

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Т.Г. Сазыкина, И.И. Крышев

Научно-производственное объединение «Тайфун», г. Обнинск



Представлена методология оценки эффективности мероприятий по обеспечению радиационно-экологической безопасности при обращении с радиоактивными отходами на основе многокритериального анализа с учетом радиационных, социальных, экономических и экологических последствий. Методика многокритериального анализа проиллюстрирована на примере обоснования принятия решения в отношении реабилитации загрязненного радионуклидами водного объекта.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение радиационно-экологической безопасности территорий при обращении с радиоактивными отходами зависит от ряда факторов: типов и категорий РАО, методов их хранения и захоронения, характеристик площадок размещения отходов, требований радиационной защиты населения и охраны окружающей среды, существующих и прогнозируемых уровней содержания радионуклидов в почве, атмосфере, поверхностных и подземных водах, компонентах природных и сельскохозяйственных экосистем.

Как правило, осуществление на практике мероприятий по обеспечению радиационной безопасности при обращении с РАО и реабилитации загрязненных радионуклидами территорий требует значительных финансовых затрат, и поэтому должно тщательно планироваться на основе оптимизации соотношения «польза – затраты». Целью данной работы является развитие такого рода методологии на основе многокритериального анализа эффективности планируемых природоохранных мероприятий.

МЕТОДОЛОГИЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Ранжирование эффективности защитных мероприятий (контрмер) требует применения специальной методологии, такой как многокритериальный анализ (МКА). МКА позволяет произвести интегрированное сравнение эффективности защитных мероприятий по совокупности критериев с учетом разноплановых, зачастую противоречивых факторов. При этом, наряду с выгодой от реализации контрмеры, учитываются радиологические, социальные, экономические и другие ущербы.

Учет и анализ как прямых, так и косвенных радиационных, социальных, экономических последствий определяют в конечном итоге предпочтительность того или ино-

го защитного мероприятия по обеспечению радиационной безопасности населения и надлежащего качества окружающей среды. Кроме снижения дозовых нагрузок на население, контрмеры могут привести и к нежелательным последствиям, которые должны быть оценены [1]. В частности, реабилитация загрязненной территории может сопровождаться дополнительным облучением персонала, загрязнением оборудования, созданием вторичных отходов. Контрмеры могут вызвать сопутствующие социальные и экономические ущербы для населения, а также нанести ущерб природному комплексу на самой реабилитируемой территории. Таким образом, принятие решения о выборе той или иной контрмеры является ответственным шагом, требующим одновременного учета разноплановых критериев. Большое разнообразие учитываемых критериев, многие из которых не сводятся к денежным или дозовым единицам измерений, представляет особую трудность в задачах принятия обоснованных эффективных решений по обеспечению радиационной безопасности территорий при обращении с РАО.

МКА особенно полезен, когда несколько или все критерии не могут быть выражены в денежных единицах, а также когда необходимо провести общее ранжирование вариантов. Для каждого варианта возможной контрмеры вычисляется суммарная полезность (эффективность). Вариант решения с наивысшей суммарной полезностью является предпочтительным.

Методы МКА не исключают использование других методов экономического анализа. Отличительной особенностью МКА является возможность сопоставления критериев, которые исходно не имеют единой единицы измерения (монетарной или какой-либо другой), например, сопоставления экономических, медицинских, экологических, эстетических и культурных критериев путем приведения к общей шкале.

Теория МКА была формализована в [2] и ее приложения нашли применение в рекомендациях МКРЗ по оптимизации радиационной защиты [3], в оценках альтернативных участков для захоронения РАО [4], в системе принятия решений по оценке последствий радиационных аварий [5]. Весьма существенно, что для лиц, принимающих решения, методика МКА может облегчить понимание последствий различных защитных мероприятий и помогает избежать применения некорректных и дорогостоящих контрмер.

