

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ И ВЫБОР АЛЬТЕРНАТИВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ИЗЛИШКОВ ОРУЖЕЙНОГО ПЛУТОНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ ПОЛЕЗНОСТИ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

В.В. Костерев, Ю.В. Семенова

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»



Проведены многокритериальная оценка и выбор альтернатив для утилизации излишков оружейного плутония с использованием функции полезности при функциональной зависимости весовых коэффициентов. Рассмотрены несколько вариантов взвешивающих функций, определяющих весовые коэффициенты. Для проверки устойчивости решения проведен анализ чувствительности относительно изменения весовых коэффициентов. Показано, что предложенный подход расширяет возможности метода многокритериальной функции полезности, позволяя учесть, например, предпочтения ЛПР для разных альтернатив.

Ключевые слова: выбор альтернатив, излишки оружейного плутония, многокритериальное принятие решений, взвешивающие функции.

Key words: choice of alternatives, surplus weapons-grade plutonium, multiple attribute decision making, weighting functions.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из широко обсуждаемых проблем ядерной энергетики является утилизация делящихся материалов: их безопасное долговременное хранение и управление использованием. Процесс двустороннего (Россия – США) сокращения стратегических ядерных вооружений поставил на повестку дня проблему обращения с оружейными расщепляющимися материалами (высокообогащенными ураном и плутонием, извлекаемыми из демонтируемых боезарядов).

Проблема использования в атомной энергетике оружейного плутония является наиболее актуальной и привлекает внимание политиков, ученых, инженеров как в России, так и за рубежом. Одна из главных целей при решении этой проблемы – обеспечение режима нераспространения ядерного оружия. Кроме этого необходимо обеспечить эффективность использования плутония, а также безопасность

© В.В. Костерев, Ю.В. Семенова, 2010

человека и окружающей среды. В этой связи актуальна поддержка принятия решений по утилизации излишков оружейного плутония, базирующаяся на использовании современного математического аппарата.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ И ВЫБОР АЛЬТЕРНАТИВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ИЗЛИШКОВ ОРУЖЕЙНОГО ПЛУТОНИЯ

Проблема обращения с избыточным плутонием математически может быть формализована как задача выбора альтернативы из набора имеющихся, которая является частным случаем задачи принятия решений.

Метод многокритериальной функции полезности – один из главных аналитических инструментов, связанных с областью анализа решений. Анализ данных с помощью многокритериальной функции полезности позволяет выявить те альтернативы, которые лучше всего подходят для большинства целей и являются более важными.

При анализе альтернатив используются ценности суждения или веса, определяющие относительную желательность альтернатив для каждой из целей. Одной из главных задач анализа многокритериальной функции полезности является исследование различных комбинаций предположений и весов с помощью ранжирования. Как правило, подобный анализ позволяет выявить те альтернативы, которые в наилучшей степени удовлетворяют всем рассматриваемым целям. Также возможно выбрать одну альтернативу и определить набор факторов, предположений и весов, которые позволяют ей занять место среди наиболее или наименее привилегированных альтернатив.

Таким образом, один из вариантов этого подхода предполагает реализацию четырех действий: формирование альтернатив и критериев (целей); оценка альтернатив по отношению к критериям; оценка величин и весов критериев; выбор альтернатив и анализ чувствительности.

С учетом возможных путей обращения с оружейным плутонием можно выделить три главные условия утилизации излишков оружейного плутония: нераспространение; эксплуатационная эффективность; безопасность для окружающей среды и здоровья.

Выполнение первого условия – *нераспространения* – предполагает

- 1) минимизацию возможности хищения ядерных материалов – «Theft (хищение)»;
- 2) максимизацию сопротивления к диверсиям и обеспечение международного контроля – «Diversion (диверсия)»;
- 3) максимизацию трудности восстановления материала, который был утилизирован – «Irreversibility (необратимость)»;
- 4) международное сотрудничество и политику ядерного нераспространения – «International Cooperation (международное сотрудничество)»;
- 5) минимизацию времени, требуемого для утилизации ядерных материалов – «Timeliness (своевременность)».

Выполнение второго условия – *эксплуатационной эффективности* – предполагает инвестиции и затраты цикла жизни, связанные с какой-либо альтернативой.

Третье условие – *безопасность для окружающей среды и здоровья* – обеспечение минимизации неблагоприятного воздействия на здоровье человека, естественную и социальную среду.

Каждому пункту сопоставлено от одной до 37-ми мер, включенных в модель (например, полный эксплуатационный цикл, затраты, время, форма материала).

Ниже приведен список из тринадцати альтернатив [1], которые рассматриваются в данной работе.

