

14. Читайкин В.И., Ионкин В.И., Иванов Е.А. и др. Ядерно-энергетическая установка с термоэлектрическим преобразователем энергии для космического аппарата радиолокационного наблюдения. Тезисы докл. 5-й Межд. конф. «Ядерная энергетика в космосе», Подольск, 23—25 марта 1999, с. 27—29.

Поступила в Редакцию 28.11.03

УДК 614.8.084

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАССИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СНИЖЕНИЮ ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ОТ ЯДЕРНЫХ И РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ

Рылов М.И., Камынов Ш.В. (РЭСцентр), Можжев А.С.

(СПИК «Севзапмонтажавтоматика»), Анисимов Н.А. (ЦНИИ им. А.Н. Крылова),

Никитин В.С. (НИПТБ «Онега»)

В основу подхода к выбору мероприятий по снижению экономического ущерба от ядерных и радиационных аварий с помощью классических критериев положена предложенная в работе [1] общая методика их формирования для принятия оптимальных решений в условиях риска и неопределенности. Под риском понимается вероятность возникновения неблагоприятных последствий в результате реализации данного события, например, радиационной аварии, под неопределенностью — отсутствие статистической информации об этом событии. Тогда в соответствии с методикой [1] говорят о принятии решений в условиях риска, если известна вероятность сценариев возможных аварий, в противном случае — о принятии решений в условиях неопределенности. В методике предложены достаточно простые способы конструирования известных критериев Бейеса, Лапласа, Вальда, Ходжа—Лемана, Гурвица и др. Анализ полученных критериев позволяет выработать рекомендации для принятия оптимальных управленческих решений в любой сфере деятельности. Для этой же цели можно использовать подходы, изложенные в работе [2]. Применение классических критериев особенно целесообразно на первых этапах анализа возможных аварийных ситуаций и принятия решений. Под критериями понимаются комплексные показатели, служащие мерой для выбранной целевой (оценочной) функции и имеющие, как правило, размерность элементов матрицы оптимизации. В настоящей работе в качестве фактора, характеризующего тяжесть аварии, выбран экономический ущерб (одномерная задача), поэтому необходимо использование методики расчета данного показателя и эффекта от реализации мероприятий по его снижению. В математическом плане задача сводится к расчету последствий и экономического ущерба для выбранных сценариев радиационных аварий и их дальнейшему пересчету для каждого мероприятия, направленного на снижение ущерба. На основании полученных результатов составляется исходная матрица (табл. 1), необходимая в дальнейшем для расчета критериев, в которой P_i обозначают выбранные сценарии радиационных аварий, A_j — мероприятия по снижению экономического ущерба (при этом полагаем $i, j \geq 2$). Таким образом, элементы матрицы представляют собой размер снижения суммарного экономического ущерба в каж-

дом сценарии при реализации данного конкретного мероприятия. Если известна вероятность реализации различных сценариев аварий (q_j), то ее целесообразно перенормировать из следующего условия: $\sum q_j = 1$.

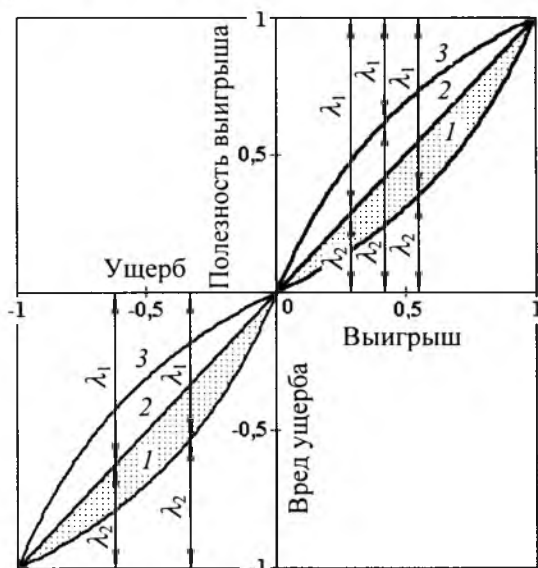
Таблица 1. Исходная матрица А

A_i	J			
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_j
A_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{1j}
A_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{2j}
A_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{3j}
A_i	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{ij}