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ КРИТЕРИЕВ

Выбор оптимальной стратегии по обеспечению радиационной безопасности следует осуществлять с учетом как радиационного фактора, так и других важных социальных и экономических эффектов, которые может повлечь за собой осуществление конкретного решения. На практике понятие «обеспечение радиационной безопасности» оказывается весьма сложным, поэтому необходимо разбить его на составляющие компоненты с тем, чтобы они могли быть количественно измерены. При этом необходимо сформулировать общую цель (цель высшего порядка) и подразделить ее на более конкретные цели (цели низшего порядка), которые, в свою очередь, также можно разделить на подцели и затем данную иерархическую процедуру можно осуществлять до тех пор, пока не определится фактор, на котором исполнение цели может быть измерено. Создание иерархии (дерева целей) является весьма полезным, поскольку позволяет разбить сложную проблему на отдельные части.

В задачах многокритериального анализа и выбора оптимальных решений для обеспечения радиационной безопасности территорий при обращении с радиоактивными отходами общая цель может быть сформулирована как «минимизация воздействия от радиоактивного загрязнения территории на столь низком уровне, насколько это разумно достижимо с учетом экономических и социальных факторов». Эта общая цель

может быть подразделена на следующие подцели – минимизация социальных и экономических ущербов от радиоактивного загрязнения территории и минимизация ущерба для окружающей среды.

Система критериев, рассматриваемых в задачах обеспечения радиационной безопасности территории при планировании и реализации контрмер, представлена на рис. 1 в виде дерева критериев, ветвящихся от общих критериев целей и подцелей до конкретных измеряемых показателей.

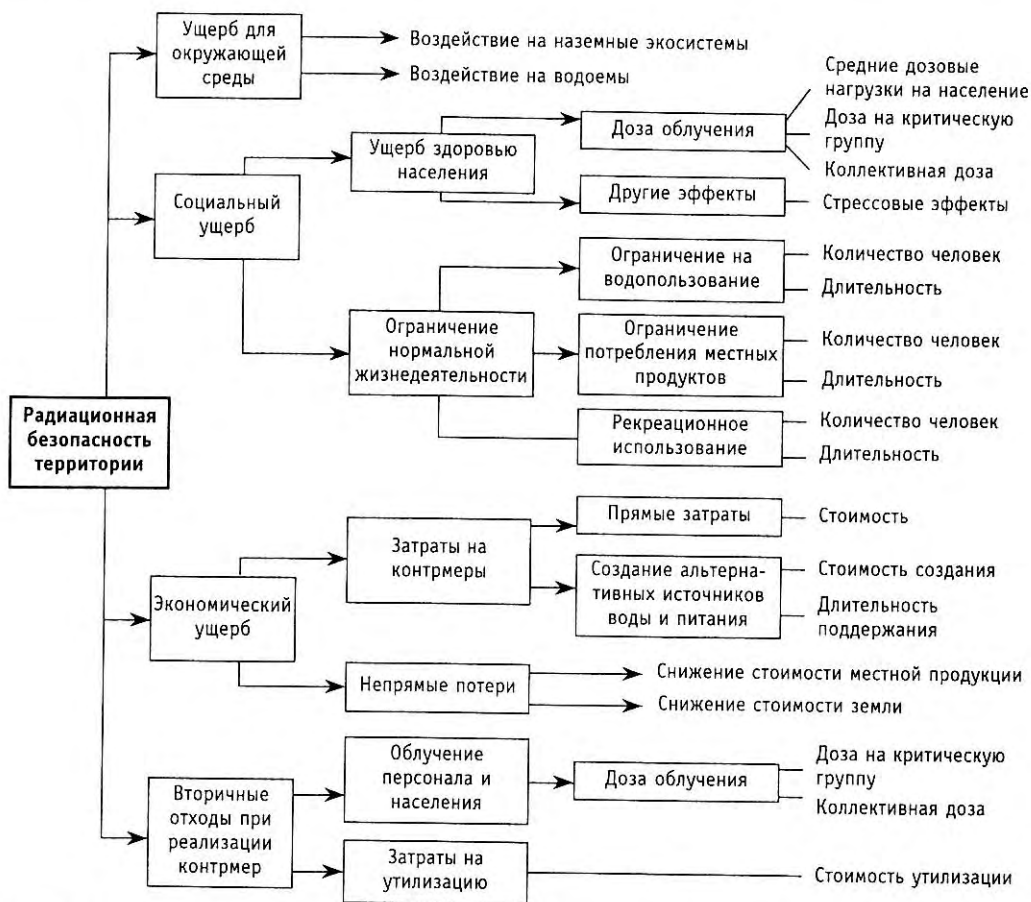


Рис.1. Типичная схема конкретизации критериев («дерево критериев») для принятия решений об обеспечении радиационной безопасности при радиоактивном загрязнении территории

ОЦЕНКИ ЧАСТНЫХ КРИТЕРИЕВ ЦЕЛИ И ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИИ ПОЛЕЗНОСТИ

Основная проблема в решении многокритериальных задач заключается в неоднородности частных критериев, которые исходно измеряются в разных единицах (денежные, дозовые, объемные и т.д.). Значения критериев самого нижнего уровня являются основой для определения критериев более высокого порядка (комплексных критериев).

