кг ЕРР/г.	FMT, %	Стратегия поведения
766	0.2	966.2	5.9	90	Агрессивный
648	182.5	9.3	1.7	90	Скрытый
44	71.7	58.0	1.1	90	Умеренный
404	32.0	72.3	1.6	90	
587	55.8	62.8	1.4	90	

Таблица 3

Технологические параметры сценариев

Номер	Начальное количество центрифуг, шт.	Количество вводимых каждый день центрифуг, шт.	Производственная мощность одной центрифуги, кг ЕРР/г.	Обогащение исходного урана, %	Обогащение отвалов, %	Обогащение ВОУ, %
766	964	7	5.9	3.9	0.6	90
648	6	0	1.7	1.6	0.6	90
44	46	0	1.1	1.0	0.3	90
404	11	2	1.6	1.8	0.6	90
587	14	1	1.4	1.2	0.5	90

Оценка привлекательности сценариев производства делящихся материалов с использованием мощностей по переработке ОЯТ и обогащению урана

Описанный подход был использован для оценки привлекательности сценариев незаявленного производства 1 SQ плутония или ВОУ при хищении материалов, циркулирующих в топливном цикле теплового реактора при условии, что у пролифератора имеются возможности по развитию мощностей по переработке ОЯТ и обогащению урана [6].

Решение данной задачи позволило оценить привлекательность различных технологических путей осуществления пролиферационного акта (обогащение или переработка) и соответствующих производственных мощностей технологий, определенных заданными инфраструктурными границами, при условии сбалансированного достижения эффективности по соответствующим индикаторам для разных глубин выгорания топлива.

Сравнительный анализ структур развивающейся системы ЯЭ по индикаторам риска распространения

С использованием описанной методики был проведен сравнительный анализ структур развивающейся системы ЯЭ по индикаторам риска распространения. В качестве показателя, характеризующего возможности системы ЯЭ производить расщепляющиеся материалы, принимались мощности чувствительных предприятий ЯТЦ, отнесенные на единицу производимого ими значимого количества – «потенциальная производительность делящихся материалов». В качестве показателя, характеризующего количество делящихся материалов, принято «количество делящихся материалов в ЯТЦ», выраженное в единицах SQ [6].

В рассмотрение включены сценарии, являющиеся результатом оптимизации по критерию минимизации полных дисконтированных затрат с учетом ограничений на запасы природного урана, количества ОЯТ, места размещения быстрых реакторов: открытый урановый ЯТЦ без ограничений на ресурсы урана (I); замкнутый U-Pu ЯТЦ как с учетом, так и без учета ограничений на места размещения АЭС с быстрыми реакторами и с ограничениями на объемы доступного природного урана (II, III); замкнутый U-Pu-Th ЯТЦ с ограничениями на места размещения АЭС с быстрыми реакторами и на объемы доступного природного урана (IV) [7].

Результаты расчетов показывают, что различные структуры развивающейся системы ЯЭ на базе рассмотренных ЯТЦ сопоставимы по индикаторам «количество циркулирующего делящегося материала в ЯТЦ» и «потенциальная производительность делящихся материалов». Следует отметить, что улучшение одного из индикаторов достигается ухудшением по другому. Это говорит о невозможности сделать вывод о перспективности той или иной структуры ЯЭ и типа ЯТЦ для несанкционированного распространения, руководствуясь только оценкой материальных показателей, без детального анализа особенностей поведения пролифератора и национальных и международных систем управления режимом ядерной безопасности и нераспространения.

Результаты расчетов «количества делящихся материалов в ЯТЦ» и «потенциальной производительности делящихся материалов» для рассмотренных четырех сценариев приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты сопоставления структур ЯЭ по индикаторам риска

Сценарий	Максимальное «количество делящихся материалов в ЯТЦ», 10^6 SQ	Максимальная «потенциальная производительность делящихся материалов», 10^6 SQ/год
I	4.1 – 6.2	33 – 362
II	2.2 – 4.3	455 – 664
III	3.0 – 5.1	302 – 370
IV	1.9 – 4.0	420 – 480

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный подход удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к задачам оценки рисков несанкционированного распространения и уязвимости национальной ядерной инфраструктуры, разрешив при этом часть имевшихся методологических противоречий.

Данная методика может быть интегрирована в иные подходы оценки рисков, что расширит область их возможного применения.

