

При этих условиях η_6 составит 0,427. Это — наименьшее значение к.п.д. брутто энергоблока при принятых сочетаниях параметров острого пара.

Таким образом, рост термодинамической экономичности энергоблоков с ВВЭР при переходе от циклов насыщенного пара к циклам на закритических параметрах теплоносителя составляет не менее $[(0,427/0,33) - 1] \cdot 100 = 29\%$. В этом случае энергоблоки с ВВЭР по экономичности сравниваются с энергоблоками на основе реакторов с жидкометаллическим теплоносителем.

Расчетные оценки термодинамической эффективности идеальных термодинамических циклов и реальных процессов в турбине выполнены по рекомендациям [3].

Считаю приятным долгом выразить благодарность П.Л. Кириллову за инициирование написания данной статьи и полезные советы при ее обсуждении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ока Yo., Koshizura S. Design concept of once — through cycle supercritical-pressure light water cooled reactors. — In: Intern. Symp. on Supercritical Water-Cooled Reactors, SCR-2000, Nov. 6—8, 2000, p. 1—22, Tokyo.
2. Овчинников Ф.Я., Голубев Л.И., Добрынин В.Д. и др. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1977.
3. Щегляев А.В. Паровые турбины. Теория теплового процесса и конструкции турбин. В двух книгах, книга 1. М.: Энергоатомиздат, 1993.

Поступила в Редакцию 21.12.01

УДК 614.8.084

РАЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДСТВ НА ПОВЫШЕНИЕ ЗАЩИТЫ ЯДЕРНО И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Радаев Н.Н., Мельников М.В. (Военная академия РВСН им. Петра Великого)

Для безопасной эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов в условиях возможной реализации внешних воздействий необходимо принимать превентивные меры защиты [1], направленные на предотвращение аварий и смягчение их последствий для населения и окружающей среды. Защита объектов требует затрат, размер которых зависит от числа уязвимых элементов, вида возможных иницирующих событий и других факторов. В условиях ограниченного финансирования выбор мер защиты должен быть исключительно рациональным. В известных работах конкретные постановки задач оптимизации защиты потенциально опасных объектов исследованы недостаточно, отсутствуют методики оптимизации, адаптированные к исходным данным, например, [2].

Целью статьи является формулировка задачи оптимизации мер защиты от различных негативных воздействий, иницирующих аварии с ядерно и радиационно опасными объектами, и обоснование методики рационального распределения затрат на снижение риска аварий при эксплуатации таких объектов.

Постановка задачи. Пусть в эксплуатации находится N однотипных образцов ядерно и радиационно опасных объектов либо такой объект включает в себя N критических элементов (далее «элементы»), при разрушении или преждевременном срабатывании которых аварийная ситуация может перерасти в аварию. Условия эксплуатации объекта с точки зрения возможности возникновения аварии характеризуются m источниками опасности. Опасность реализуется в виде иницирующих событий для аварии со среднемноголетней частотой реализации $\lambda_j = 1/T_j$, где T_j ($j = 1, \dots, m$) — повторяемость иницирующих событий для аварий j -го вида (средний интервал вре-

мени между инициирующими событиями, устанавливаемый в соответствующих моделях аварийных ситуаций, несанкционированных действий, нападений и др.).

Сила U_j негативных (в частном случае поражающих) факторов, действующих на объект при реализации j -й опасности, по совокупности реализации воздействия и пространственного распределения очага возникновения опасности по отношению к объекту воздействия является случайной величиной. Она описывается характерной для рассматриваемой территории и размещения объектов на ней с учетом пространственного фактора ослабления силы поражающего фактора с удалением от возможного очага воздействия функцией распределения поражающих факторов, формируемых при реализации опасности, по силе $F_j(u) = P(U_j < u)$. Эта функция может быть определена по данным многолетних наблюдений статистическими методами или установлена расчетно-теоретическим методом [3].

Рассмотрим распределение затрат на повышение защиты ядерно и радиационно опасных объектов по видам инициирующих аварий событий (источникам опасности).