Поэтому в многокритериальных методах осуществляется переход от измерений критериев ($K_j(i)$) в физических единицах, к критериям, измеренным в условных единицах ($u_j(i)$). Все комплексные критерии измеряются в относительных единицах в одном и том же интервале, обычно $[0,1]$ (или $[0,100]$). Значения, близкие к 0, обо-

значают низкую полезность данной контрмеры по рассматриваемому комплексному критерию, а значения, близкие к 1, означают высокую полезность.

Переход от физических единиц измерения критериев к относительным единицам осуществляется с использованием функций перевода.

Для задания функции перевода необходимо задать верхнюю и нижнюю границы изменения критерия при реализации контрмеры $[K_{\min}, K_{\max}]$, целесообразно выбрать функции с монотонным изменением внутри этого интервала. Для наиболее простого случая линейной возрастающей функции перевода, нормированные значения критерия имеют вид:

$$u(K) = \frac{K - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}} \text{ при } K \text{ из интервала } [K_{\min}, K_{\max}]; \quad (1)$$

$$u(K) = 0 \text{ при } K < K_{\min};$$

$$u(K) = 1 \text{ при } K > K_{\max}.$$

В случаях немонотонных зависимостей изменения критерия на отдельных частях интервала $[0,1]$ можно использовать кусочно-линейные функции перевода, также показательные, гауссовы и другие функции [6].

Проблема однородности пространства критериев не решается полностью переходом к относительным единицам по отдельным критериям, т.к. сравнить объекты в пространстве множества критериев затруднительно. Поэтому необходимо также определить коэффициенты относительной важности критериев W_j , при этом $\sum W_j = 1$. Взвешивающие факторы определяются экспертами с участием лиц, принимающих решения.

При задании коэффициентов относительной важности необходимо следить, чтобы критерий был информативен с точки зрения выбора решения. Например, если какой-либо критерий во всех рассматриваемых вариантах контрмер имеет одинаковое значение или мало меняется с точки зрения экспертов, то этот критерий можно считать малоинформативным для процесса выбора предпочтений, выбирая для него малое значение W_j .

В результате процесса оценки, каждая контрмера S^q будет характеризоваться соответствующим набором нормированных значений критериев (u_1^q, \dots, u_m^q) . Следующий шаг заключается в оценке каждой из этих контрмер при помощи многофакторной модели, чтобы выявить лучшую из них. Оператор агрегирования должен удовлетворять следующим требованиям:

- входными параметрами являются нормированные значения критериев u_1, \dots, u_m (m – число критериев нижнего уровня);
- оператор агрегирования должен быть непрерывен и монотонен относительно u_1, \dots, u_m ;
- оператор коммутативен относительно нормированных критериев;
- параметрами оператора агрегирования являются коэффициенты относительной важности (веса критериев) W_j ;
- особые значения оператора агрегирования: $U(1,1, \dots, 1) = 1$; $U(0,0, \dots, 0) = 0$; $U(u_1, 0, \dots, 0) > 0$ при $u_1 > 0$; $U(u_1, 0, \dots, 0) < 1$ при $u_1 < 1$.

Наиболее простая и часто употребляемая функция полезности – это аддитивный оператор агрегирования, т.е. функция, суммирующая нормированные значения критериев с их коэффициентами относительной значимости:

$$U(S_q) = \sum_{i=1}^m W_i \cdot u_i(K_i^q). \quad (2)$$

После агрегирования и получения значений функции полезности для каждой стратегии следует отранжировать стратегии по величине функции полезности. Наиболее

предпочтительной будет стратегия, для которой величина функции полезности окажется максимальной по сравнению с функциями полезности для других стратегий.