Реакторные альтернативы (Reactor Alternatives)

1. Существующие легководные реакторы (Existing Light Water Reactors, Existing Facilities). Предприятие по производству MOX-топлива, смешанного уран-плутониевого топлива на базе диоксидов UO_2 и PuO_2 .
2. Частично завершённые реакторы (Partially Completed Light Water Reactors).
3. Существующие реакторы (Existing Light Water Reactors, Greenfield Facilities). Новые предприятия по разборке и производству MOX-топлива.
4. Новые реакторы (Evolutionary Light Water Reactors).
5. Реакторы CANDU. MOX-топливо, изготовленное на американских установках, транспортируется на один или несколько канадских реакторов на тяжелой воде.

Альтернативы остановки (Immobilization Alternatives)

6. Превращение в стекловидное вещество (Vitrification Greenfield) – избыточный плутоний смешивается со стеклом и радиоактивными материалами с целью формирования гомогенных цилиндров.
7. Vitrification Can-in-Canister – вариант перемешивания плутония с нерадиоактивным стеклом с помещением в маленькие канистры, которые затем помещаются в большие канистры, заполненные радиоактивным стеклом.
8. Vitrification Adjunct Melter – перемешивание плутония со стеклом и радиоактивными материалами с дальнейшим плавлением получившейся массы и получением однородных слитков.
9. Ceramic Greenfield – перемешивание плутония с керамикой и радиоактивными материалами с целью дальнейшего получения однородных керамических дисков. Далее, они могут быть помещены в большие канистры.
10. Ceramic Can-in-Canister – излишки плутония перемешиваются с нерадиоактивными керамическими материалами и затем превращаются в керамические таблетки; Они могут быть помещены в большие канистры, наполненные стеклообразными радиоактивными отходами.
11. Electrometallurgical Treatment – сплавление избыточного плутония с радиоактивным стеклоподобным цеолитом.

Альтернативы захоронения (Direct Disposal Alternatives)

12. Deep Borehole (Direct Emplacement) – преобразование избыточного плутония в подходящую форму и непосредственное захоронение в глубокую буровую скважину.
13. Deep Borehole (Immobilization) – остановка избыточного плутония с керамическими гранулами и помещение в глубокие буровые скважины.

РАНЖИРОВАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ ПОЛЕЗНОСТИ

Суть данного метода заключается в рассмотрении многомерной функции полезности $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$, зависящей более чем от двух факторов [2],

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f[u_1(x_1), u_2(x_2), \dots, u_n(x_n)], \quad (1)$$

где x_i – фактическое значение фактора X_i ; f – скалярная функция; $u_i(x_i)$ – функция полезности для фактора X_i , $i = 1, 2, \dots, n$.

Рассмотрим применение многомерной функции полезности для ранжирования альтернатив утилизации излишков оружейного плутония.

Если предпочтительность того или иного фактора зависит только от маргинальных распределений вероятностей для этих факторов и не зависит от их совместного распределения, то

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i), \quad (2)$$

где x_i – набор рассматриваемых факторов; $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – аддитивная функция полезности; $u_i(x_i)$ – функции полезности каждого из рассматриваемых факторов, значения которых лежат в интервале от 0 до 1, k_i ($i=1, \dots, n$) представляют собой значения весов (весовых коэффициентов) для каждого из n факторов $\left(\sum_{i=1}^n k_i = 1\right)$.

Выражение (2) представляет собой аддитивную функцию полезности для рассматриваемых факторов – наиболее широко используемый вариант этой функции.

Проблема принятия решений связана с ранжированием и отбором конкурирующих альтернатив с использованием критериев для их оценки и весов, выражающих относительную важность критериев. Как правило, предполагают, что критерии независимы, т.е. вклад каждого отдельного критерия в оценку любой альтернативы не зависит от других критериев. Еще одно предположение – возможность количественного определения всех соответствующих критериев в пределах одной шкалы $[0,1]$. Кроме того, предполагается, что относительная важность критериев также может быть определена количественно в пределах интервала $[0,1]$ с использованием постоянных весов.

Однако на практике зачастую целесообразно иметь весовые коэффициенты, зависящие от значений критериев. Это позволяет «штрафовать плохие» и «награждать хорошие» критерии [3]. В этом случае вместо постоянных весовых коэффициентов k_i ($i = 1, \dots, n$) вводятся взвешивающие функции $k_i(x)$, каждая из которых зависит от важности критерия кусочно-монотонным образом, т.е. является постоянной для каждого критерия и изменяется с переходом от одного критерия к другому.

Проведено исследование возможности использования взвешивающих функций для аддитивной функции полезности при оценке альтернатив утилизации излишков оружейного плутония. Рассматривались четыре типа взвешивающих функций: линейная $f(x)=x$, разновидность линейной функции $f(x)=(x+1)/2$, квадратичная $f(x)=x^2$ и кубическая $f(x)=x^3$.