Каждый сценарий аварии характеризуется также парой чисел λ_{1j} и λ_{2j} , которые будем называть коэффициентами формируемого критерия (показателя пессимизма λ_1 и оптимизма λ_2) и сумма которых для каждого сценария должна быть равна 1. Эти коэффициенты характеризуют степень доверия лица, принимающего решение, к распределению вероятностей сценариев аварий и степень его пессимизма (оптимизма) при принятии решений. На основании исходной матрицы А строится матрица оптимизации В, конкретный вид которой будет зависеть от выбранного критерия, ее элементы b_{ij} соответствуют элементам матрицы А. С использованием матрицы В и коэффициентов λ_j для каждого i -го мероприятия A_i рассчитывается показатель эффективности, представляющий собой суммарное снижение экономического ущерба от его реализации по всем сценариям с учетом вероятностных и субъективных факторов:

$$G_i = G(A_i; \lambda_1, \dots, \lambda_j) = \sum_{j=1}^3 \lambda_j b_{ij}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Поскольку в данном случае речь идет об экономическом ущербе техногенной аварии, то для определения коэффициентов λ_j использована функция нежелательности вреда (ущерба, проигрыша), являющаяся аналогом функции полезности выигрыша, известной из теории страхования. На рисунке линейная зависимость между ущербом и его вредом (кривая 2), а также между выигрышем и его полезностью характеризует объективное отношение к ущербу, кривые 1, 3 соответствуют осторожному и азартному отношению как к ущербу, так и выигрышу. Конкретный вид кривых определяется постановкой оптимизационной задачи и



Функции полезности выигрыша и вреда ущерба

должен являться результатом тщательного психолого-социологического изучения поведения лиц, принимающих ответственные решения. Для определения показателей пессимизма λ_1 и оптимизма λ_2 , необходимых для расчета критериев с помощью программного комплекса АСМ-2001 [3], к виду функции нежелательности ущерба предъявляются дополнительные требования: она должна быть нечетной и определенной в первом и третьем квадрантах, она должна допускать нормировку по максимальному экономическому ущербу, что удобно для получения показателей λ_1 и λ_2 в различных сценариях, желательно, чтобы кривые 1, 3 описывались простой аналитической зависимостью.

В целом указанные требования ограничивают используемые для этой цели функции классом иррациональных функций. Для экономического ущерба в качестве кривой, характеризующей осторожное отношение принимающего решение к ущербу (кривая 1), для интересующего нас третьего квадранта можно принять зависимость $\sim \sqrt[5]{x^3}$, для кривой, характеризующей осторожное отношение к выигрышу, — $Y \sim \sqrt[3]{x^5}$ (для первого квадранта).

В настоящей работе в качестве иллюстрации расчета и применения классических критериев ограничили следующие тремя сценариями аварий, которые могут быть при выгрузке отработавшего ядерного топлива из атомной подводной лодки и хранении:

возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления (первый сценарий Π_1);

падение гражданского самолета на станцию выгрузки (второй сценарий Π_2);

падение гражданского самолета на площадку для хранения контейнеров с отработавшим ядерным топливом (третий сценарий Π_3).

Последние два сценария рассмотрены в связи с событиями, обусловленными проявлениями терроризма. Активность радионуклидов в возможных выбросах из реакторов атомной подводной лодки и радионуклидный состав отработавшего ядерного топлива приняты на основе данных работ [4—6]. Вероятность радиационной аварии на этапе выгрузки топлива может быть определена с помощью программного комплекса АСМ-2001 [3], вероятность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции и падения самолета на указанные объекты принята на основе статистических данных. Односторонняя оценка диапазона вероятности соответствующих сценариев аварий принята для распределения Пуассона при доверительной вероятности 68%, соответствующий квантиль распределения Пуассона составляет $\sim 2,3$ математического ожидания. Экономический ущерб для различных сценариев ядерных и радиационных аварий рассчитан по методике [7]. Результаты расчета суммарного экономического ущерба Y_Σ и отдельных его компонентов для трех сценариев аварий приведены в табл. 2. Указанные в таблице компоненты экономического ущерба имеют следующее содержание: Y_1 — ущерб для здоровья персонала и населения в результате ядерной или радиационной аварии, Y_2 — ущерб, связанный с затратами на радиационное обследование, Y_3 — ущерб, обусловленный прямыми затратами на ликвидацию последствий аварии, Y_4 — экологический ущерб от выбросов и сбросов радиоактивных веществ в окружающую среду, Y_5 — затраты на ремонтно-восстановительные работы после аварии (в пер-