По совокупности всех элементов условную (в случае, если воздействие поражающих факторов имеет место) уязвимость объектов будем характеризовать случайной величиной критической силы $U_{крj}$ ($j = 1, \dots, m$) поражающего фактора, начиная с которой изменяется их состояние с безопасного на опасное: разрушение, преждевременное срабатывание (в дальнейшем «разрушение»). Наиболее полным вероятностным описанием условной уязвимости элементов объекта является функция распределения $F_{крj}(u) = P(U_{крj} < u)$, которая для каждого элемента может быть установлена статистическими или расчетно-теоретическими методами.

Если при попадании ядерно и радиационно опасного объекта (его элемента) в зону действия поражающих факторов источника опасности возможно его разрушение, то элемент считается уязвимым. Условие (модель нагрузка—прочность [4]) разрушения элемента j -м поражающим фактором записывается в виде $U_j > U_{крj}$, вероятность этого события $q_j = P(U_j > U_{крj})$.

Для некоторых воздействий характерно распределение не только во времени, но и в пространстве (расположение очага относительно объекта, размер зоны действия его поражающих факторов). Не все объекты (его элементы) в случае негативных воздействий попадают в зону их действия.

Пусть S — площадь зоны возможного расположения объекта при эксплуатации либо площадь объекта, S_{nj} — площадь зоны действия поражающих факторов в случае реализации j -й опасности либо площадь элементов, подвергающихся воздействию поражающих факторов в случае реализации j -й опасности (угрозе разрушения). Тогда доля объектов (элементов) $\alpha_{nj} = S_{nj}/S$ их общего числа может быть определена расчетным методом. Ее можно интерпретировать как вероятность воздействия поражающих факторов на рассматриваемый объект (элемент), которая определяется как доля объектов, подвергшаяся воздействию в случае реализации опасности (или доля площади элемента в общей площади объекта при условии, что распределение воздействий на поверхности объекта является равномерным, а воздействие является точечным, например, прострел пульей стрелкового оружия).

Для повышения защиты ядерно и радиационно опасных объектов осуществляются меры, под которыми в общем случае понимают все меры по снижению риска аварии и ее последствий для населения и окружающей среды. В зависимости от принятой стратегии повышения безопасности это:

- снижение частоты инициирующих аварий событий;
- ослабление уровня действующих на объекты нагрузок (повышение защиты);
- упрочнение (усиление, укрепление) уязвимых элементов;

повышение надежности систем безопасности, предназначенных для предотвращения развития аварийных ситуаций в аварию;
 инженерная защита населения и территорий;
 смягчение последствий аварий (снижение потенциала опасности, в частности, количества радиоактивных веществ на объекте, поддержание аварийно-спасательных формирований в повышенной готовности) и др.

Однако ни одна из мер как организационного, так и технического характера не может гарантировать безопасную эксплуатацию объектов, поэтому обычно используется комплекс мер. Выбор их рационального состава представляет собой отдельную задачу.

Ограничимся рассмотрением мер по повышению защиты объектов (элементов).

Чем больше средняя сила поражающего фактора $\mu = M[U]$ и средняя уязвимость (т.с. ниже $\mu_{кр} = M[U_{кр}]$) объектов (его элементов), тем значительно должны быть меры защиты для исключения их разрушения и инициирования аварии. Необходимые объем мер защиты, обеспечивающих неразрушение объектов (их элементов), и средние затраты d_{gj} на защиту одного объекта (элемента) от j -й опасности рассчитывают с учетом соотношения силы поражающих факторов и уязвимости ядерно и радиационно опасного объекта (его элементов).

Будем полагать, что в случае принятия мер защиты стойкость $\mu_{кр}$ к воздействию поражающих факторов повышается (условная уязвимость снижается) настолько, что $q \rightarrow 0$. Обозначим N_{gj} число защищенных от j -й опасности ядерно и радиационно опасных объектов (уязвимых элементов). Тогда доля $g_j = N_{gj}/N_j$ защищенных объектов (элементов) является показателем его защиты от j -й опасности. При сделанном допущении разрушение объектов возможно только в случае отсутствия защиты. Представим совокупность объектов (или их элементов) в виде смеси двух выборок — незащищенных от j -й опасности объемом $N_j - N_{gj}$ и защищенных объемом N_{gj} . Тогда оценка условной вероятности разрушения произвольного ядерно и радиационно опасного объекта (элемента) определится по формуле

$$q'_j = q_j \bar{g}_j, \quad (1)$$

где $\bar{g}_j = 1 - g_j$ — показатель уязвимости.