Нормированные значения взвешивающих функций записываются в виде

$$k_i(x) = f(x_i) / \sum_{j=1}^n f(x_j). \quad (3)$$

Было проведено ранжирование тринадцати альтернатив для утилизации излишков оружейного плутония с использованием предложенного подхода. В качестве исходных значений величин критериев использованы данные работы [1].

В таблице 1 приведены численные значения альтернатив для четырех видов взвешивающих функций, а также значения альтернатив, приведенные в работе [1]. Альтернативы расположены в соответствии с их рангом (наибольшему значению альтернативы соответствует меньший ранг; таким образом, альтернатива, имеющая максимальное численное значение, имеет ранг, равный единице, и является предпочтительной).

Таблица 2 отображает рассчитанное соответствие численного значения альтернатив их рангу для четырех видов взвешивающих функций, а также для альтернатив, ранжированных с использованием весов – констант [1]. Альтернативы расположены в соответствии с их рангом от 1 до 13 (альтернатива, имеющая максимальное численное значение, имеет ранг, равный единице, и является предпочтительной).

Как видно из приведенных результатов, ранги альтернатив для всех четырех взвешивающих функций находятся в хорошем соответствии друг с другом и неплохо совпадают с данными работы [1]. Более детальный анализ показывает, что

Таблица 1

Численные значения альтернатив

Ранг	$(X+1)/2$	X	X^2	X^3	Данные[1]
1	0.5419425	0.6047835	0.6833789	0.7372361	0.6907
2	0.5357750	0.6000876	0.6751763	0.7223614	0.6905
3	0.5354152	0.5999859	0.6749946	0.7221286	0.6676
4	0.5049731	0.5563431	0.6064575	0.6348513	0.6295
5	0.4826277	0.5288722	0.5830650	0.6178727	0.6249
6	0.4790389	0.5166345	0.5692320	0.6049771	0.6211
7	0.4736077	0.5152307	0.5656972	0.6024009	0.6151
8	0.4735917	0.5151903	0.5656163	0.6022938	0.6101
9	0.4733922	0.5151882	0.5655797	0.6022838	0.5976
10	0.4683953	0.5139715	0.5567297	0.5980320	0.5543
11	0.4574025	0.5025594	0.5541872	0.5973935	0.5441
12	0.4510208	0.4964541	0.5538183	0.5968052	0.5351
13	0.4495240	0.4959993	0.5534796	0.5833555	0.2676

Таблица 2

Соответствие альтернатив их рангу для четырех видов взвешивающих функций и весов-констант

Ранг	$(X+1)/2$	X	X^2	X^3	Данные [1]
1	13	13	13	13	10
2	7	7	10	10	7
3	10	10	7	7	1
4	1	1	1	1	5
5	12	5	5	5	12
6	5	11	11	11	3
7	9	8	6	6	13
8	8	9	8	8	8
9	6	6	9	9	11
10	11	12	2	4	9
11	2	2	4	3	2
12	3	3	3	2	6
13	4	4	12	12	4

для всех четырех видов взвешивающих функций предпочтительной является 13-я альтернатива (Borehole (Immob)). Второй ранг для линейных взвешивающих функций имеет седьмая альтернатива (Vitrif. Can-in-Can), что совпадает с данными [1]. Для квадратичной и кубической функций седьмая альтернатива имеет близкий третий ранг; второй ранг у десятой альтернативы (Ceramic Can-in-Can), имеющей первый ранг по данным [1]. Первая альтернатива имеет четвертый ранг для всех четырех функций, в соответствии же с данными [1] она имеет близкий третий ранг.

Важным вопросом в задаче ранжирования альтернатив является устойчивость решения к изменениям исходных условий (анализ чувствительности решения). Оценка устойчивости решения позволяет оценить, как изменится ранг альтернатив при изменении этих условий. Применительно к предложенному подходу было проведено исследование устойчивости решения относительно изменения весовых коэффициентов.

Для оценки устойчивости могут использоваться разные подходы. Нами исследовалось два варианта этой оценки. В первом варианте изучалась устойчивость решения в случае изменения веса одного из критериев (в первую очередь, наиболее значимого k_3), причем отношения весов (параметры b_1 , b_2 и b_3) у остальных критериев оставались неизменными:

$$\begin{cases} k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 = 1 \\ k_1 / k_2 = b_1 \\ k_2 / k_4 = b_2 \\ k_4 / k_5 = b_3 \\ k_3 = a. \end{cases} \quad (4)$$

Варьируя значения k_3 (параметра a) от нуля до единицы, получаем, решая систему (4), значения остальных весов. Проведенный анализ показал устойчивость решения к подобному изменению каждого из весов.