На практике значения функции полезности могут оказаться близкими для нескольких рассматриваемых вариантов контрмер. Для принятия наиболее обоснованного решения по выбору предпочтительного варианта контрмер следует провести анализ чувствительности результатов выбора. Для анализа чувствительности результатов ранжирования контрмер следует изменяя параметры оценок проверить, сохраняется ли порядок предпочтения вариантов. Кроме того, целесообразно исследовать устойчивость результатов выбора по отношению к различным наборам (деревьям) критериев, т.е. для одной и той же задачи разработать (с привлечением разных экспертов) два или более деревьев критериев.

В целом решение многокритериальной задачи является итерационной процедурой, в которой после расчета комплексных критериев может возникнуть необходимость дополнить структуру критериев новыми (или исключить часть неинформативных критериев), изменить функции перевода или параметры операторов агрегирования.

ПРИМЕР ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТНЫХ МЕР НА ОСНОВЕ МКА

Проиллюстрируем схему проведения МКА на примере принятия решений в отношении реабилитации водного объекта, загрязненного радионуклидами.

Рассмотрим водоем (озеро) площадью 5 км² и глубиной 5 м, загрязненный радионуклидами ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Уровни загрязнения следующие: в донных отложениях удельные активности ¹³⁷Cs – 2х10⁴ Бк/кг; ⁹⁰Sr – 10⁴ Бк/кг; в воде ¹³⁷Cs – 20 Бк/л; ⁹⁰Sr – 100 Бк/л; в рыбе и водоплавающей птице – ¹³⁷Cs 20 кБк/кг; ⁹⁰Sr – 3 кБк/кг. Вблизи озера проживает 500 чел., часть из которых занимается рыболовством, а другая часть – разведением водоплавающей птицы и сельским хозяйством. Годовой вылов рыбы – 10 т. Годовое потребление рыбы критической группой (рыбаками) – 80 кг/год на человека; среднее потребление рыбы прибрежным населением – 20 кг/чел в год. Потребление водоплавающей птицы сельским населением – 10 кг/год, годовое производство птицы 5 т.

Предлагаются следующие альтернативные стратегии.

- Стратегия I. Ничего не предпринимать, полагаясь на естественную самоочистку водоема.
- Стратегия II. Произвести радикальную очистку водоема путем изъятия верхнего слоя донных отложений (5 см).
- Стратегия III. Отселить жителей с берегов озера и создать резервацию-заповедник.
- Стратегия IV. Запретить водопользование, лов рыбы и разведение водоплавающей птицы на срок 30 лет; поставить заграждение по периметру озера и обеспечить посты охраны. Взамен создать альтернативные источники водоснабжения (пруды, колодцы), производить завоз чистой рыбы и мяса птицы для населения.

Дерево разветвляющихся критериев от обобщенных целей до конкретных критериев нижнего уровня для рассматриваемого примера приведено на рис. 2.

После определения списка альтернативных стратегий и создания системы критериев, производится расчет величин критериев нижнего уровня для каждой стратегии в натуральных единицах, т.е. дозы на население, стоимость осуществления контрмер, ущерб экономике района, оценки для рассматриваемого примера даны в табл. 1. Следующим шагом является перевод величин критериев из натуральных в условные единицы с масштабированием в интервал от 0 до 1. Результаты перевода величин