На суммарные затраты по повышению защищенности объекта

$$C_g = \sum_{j=1}^m c_{gj} g_j, \quad (2)$$

где $c_{gj} = d_{gj} N_j$, наложено ограничение

$$C_g \leq C_{\text{выд}}, \quad (3)$$

где $C_{\text{выд}}$ — ресурсы на защиту объектов.

Разрушение ядерно и радиационно опасного объекта при эксплуатации от поражающих факторов j -го иницирующего события является сложным событием, которое наступает в случае совместной реализации следующих независимых событий:

реализации опасности j -го вида, характеризуемой математическим ожиданием числа α_j реализаций иницирующих событий за интервал времени Δt , равный обычно году либо сроку эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов;

попадания объектов (их элементов) в зону действия поражающих факторов (пространственный фактор), что характеризуется долей α_{nj} объектов (элементов) их общего числа, подвергающихся угрозе разрушения в случае реализации опасности, или вероятностью воздействия поражающих факторов на произвольный объект (элемент);

разрушения ядерно и радиационно опасных объектов (элементов), подвергшихся воздействию поражающих факторов от опасности j -го вида, при условии реализации программы защиты — характеризуется вероятностью q_j' , определяемой по уравнению (1).

Полагая, что воздействие поражающих факторов опасных явлений на ядерно и радиационно опасные объекты (их элементы) в течение рассматриваемого интервала времени Δt является редким событием, можно предположить, что угрозе разрушения в случае реализации опасности подвергаются различные объекты (элементы). Тогда математическое ожидание числа разрушенных объектов (элементов) за рассматриваемый интервал времени определится по формуле

$$n = \sum_{j=1}^m n_j, \quad (4)$$

где $n_j = \alpha_j \alpha_{nj} q_j N_j \bar{g}_j$ — математическое ожидание числа разрушенных объектов (элементов) за интервал времени Δt в результате действия поражающих факторов j -го иницирующего события.

Пусть $c_{0j} = c_0 \forall j$ — ущерб в случае разрушения одного ядерно и радиационно опасного объекта (элемента). Будем полагать, что ущерб от аварии пропорционален числу разрушенных объектов (элементов). Тогда ущерб от аварии, инициированной реализацией j -й опасности, вычисляется по формуле

$$C_{авj} = c_0 n_j.$$

Суммарный ущерб от аварий объектов вычисляется по формуле

$$C_{ав} = \sum_{j=1}^m C_{авj} = \sum_{j=1}^m C_{авj} \bar{g}_j, \quad (5)$$

где $c_{авj} = c_0 \alpha_j \alpha_{nj} q_j N_j$.

Определим вначале рациональный план распределения ресурсов на повышение защиты ядерно и радиационно опасных объектов по отношению к различным событиям, инициирующим аварии, и с учетом ограничения (3).

Целевая функция. В качестве оптимизируемых параметров будем использовать показатели защиты ядерно и радиационно опасных объектов (элементов) g_j ($j = 1, \dots, m$), которыми при планировании мер защиты можно управлять. Обозначим их вектором $\mathbf{g} = (g_1, \dots, g_m)^T$.

С экономической точки зрения наиболее общими целевыми функциями являются следующие две.

1) Сумма ущерба от аварий $C_{ав}$ и затрат на защиту C_g (или только ущерб от аварий) — с учетом уравнений (2) и (5) $\sum_{j=1}^m c_{авj} + \sum_{j=1}^m (c_{gj} - c_{авj}) g_j$. Критерием оптимальности является минимум целевой функции. Исключив постоянную составляющую, представим целевую функцию в виде

$$f(\mathbf{g}) = \mathbf{c}' \mathbf{g}, \quad (6)$$

где $\mathbf{c}'$ — вектор целевых коэффициентов с компонентами $c_j' = c_{gj} - c_{авj}$; $j = 1, \dots, m$.