вом приближении принимается $Y_5 \approx Y_3$). Для минимизации экономического ущерба из перечня возможных мероприятий по его снижению, приведенного в работе [6], выбраны следующие (A_i):

A_1 — оперативное использование передвижных установок экстренного подавления огня;

A_2 — организация обучения технического персонала действиям при возникновении пожаров. Реализация мероприятий A_1 , A_2 примерно вдвое снижает длительность пожара и уменьшает его интенсивность. При этом приблизительно вдвое снижается объем выброса радиоактивных веществ в виде аэрозолей и соответственно доза облучения персонала и пожарных;

A_3 — разработка инструкции и технических средств для дезактивации поверхностей помещений, оборудования и территории в аварийных условиях. Реализация этого комплекса мероприятий снизит трудоемкость дезактивации примерно в 2 раза и на 30% уменьшит объем получающихся при этом жидких и твердых радиоактивных отходов;

A_4 — разработка мер по ограничению доступа и времени пребывания персонала и населения на территории вдоль оси факела выброса (в течение 5—10 сут после аварии);

A_5 — разработка превентивных мер по ограничению пребывания персонала в опасной зоне при проведении операций по выгрузке отработавшего ядерного топлива из подводных лодок. Реализация мероприятий A_4 и A_5 снизит коллективную дозу персонала примерно в 2 раза, коллективную дозу населения при прохождении радиоактивного облака — примерно в 5—10 раз.

Таблица 2. Компоненты экономического ущерба в различных сценариях аварий, тыс. руб.

Номер сценария	Вероятность, год ⁻¹	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_Σ
Первый	$\sim(1-2,3)10^{-7}$	194,2	3,3	1553,9	75,0	1553,9	3380,3
Второй	$\sim(1,6-3,7)10^{-5}$	53,6	0,9	365,4	26,8	365,4	812,1
Третий	$\sim(1,6-3,7)10^{-5}$	4,6	0,9	363,4	5,5	363,4	737,8

В целом реализация указанных мероприятий снизит индивидуальную и коллективную дозу облучения персонала и населения, уменьшит площадь загрязненных поверхностей территории промплощадки и оборудования, количество отходов, подлежащих переработке, и как следствие экономический ущерб (табл. 3).

Таблица 3. Матрица оптимизации В

A_i	Снижение экономического ущерба, тыс. руб.		
	Π_1	Π_2	Π_3
A_1	0	-269,5	-239,5
A_2	0	-91,3	-72,9
A_3	-934,6	-281,7	-300,8
A_4	-92,5	-35,8	-4,6
A_5	-138,5	-102,5	-77,5

На основании полученных данных предпринята попытка выбора наиболее эффективного мероприятия на основе классических критериев принятия управленческих решений с использованием результатов работ [1, 2]. Для определения коэффициентов λ_j функция нежелательности вреда (ущерба, проигрыша) нормирована на максимальный экономический ущерб ~ 4000 тыс. руб. и в соответствии с предложениями Фармера [8] аппроксимирована кривой $\sim x^{0,6}$, характеризующей осторожное отношение к риску (кривая 1 на рисунке). После перенормировки вероятности аварии по трем сценариям из условия $\sum_{j=1}^3 q_j = 1$ ($q_j \geq 0$, $j = 1, 2, 3$) получаем $q_1 = 0,003$, $q_2 = 0,4985$, $q_3 = 0,4985$.

Показатели пессимизма-оптимизма для трех сценариев аварий в соответствии с выбранным видом функции нежелательности вреда приведены в табл. 4. Оптимальным будет то мероприятие, при котором расчетный показатель эффективности будет совпадать с максимальным, т.е. $G_k = \max G_i$ при $1 \leq i \leq m$.