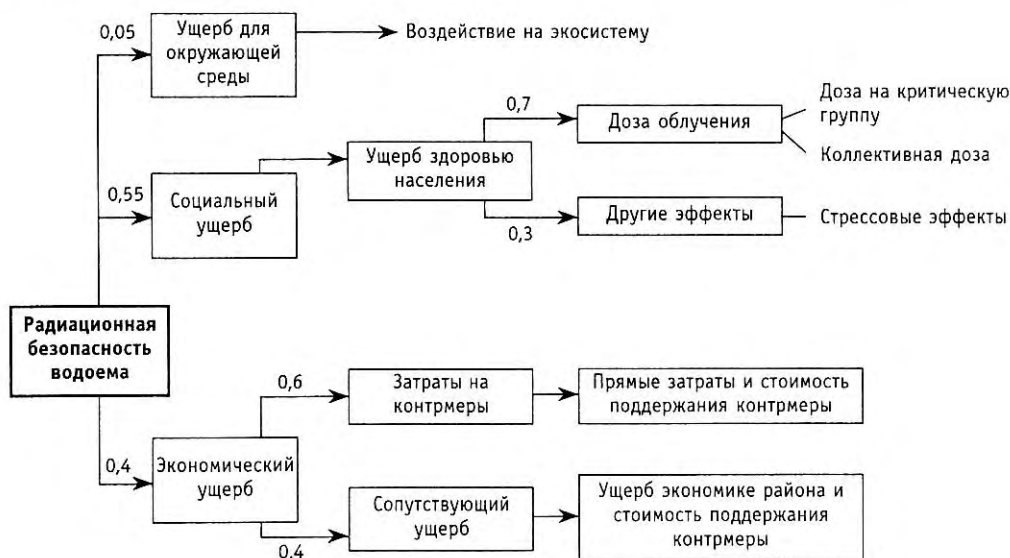


Рис. 2. «Дерево» критериев для примера применения методики многокритериального анализа к выбору оптимальной стратегии обеспечения радиационной безопасности водоема. Цифрами указаны взвешивающие коэффициенты W_i , характеризующие относительную значимость отдельных критериев для принятия решений

критериев в условные единицы представлены в табл. 2. Рассчитанные по формуле (2) значения агрегированной функции полезности для каждой из рассматриваемых стратегий с учетом отнормированных критериев U_i (табл. 2) и оценок взвешивающих коэффициентов W_i (рис. 2) даны в табл. 3. В этой же таблице стратегии отранжированы по приоритетности (предпочтительности) применения.

Таким образом, применение методики многокритериального анализа в рассмотренном примере дает следующие результаты: наиболее предпочтительной мерой при учете всех рассмотренных критериев является запрет водопользования без отселения людей; на 2 месте стоит стратегия «создание заповедника»; стратегия «очистка с выемкой донных отложений» является наименее пригодной вследствие высокой стоимости, неполной очистки и повреждения самого водоема – эта стратегия получила наихудший балл, меньший чем оценка стратегии «ничего не предпринимать».

Таблица 1

Критерии МКА в естественных единицах, отражающие величины критериев для различных стратегий контрмер

| Стратегии контрмер | Дозы на критическую группу, мЗв/год | Средние дозы, мЗв/год | Стоимость контрмеры, млн. евро | Ущерб экономике района, млн. евро | Фактор стресса | Ущерб водоему |
|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| I. «Ничего не предпринимать» | 27.5 | 10.3 | 0 | - | Умеренный стресс | 0 |
| II. «Выемка донных отложений» | 5.2 | 2 | 160 | 1 | Отсутствует | Временное снижение численности рыб на 50% |
| III. «Создание заповедника» | 2.7 | 1 | 8.5 | 2.2 | Стресс от переселения людей | 0 |
| IV. «Запрет использования водоема» | 2.7 | 1 | 1 | 0.2 | Слабый стресс из-за недоступности водоема | 0 |

Таблица 2

Критерии МКА в нормированных единицах, отражающие уровни относительной приемлемости контрмер по отдельным критериям

| Стратегии контрмер | Дозы на критическую группу | Средние дозы | Стоимость контрмеры | Ущерб экономике района | Фактор стресса | Ущерб водоему |
|------------------------------------|----------------------------|--------------|---------------------|------------------------|----------------|---------------|
| I. «Ничего не предпринимать» | 0.25 | 0.52 | 1 | 0.98 | 0.7 | 1 |
| II. «Выемка донных отложений» | 0.85 | 0.95 | 0.05 | 0.9 | 1 | 0.5 |
| III. «Создание заповедника» | 0.92 | 0.98 | 0.93 | 0.8 | 0.6 | 1 |
| IV. «Запрет использования водоема» | 0.92 | 0.98 | 0.98 | 0.97 | 0.9 | 1 |

Таблица 3

Величины функции полезности в МКА для различных стратегий контрмер в отношении загрязненного радионуклидами водоема

| Стратегии контрмер | Величина агрегированной функции полезности | Ранжирование по предпочтительности применения |
|------------------------------------|--|---|
| I. «Ничего не предпринимать» | 0.70 | 3-е место |
| II. «Выемка донных отложений» | 0.689 | 4-е место |
| III. «Создание заповедника» | 0.864 | 2-е место |
| IV. «Запрет использования водоема» | 0.952 | 1-е место |

Примечание. Максимальное значение агрегированной функции полезности равно 1.