2) Разность между предотвращенным ущербом $C_{п.у}$ и затратами на защиту C_g (или только предотвращенный ущерб). Критерием оптимальности является максимум целевой функции. Предотвращенный ущерб вычисляется по формуле

$$C_{п.у} = C_{ав0} - C_{ав} = c_0(n_0 - n),$$

где $C_{ав0}$, n_0 — ущерб от аварий и математическое ожидание числа разрушенных объектов (элементов) без принятия мер защиты (при $\bar{g}_j = 1 \in_j$).

С учетом уравнения (5) $C_{п.у} = \sum_{j=1}^m C_{авj} g_j$. Тогда

$$f(g) = C_{п.у} - C_g = \sum_{j=1}^m c_j g_j, \quad (7)$$

где $c_j = c_{авj} - c_{gj}$.

Таким образом, рассмотренные целевые функции являются взаимно обратными.

Оптимизация защиты объектов методом линейного программирования (определение доли выделяемых средств на защиту от различных инициирующих аварии событий). Выберем в качестве целевой функции равенство (7), ограничения — неравенство (3). Пусть $N_j \rightarrow \infty$, т.е. g_j может принимать любые значения на $[0, 1]$. Тогда задача оптимизации формулируется в следующем виде:

$$\begin{aligned} \max: f(g) &= \sum_{j=1}^m c_j g_j; \\ g_j &\in [0, 1] \forall_j; \\ \sum_{j=1}^m c_{gj} g_j &\leq C_{выд}; \\ g_j &\leq 1; \\ g_j &\geq 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Представим ее как каноническую задачу линейного программирования [5]:

$$\begin{aligned} f(g) &= cg \rightarrow \max; \\ Ag &= b; \\ g &\geq 0, \end{aligned}$$

где $g = (g_1, \dots, g_m)^T$ — искомый вектор; $c = (c_1, \dots, c_m)$ — вектор целевых коэффициентов;

$$A = \begin{pmatrix} c_{g1} & \dots & c_{gm} \\ 1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} \text{ — матрица условий порядка } k \times m;$$

$b = (C_{выд}, 1, \dots, 1)^T$ — вектор ограничений (вектор-столбец порядка k).

Система линейных неравенств выделяет в m -мерном пространстве множество G векторов $g = (g_1, \dots, g_m)^T$, координаты которых удовлетворяют этой системе ($g \in G$). Экстремум достигается в одной из крайних точек допустимого множества G . В силу двойственности задач линейного программирования задачи минимизации целевой функции (6) и максимизации целевой функции (7) дают одно и то же оптимальное решение.

Так как число защищаемых элементов ядерно и радиационно опасных объектов $N_{gj} = g_j N_j$ принимает только целочисленное значение, то при конечных N_j показатели защиты g_j принимают дискретные значения. Следовательно, решаемая задача отно-

сится к типу задач с неделимостью, для решения которых следует применять целочисленное программирование [6]. Методы решения задачи целочисленного программирования основаны на решении базовой задачи линейного программирования. Метод округления дает решение, которое хуже оптимального. Однако при больших N_j оно оказывается приемлемым. Кроме того, нет смысла искать точное целочисленное решение, когда исходные данные заданы со значительной погрешностью. Для выполнения ограничения (4) рациональные значения числа защищаемых элементов можно выбирать по формуле

$$N_{gj}^* \approx ENT(g_j^* N_j),$$

где $ENT(x)$ — целая часть числа x ; g_j^* — оптимальное решение задачи, полученное методом линейного программирования.

Пример. Пусть для условий эксплуатации рассматриваемого ядерно и радиационно опасного объекта характерны $m = 5$ иницирующих событий: 1 — воздействие средств поражения в результате нападений террористических групп (пули, осколки); 2 — несанкционированное действие; 3 — аварийное воздействие, возникающее в аварийных ситуациях с объектом; 4 — ошибочные действия персонала; 5 — нерегламентированное воздействие, возникающее в результате экстремальных природных явлений. Примем для уязвимых элементов $q_j = 1$, ущерб от аварии объекта $c_0 = 10^5$ руб. В очередном году на защиту от аварий выделяется $C_{\text{выд}} = 10^6$ руб.

Для исходных данных, приведенных в таблице, определим рациональную защиту ядерно и радиационно опасных объектов (их элементов) по отношению к разным источникам воздействия и рациональное распределение выделяемых средств на защиту.