Другим примером анализа чувствительности является вариант, когда все значения весов разыгрываются случайным образом одновременно при сохранении нормировки (с использованием датчика случайных чисел, распределенных равномерно).

Результаты ранжирования альтернатив после 5000 итераций розыгрыша весов случайным образом приведены в табл. 3.

Анализ чувствительности показывает, что ранжирование альтернатив с использованием взвешивающих функций для агрегирования критериев в целом устойчиво также и к случайному изменению весовых коэффициентов, причем, линейные взвешивающие функции обеспечивают большую степень устойчивости в ранжировании альтернатив, чем степенные функции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что использование весов, определенных с помощью взвешивающих функций, зависящих от степени удовлетворения различным критериям, расширяет возможности применения метода многокритериальной функции полезности для ранжирования альтернатив утилизации излишков оружейного плутония.

Таблица 3

Результаты ранжирования альтернатив при случайном розыгрыше весов

Альтернатива	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Количество попаданий на первое место	454	123	117	107	248	184	988	178	195	939	194	28	1065
Средний ранг	6.19	8.26	8.47	8.52	7.26	7.40	5.32	7.47	7.34	5.38	7.69	6.60	5.11
Итоговый ранг	4	10	11	12	5	8	2	9	6	3	7	13	1

Литература

1. *Dyer J.S., Butler J.C.* Evaluation of Alternatives for the Disposition of Surplus Weapons-Usable Plutonium/Amarillo National Resource Center for Plutonium, ANRCP-1997-1, 1997.
2. *Кини Р., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М., 1981.
3. *Marques Pereira R.A., Ribeiro R.A.* Aggregation with generalized mixture operators using weighting functions/Fuzzy Sets and Systems 137 (2003).

Поступила в редакцию 9.12.2009

УДК 621.039.56

Model of a Unit Power Supply under the Scheme of the Transistor Voltage-Source Inverter \ V.V. Rojkov, V.E. Aidaralieva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 8 illustrations. – References, 3 titles.

This paper contains a complex of models of the basic converting blocks of modern systems of unit power supply of electric equipments which are delivered on the Nuclear Power Plant under plans of prolongation of service life of generating sets. Similar deliveries are often accompanied by very limited technical information on products. Represented paper urged to meet this lack in any measure. The developed complex of models allowing by computer modeling to investigate the basic modes of functioning of blocks in UPS is for this purpose intended. Results of modeling are resulted, recommendations for choice parameters of elements of the power circuit, on diagnostics and adjustment of regulators of control systems by converters – the operated rectifier and the transistor independent inverter are given.

УДК 681.58

Synthesis of Automated Control System of the Complex of Fluoridation and Capture Devices of Uranium Hexafluoride Production \ S.A. Baydali, V.F. Dyadik, A.S. Jurkov, N.S. Krinitsyn; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 12 pages, 1 tables, 8 illustrations. – References, 10 titles.

The work presents stages of synthesis of cascade two-planimetric automated control system of the complex of fluoridation and capture devices of uranium hexafluoride production. Calculation method of internal and external regulators parameter settings is developed and realized.

Computer research of regulation quality are made with different regulator combinations.

УДК 621.039.54: 621.039.7

Multi-attribute Evaluation and Choice of Alternatives for the Surplus Weapons-Grade Plutonium Disposition Using Utility Function at Functional Dependences of Weight Factors \ V.V. Kosterev, Yu.V. Semenova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 12 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 10 titles.

Multi-attribute Evaluation and Choice of Alternatives for the Surplus Weapons-Grade Plutonium Disposition Using Utility Function at Functional Dependences of Weight Factors has been made. Investigations of several versions of weighting functions were carried out. Sensitivity analysis was used to explore the robustness of the rankings relative to changes in the weights in more detail. It has been shown that using of weighting functions for the ranking of alternatives enlarges the possibilities of the method of the multi-attribute evaluation, making it possible to consider, for example, decision maker preferences for different alternatives.

УДК 621.039.54

Model of Multicomponent Extraction Process in the Column \ A.D. Hrenkov, Y.A. Chursin, A.A. Denisevich; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 5 illustrations. – References, 16 titles.

The model of multicomponent process of extraction in pulsating column is presented. Model analysis on adequacy to real apparatus was made. The received results have shown, that the presented model adequacy to the real nuclear fuel-reprocessing apparatus.

УДК 621.039.566

Hydrodynamics of the Heat-Carrier and Behaviour of Impurity in Contour of Repeated Compulsory Circulation RBMK during a Stop of the Block \ V.I. Gorbakov, S.V. Ivanov, O.S. Kuganiyazov, A.I. Zababurin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 6 illustrations. – References, 4 titles.