Литература

1. International Atomic Energy Agency. Non-technical factors on the decision-making processes in environmental remediation. IAEA-TECDOC-1279, Vienna, 2002.
2. Keeney, R.L., Raiffa, H. Decisions With multiple objectives. – N.Y., 1976.
3. International Commission on Radiological Protection. Optimisation and Decision-Making in Radiological Protection. Publication 55//Annals of the ICRP. – 1989. – 20. – № 1.
4. Merkhofer, M.W., Keeney, R.L. A multiattribute utility analysis of alternative sites for disposal of nuclear Waste. Risk Analysis. – 1987. – V. 7. – № 2.
5. Wagenaar G., Ehrhardt J., Morrey M.E., van den Bosch C.J.H., Robinson C.A., Steinhaner C. RADE-AID; The development of a radiological accident decision aiding system. Netherlands Organisation for Applied Scientific Research. TNO report 90-281, 1990.
6. Елтаренко Е.А. Оценка и выбор решений по многим критериям. – М.: МИФИ, 1995.

Поступила в редакцию 28.09.2005

The construction of the acoustic devices, computer programs, laboratory and testing unit experiments are described.

УДК 621.039.58

Neutron Freccasting to Provide for Seismic Safety of NPP \ Yu.A. Rogozhin, I.P. Shestopalov; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 8 titles.

As it is known, various natural factors, in particular earthquakes, can render influence on NPP work. The data on seismic energy, allocated from the earthquake sources on all globe for the period with 1680 on 2004 in comparison to cycles of solar activity, are analyzed. The 11-year's cycles of seismic activity on the Earth are revealed. The cyclic changes of seismic activity with duration in three solar cycles and century cycles are marked out also. A correlation between solar and seismic activity mainly negative, but the correlation between them can be positive under influence of powerful solar proton events. The strongest earthquakes occur in the beginning of the century cycle. In the ninetieth years of the last century there has come a new century cycle, in which beginning, during several tens years, the strong seismic activity will be marked. It is shown, that the seismic activity is accompanied by burst of neutrons, that directly can influence on NPP work. A new approach to forecasting of earthquakes develops by means of neutron monitoring, that at the end promises to raise seismic safety of NPP.

УДК 623.454.862: 628.4.047

Multi-Criteria Analysis for Evaluating the Radiological and Ecological Safety Measures in Radioactive Waste Management \ T.G. Sazykina, I.I. Kryshev; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 7 pages, 2 illustrations, 3 tables. – References, 6 titles.

A methodological approach is presented for multi-criteria evaluating the effectiveness of radiological and ecological safety measures in radioactive waste management. The approach is based on multi-criterial analysis with consideration of radiological, ecological, social, economical consequences of various safety measures. The practical application of the multi-criteria approach is demonstrated by the example of decision-making on the most effective actions for rehabilitation a water body contaminated with radionuclides.

УДК 621.039.512

Temperature Effects Influence on Secondary Energy Distributions of Scattered Neutrons in the Resonance Region \ V.V. Kolesov, V.F. Ukraintsev; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 5 pages, 5 illustrations. – References, 5 titles.

It is customary to neglect the effect of thermal motion (Doppler effect) and resonance behavior of the elastic scattering on the energy distribution of scattered neutrons in the resonance region. As has been shown early, instead of usual step-function for the energy distribution of scattered neutrons in the resonance region it needs to use more exact expression.

At this work we have researched the nuclei thermal motion and resonance behavior of the neutron elastic scattering influence on the energy distribution of scattered neutrons in the resonance region for a number of important nuclei, as ^{238}U , ^{240}Pu , ^{235}U , ^{155}Gd and ^{167}Er .

УДК 621.039.516.2

The Assessment of Voce Coefficient for WWR-c Reactor \ O.Y. Kochnov, N.I. Ribkin; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 5 pages, 4 illustrations. – References, titles.

The air volume influence in WWR-c reactor core on the total reactivity was analyzed in this article. The experimental dates of voce coefficient depending on the air volume position inside reactor core was done.