Расчет защиты ядерно и радиационно опасных объектов

j	Исходные данные				Результаты расчета				
	a_j	α_{nj}	N_j	d_{gj} руб./объект	c_{gj}	$c_j \cdot 10^6$	c_j/c_{gj}	g_j^*	$C_{\text{выд}}^* \cdot 10^5$, руб.
1	3	0,1	100	10^3	10^5	2,9	29	1	1
2	4	0,1	100	10^4	10^6	3,0	3	0,7	7
3	2	1,0	10	10^4	10^5	1,9	19	1	1
4	0,9	0,1	100	10^3	10^5	0,8	8	1	1
5	0,1	0,5	10	10^4	10^6	-0,05	-5	0	0

Решение. По полученным соотношениям рассчитаем компоненты векторов c и c_g (см. таблицу).

Тогда $c = (-0,05 \cdot 10^6, 0,8 \cdot 10^6, 1,9 \cdot 10^6, 3 \cdot 10^6, 2,9 \cdot 10^6)$;

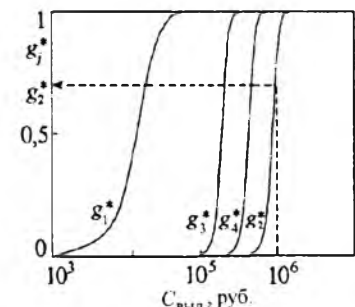
$$A = \begin{pmatrix} 10^5 & 10^5 & 10^5 & 10^6 & 10^5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad b = (1 \cdot 10^6, 1, 1, 1, 1)^T.$$

По программе ЭВМ ILP пакета QSB [7] рассчитан вектор g^* , компоненты которого приведены в таблице. Таким образом, при ресурсах в очередном году целесообразно защитить от поражающих, аварийных и ошибочных воздействий все объекты (элементы), от несанкционированных действий 70% объектов (элементов). Защита объектов в условиях рассматриваемого примера от нерегламентированных воздействий не рациональна. Ресурсы на защиту от j -й опасности вычисляются по формуле

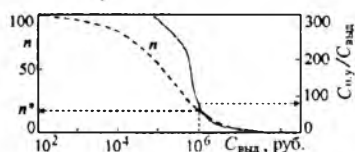
$$C_{\text{выд}j} = g_j N_j d_{gj}.$$

Для принятых исходных данных $n = 12,5$, эффективность затрат на защиту (аналог целевой функции) $C_{\text{п.у}}/C_g = 87$.

Анализ рис. 1, 2 показывает, что в первую очередь рационально повысить защиту объектов (элементов) от тех опасных природных явлений, затраты на защиту от которых относительно невелики, а повторяемость, зона действия поражающих факторов и ущерб значительны.



Р и с. 1. Зависимость рациональной защиты g_j^* от затрат на нее $C_{\text{выд}}$



Р и с. 2. Зависимость опасности n (— — —) и эффективности затрат $C_{\text{п.у}}/C_g$ (—) от $C_{\text{выд}}$

Установлено, что ядерно и радиационно опасные объекты должны защищаться вначале от тех источников опасности, для которых отношение целевых коэффициентов к соответствующим коэффициентам в ограничении больше. Если это отношение отрицательно, то защита от него вообще нерациональна, так как затраты на защиту превышают предотвращаемый ущерб.

С увеличением объема предпринимаемых мер защиты безопасность эксплуатации повышается, но снижается эффективность затрат на защиту. При затратах на защиту, для которых $C_{\text{п.у}}/C_g < 1$ (т.е. $C_{\text{п.у}} < C_g$), дополнительные защитные меры становятся нерациональными.

В общем случае методика распределения ресурсов на реализацию программы защиты ядерно и радиационно опасных объектов от различных источников опасности заключается в следующем:

задание (уточнение) условий эксплуатации (m, a_j, α_{nj}) рассматриваемого объекта;

определение его уязвимости (числа N_j уязвимых элементов, q_j);

расчет затрат d_{gj} ($j = 1, \dots, m$) на защиту одного объекта;

оценка ущерба c_{0j} в случае аварии;

расчет компонентов векторов s и s_g ;

определение оптимальной защиты объектов g_j^* с помощью специального программного обеспечения;

определение по уравнению (8) рационального плана распределения ресурсов на защиту;

реализация программы защиты в течение времени Δt ;

возврат в начало алгоритма и уточнение исходных данных по первым четырем пунктам с учетом уже реализованной защиты и изменившихся за интервал времени Δt условий;

обоснование и реализация очередной программы защиты ядерно и радиационно опасных объектов, соответствующей выделенным ресурсам.