Автор выражает благодарность и глубокую признательность А.Н. Румянцеву и В.П. Рухло за плодотворные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-6046.2012.8.

Литература

1. Development of Evaluation Methodology through Rev. 5, approved by GIF for unrestricted distribution: www.gen-4.org/Technology/horizontal/PRPPEM.pdf
2. PNNL-14294, Guidelines for the Performance of Nonproliferation Assessment. 2003. Pacific Northwest National Laboratories, Richland Washington.
3. Андрианов А.А. Оценка привлекательности сценариев пролиферации на основе их многофакторного сопоставления без предварительной агрегации индикатора риска/ «Научная сессия МИФИ-2011»: Сборник аннотаций докладов в 3-х томах. Т.1. – С. 268.
4. Triantaphyllou E. Multi criteria decision making method: a comparative study, Kluwer academic publishers, Applied optimization series. – V. 44, 2002.
5. Токарев В.В. Методы оптимальных решений. Т.2. – М.: Физматлит, 2010.
6. Итоги круглого стола «Культура ядерного нераспространения и безопасности: от ядерного права и международных соглашений до инженерных барьеров» <http://icne.mephi.ru/?p=294>.
7. Andrianov A., Korovin Yu., Fedorova E. // CD-Proceedings of Global 2009 conference.

Поступила в редакцию 20.10.2011

УДК 623.454.86

Integrated Approach to Proliferation Risk Assessment Based on Multiple Objective Analysis Framework \A.A. Andrianov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 4 tables, 6 illustrations. – References, 7 titles.

The approach to the assessment of proliferation risk using the methods of multi-criteria decision making and multi-objective optimization are presented. The approach allows taking into account the specific features of the national nuclear infrastructure, and possible proliferator strategies (motivations, intentions, and capabilities). Simple examples of applying the approach are shown.

УДК 621.039.543.4

On the Issues of Uranium Reprocessed from High Burnup Fuels \A.I. Dyachenko, N.A. Balagurov, V.V. Artisyuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 5 tables, 6 illustrations. – References, 13 titles.

The present paper focuses on analysis of nuclide composition in spent fuel of VVER-1000 from the view point of uranium reprocessing. The consideration is given to even uranium isotopes compensation, savings of separate work units, associated saving of uranium resources and economics.

УДК 621.039.84

Control Uniform Distribution of Plutonium by Fuel Pin Length BN-800 \M.I. Stasevich, E.V. Skachkov, V.V. Kadilin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 5 pages, 2 illustrations. – References, 4 titles.

In this paper, was considered a method of determining the mass of plutonium and getter (additive in the form of uranium metal) in a fragment of a fuel pin reactor BN-800 10 mm by mathematical modeling, the method based on measuring the intrinsic emission of granulated MOX fuel. There were researched the influence of the presence of a getter, the vibrations of the inner radius and thickness of the cladding, the determination of the mass of plutonium.

УДК 621.039.548

Residual Resource Estimation of the Fuel Pins Cover of Austenitic Stainless Steel ChS-68 of the Reactor BN-600 \K.V. Miturev, I.I. Konovalov, V.V. Popov, S.M. Ganina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 1 table, 7 illustrations. – References, 14 titles.

It have been done calculation of swelling austenitic stainless steel ЧС-68 and diameter profiles of fuel pins cladding from this steel, passed operation in an active zone of reactor BN-600, having reached the values of a damaging dose exceeding the regular in work. Comparison of calculations with the experimental data [1] received on irradiated fuel pins, has shown that at carrying out of calculations of a residual resource it is necessary to consider the ovality factor.

УДК 621.039.53

Computational Analysis and Estimation of LWR Cladding Radioactivity \A.V. Korzunin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 5 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 5 titles.

Time evolution of specific radioactivity and gamma watts for four types of zirconium based structural materials light elements activation products were estimated. Some chemical elemental analysis was performed. The advantages of zirconium purification after irradiation were shown.

УДК 621.039.37

Training for Faculty Training and Retraining INPE NRNU MEPhI \V.V. Tkachenko, S.P. Saakyan; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages.

The history of the organization and formation of In-Services Training Department of the INPE NRNU MEPhI. The functioning of the faculty to train specialists for the nuclear industry of additional professional education programs. It is shown that the most popular are retraining programs in «Operation of Nuclear Power Plants», to maintain the skills of managers and specialists of NPP, as well as training in various areas of nuclear energy profile.