Т а б л и ц а 4. Показатели пессимизма-оптимизма для трех сценариев аварий

Показатель	Сценарий аварии		
	Первый	Второй	Третий
Пессимизм λ_1	0,904	0,384	0,363
Оптимизм λ_2	0,096	0,616	0,637

При расчете критерия Бейеса полагаем известной вероятность возможных радиационных аварий. Матрица В выбирается равной матрице А, коэффициенты λ_j — равными соответствующим нормированным вероятностям. При таком подходе принимающий решение субъект не учитывает показатели оптимизма-пессимизма. Тогда показатель эффективности i -го мероприятия (G_i), рассчитанный по формуле (1), представляет собой средневзвешенное по вероятности снижение экономического ущерба: $B_i = G_i = \sum_{j=1}^3 \lambda_j b_{ij} = \sum_{j=1}^3 \lambda_j a_{ij}$. При расчете критерия Ходжа—Лемана

также считаем известной вероятность возможных радиационных аварий, матрица В формируется из двух столбцов. Элементами первого столбца являются показатели эффективности каждого мероприятия по критерию Вальда (т.е. по минимаксному): $W_i = \min a_{ij}$ при $1 \leq j \leq n$ и $i = 1, \dots, m$. Элементами второго столбца являются показатели эффективности по критерию Бейеса: $B_i = \sum_{j=1}^3 q_j b_{ij}$ ($i = 1, \dots, m$), где q_j — вероятность соответствующих сценариев аварий. Значения показателей λ_j принимаются в соответствии с табл. 4, показатель эффективности мероприятия A_i по критерию Ходжа—Лемана

$$G_i = \lambda_1 b_{i1} + \lambda_2 b_{i2} = (1 - \lambda) W_i + \lambda B_i = (1 - \lambda) \min a_{ij} + \lambda \sum_{j=1}^3 q_j a_{ij}. \quad (2)$$

При расчете критерия Гермейера считаем известной вероятность возможных радиационных аварий. Матрица В формируется из одного столбца, элементами которого являются $B_j = \min(q_j a_{ij})$, $i = 1, \dots, m$, при этом показатель λ_1 полагается равным 1, показатель эффективности i -го мероприятия определяется как $G_i = \max(q_j a_{ij})$.

При расчете критерия Лапласа на основе принципа недостаточного основания считаем все три сценария равновероятными при полном доверии к этому принципу (т.е. при $\lambda_j \equiv q_j = 1/n = 0,333, j = 1, 2, 3$). Матрица А формируется из трех столбцов (т.е. $n = 3$) и пяти строк, показатель эффективности мероприятия, обозначаемый

$L_i = G_i = 1/n \sum_{j=1}^3 \lambda_j b_{ij} = 0,333 \sum_{j=1}^3 \lambda_j a_{ij}, i = 1, \dots, m$, будет равен среднеарифметическому

значению элементов строки. Поскольку для расчета критерия произведений (P — критерий [1]) требуется положительность всех элементов матрицы, то при его использовании ограничились двумя сценариями — Π_2 и Π_3 . Вероятность возможных радиационных аварий по этим сценариям также известна. Матрица В формируется

в виде вектора-столбца, элементами которого являются $b_{i1} = \prod_{j=1}^3 (q_j a_{ij}), i = 1, \dots, m$.

Показатель λ_1 полагается равным $\sim 0,37$, т.е. среднему значению, принятому по кривой нежелательности ущерба для второго и третьего сценариев, показатель эффективности i -го мероприятия определяется как

$$G_i = \lambda_1 b_{i1} = \lambda_1 \prod_{j=1}^3 (q_j a_{ij}), i = 1, \dots, m.$$

При оптимизации по критерию Вальда (минимаксный критерий) вероятность возможных аварий считаем неизвестной, поэтому решение принимается в условиях неопределенности. В этом случае матрица В представляет собой вектор-столбец с элементами $b_{i1} = \min a_{ij} (i = 1, \dots, m, 1 \leq j \leq n)$, оптимальным является мероприятие с максимальным показателем эффективности, т.е. $W_k = \max W_i = \max \min a_{ij}$.

При расчете критерия Гурвица вероятность возможных аварий считаем неизвестной, но при использовании лишь одного значения λ_1 обобщенный критерий вырождается в обычный критерий пессимизма-оптимизма Гурвица [1]. В этом случае матрица В размерности $m \times 2$ формируется из матрицы А в виде двух столбцов, элементы которой в строках расположены в неубывающем порядке: $b_{i1} = \min a_{ij}, b_{i2} = \max a_{ij}, i = 1, \dots, m$. Тогда для критерия Гурвица получаем следующее выражение: $H_i = G_i = \lambda_1 b_{i1} + \lambda_2 b_{i2} = (1 - \lambda) \min a_{ij} + \lambda \max a_{ij}, i = 1, \dots, m$.