Предложенная методика позволит повысить эффективность использования выделяемых средств на защиту ядерно и радиационно опасных объектов от различных источников опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радаев Н.Н., Потапов Б.В. Экономика природного и техногенного рисков. М.: ФИД «Деловой экспресс», 2001. 513 с.
2. ГОСТ Р 22.2.03-97. БЧС. Паспорт безопасности административно-территориальных единиц. Общие положения. 44 с.

3. Радаев Н.Н. Повышение точности прогноза событий, инициирующих чрезвычайные ситуации. — Измерительная техника, 2002, № 5, с. 13—20.
4. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 609 с.
5. Современные математические методы анализа и синтеза сложных систем. Под ред. В.В. Блаженкова. — М.: МО СССР, 1984. 397 с.
6. Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование. М.: Наука, 1969. 368 с.
7. Рыжиков Ю.И. Решение научно-технических задач на персональном компьютере. СПб.: Корона принт, 2000. 272 с.

Поступила в Редакцию 11.02.02

УДК 546.791.02.234:543.51

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ^{234}U В УРАНЕ РАЗНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Соловьев Г.С., Сапрыгин А.В., Израилевич И.С., Макаров А.А.
(Уральский электрохимический комбинат)

В настоящее время в подкомитете ASTM C 26.02 «Ядерное топливо и делящиеся материалы» ведутся дискуссии о том, какое предельное значение содержания изотопа ^{234}U следует установить в спецификации C787 на коммерческий гексафторид природного урана, предназначенный для обогащения. Ранее в спецификациях C787-90 и C787-96 [1] был установлен предел 58 мкг $^{234}\text{U}/1\text{ г U}$ (58 млн $^{-1}$). В связи с появлением на международном рынке природного урана узбекских месторождений, в котором содержание ^{234}U достигает 62 млн $^{-1}$, фирмы Cogema (Франция) и Nucem (Германия) внесли предложение об изменении предела в сторону увеличения. Представители разделительного производства выступили, наоборот, с предложением о понижении предела до 56 млн $^{-1}$. Их аргументом было то, что даже при 58 млн $^{-1}$ невозможно удовлетворить требования, установленные спецификацией ASTM C996-96 [2], при содержании ^{235}U в обогащенном уране 3,5% и более и 0,3% и более в хвостах. Вариабельность содержания ^{234}U в уране разных месторождений является, скорее, правилом, чем исключением, и причины этого заключаются в следующем.

Как известно, ^{234}U является дочерним продуктом α -распада ^{238}U , и в месторождениях достаточно большого возраста (более 2,5 млн лет) они должны находиться в состоянии радиоактивного равновесия. Тогда можно записать

$$\frac{N_4}{N_8} = \frac{T_4}{T_8}, \quad (1)$$

где N_4/N_8 — отношение ^{234}U к ^{238}U в природном уране; $T_4 = 2,445 \cdot 10^5$ лет — период полураспада ^{234}U [3]; $T_8 = 4,468 \cdot 10^9$ лет — период полураспада ^{238}U [3].

По уравнению (1) легко рассчитать равновесное содержание ^{234}U . Если подставить в уравнение (1) значения периодов полураспада, то $N_4/N_8 = 0,005472\%$, массовое содержание ^{234}U —

$$C_4 = \frac{N_4 A_{234}}{N_8 A_{238} + N_5 A_{235} + N_4 A_{234}}$$

или

$$C_4 = \frac{N_4/N_8 \cdot A_{234}/A_{238}}{1 + N_5/N_8 \cdot A_{235}/A_{238} + N_4/N_8 \cdot A_{234}/A_{238}},$$

где A_x — атомная масса x -го изотопа урана.

Пользуясь известным отношением ^{235}U и ^{238}U , равным 0,00725, получим $C_4 = 0,00534\%$ по массе, или 53,4 млн $^{-1}$.