Из табл. 5 видно, что по большинству критериев оптимальной с точки зрения экономического ущерба является стратегия A_3 , т.е. комплекс мероприятий по снижению в экономическом ущербе доли компонента, связанного с прямыми затратами на ликвидацию последствий радиационной аварии. Это объясняется как значительным выбросом радиоактивных веществ при ядерных и радиационных авариях, развивающихся по всем трем сценариям, так и чрезвычайно высокими тарифами на работы, выполняемые специализированными комбинатами системы «Радон». В то же время очевидно, что значительную роль при выборе оптимального мероприятия может сыграть и стратегия A_1 , связанная непосредственно со снижением выброса радиоактивных веществ в атмосферу. На основе полученных результатов для лица, принимающего решение, можно сформулировать следующие рекомендации:

классические критерии целесообразно использовать на первом (предварительном) этапе анализа возможных сценариев аварий и мероприятий по снижению их последствий;

при анализе полученных критериев следует отдавать предпочтение составным (сложным) критериям, например, Ходжа—Лемана, Гурвица, Бейеса—Лапласа, поскольку они в той или иной степени учитывают вероятности аварий, субъективные показатели и частично включают в себя более простые критерии;

управленческое решение, выбираемое единолично ответственным лицом, должно быть обусловлено исключительно осторожным отношением к риску ввиду ожидаемых значительных радиационных последствий и экономического ущерба, так как именно такое отношение является определяющим при учете всех объективных факторов;

конкретные показатели для оптимизации (экономический ущерб, коллективная доза, степень радиоактивного загрязнения территории предприятия и объектов окружающей среды и др.) и их значимость (приоритет) также выбирает лицо, принимающее решение, в зависимости от сценариев и ожидаемых масштабов аварии, а оптимизировать с помощью классических критериев можно отдельно каждый показатель.

Т а б л и ц а 5. Показатели эффективности и выбор оптимальной стратегии

Меры	Критерии						
	Бейеса	Ходжа—Лемана	Гермейера	Произведение	Лапласа	Вальда	Гурвица
A ₁	254	159	119	5,9·10 ³	170	0	166
A ₂	82	51	36	6,1·10 ²	55	0	56
A ₃	293	290	140	7,8·10 ³	506	108	123
A ₄	20	14	2,3	15	44	1,7	3,2
A ₅	90	84	39	7,2·10 ²	106	28	30
Оптимальные	A ₃ , A ₁	A ₃	A ₃ , A ₁	A ₃ , A ₁	A ₃	A ₃	A ₁ , A ₃

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лабскер Л.Г., Яновская Е.В. Общая методика конструирования критериев оптимальности решений в условиях риска и неопределенности. — Управление риском, 2002, № 4, с. 13—24.
2. Радаев Н.Н., Мельников М.В. Обоснование решений на защиту ядерно и радиационно опасных объектов. — Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 2, с. 146—153.
3. Можаяев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ-2001). — В сб.: Межд. научная школа «Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах». СПб., ООО НПО «Омега», 2001, с. 56—61.
4. Никитин В.С., Мишнев А.М. Технологические аспекты и необходимые технические средства для утилизации многоцелевых АПЛ в Северо-Западном регионе России. — В сб.: Межд. сем. «Проблемы утилизации многоцелевых АПЛ в Северо-Западном регионе России», 26—27 марта 2003 г., Северодвинск, с. 4—22.
5. Васильев А.П. Радиоактивные, вредные и токсичные отходы, образующиеся при утилизации АПЛ, и обеспечение экологической безопасности в Северо-Западном регионе России. — Там же, с. 39—48.
6. Комплексная утилизация АПК «Курск» на СРЗ «Нерпа». Количественная оценка радиационного и химического риска при выгрузке ОЯТ с АПК «Курск» и его утилизация на СРЗ «Нерпа». Отчет о НИР, инв. № НЯДИ У949А. 0415.00.001. ФГУП НИПТБ «Онега», 2002. 102 с.
7. Методика расчета экономического ущерба от радиационных аварий при использовании радиоактивных веществ в народном хозяйстве. С.-Петербург, РЭСцентр, рег. № Р-03/98, 1998.
8. Farmer F. — Nucl. Safety, 1967, v. 8, № 6, p. 539—548.

Поступила в Редакцию 8.10.03