

их основе комплексов по сбору, кондиционированию и временному хранению радиоактивных отходов, образующихся в зоне обслуживания. В настоящее время МосНПО «Радон» приступило к реализации этой концепции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоров Н.Н. Состояние проблемы с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом в России — проблемы и направления решения. Труды совещания МАГАТЭ, Вена, 15—18 мая 1995.
2. Соболев И.А., Хомчик Л.М. Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. Соболев И.А., Коренков И.П., Хомчик Л.М., Проказова Л.М. Радиационная безопасность при обезвреживании радиоактивных отходов. М.: Энергоатомиздат, 1992.
4. Sobolev I.A., Dmitriev S.A., Barinov A.S. e.a. Management of institutional and industrial radioactive waste in Central Russia. — In: Proc. Intern. Conf. Waste Management'95, Tucson (USA), 1995, CD-ROM.
5. Дмитриев С.А., Лифанов Ф.А., Князев И.А. и др. Некоторые аспекты совершенствования технологии термической переработки горючих радиоактивных отходов и кондиционирования зольного остатка. — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 5, с. 304—306.
6. Sobolev I.A., Panteleev V.I., Demkin V.I. Mobile plant for low level radioactive waste processing. — In: Proc. Intern. Conf on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation, Prague, 1993, v. 3, p. 775—780.
7. Sobolev I.A., Dmitriev S.A., Lifanov F.A. e.a. Low and intermediate level waste vitrification: basic principles, process units and product characterization. — In: Proc. Intern. Conf. Waste Management'95, Tucson (USA), 1995, CD-ROM.
8. Соболев И.А., Арустамов А.Э., Ширяев В.В. и др. Передвижная установка для включения в металлическую матрицу высокоактивных твердых отходов. — Атомная энергия, 1993, т. 74, вып. 6, с. 531—533.
9. Technical Rept, Ser. № 223. Vienna: IAEA, 1991.
10. Карлина О.К., Овчинников А.В., Ожован М.И. и др. Исследование возможности дезактивации асфальтобетонных покрытий, загрязненных радионуклидами. — Атомная энергия, 1995, т. 78, вып. 4, с. 270—274.
11. Вербов В.В., Польский О.Г., Пузанов Ю.В. и др. Оценка воздействия на окружающую среду предприятий по обращению с радиоактивными отходами. — Там же, 1993, т. 75, вып. 5, с. 389—391.

Поступила в Редакцию 25.09.95

УДК 621.039.533

ОПТИМИЗАЦИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

*Амосова Т.В. (Госкоматом, Украина), Козлов В.Ф., Кузьмин И.И.,
Лысцов В.Н. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Махутов Н.А. (ИМАШ РАН),
Меньшиков В.Ф. (Совет Безопасности РФ)*

В 1990 г. Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) приняла новые рекомендации по радиационной безопасности, оформленные в виде Публикаций № 60, № 61 [1, 2]. Ими предусматривается оценка только радиационного риска, хотя и отмечается, что такую оценку следует проводить в сравнении с другими видами риска нерадиационного характера. Опыт показал, что невозможно оптимизировать решения по ликвидации последствий аварии путем оценки только радиационного риска, обусловленного аварией [3]. Для того чтобы решения были оптимальны, необходимо учитывать и нерадиационные факторы воздействия на население (экологические, психологические, социальные и др.). Чтобы учесть это обстоятельство, авторы настоящей статьи использовали принцип оценки риска для здоровья человека и состояния окружающей его социально-экономической и природной среды и управлению им в социально-экономической системе, предложенной в работе [4].

Управление риском, связанным с конкретным источником опасности, должно осуществляться с учетом всего совокупного риска для человека, населения и природной среды, обусловленного хозяйственной деятельностью в рассматриваемой социально-

экономической системе и ее социально-экономическим развитием. Согласно этому принципу тот или иной вид практической деятельности, направленной на устойчивое развитие социально-экономической системы, должен осуществляться таким образом, чтобы личность и общество получили максимальную пользу: улучшилось качество жизни и повысилась безопасность.

Рекомендуемая МКРЗ система радиационной безопасности для вмешательства после аварии в целях защиты населения основана на следующих двух принципах:

предполагаемое вмешательство должно принести больше пользы, чем вреда, т.е. уменьшение ущерба в результате снижения дозы облучения должно быть достаточным, чтобы оправдать вред от вмешательства и затраты на него, включая социальные;

формы, масштаб и длительность вмешательства должны быть оптимизированы таким образом, чтобы чистая польза от снижения дозы, т.е. польза от уменьшения ущерба от излучения за вычетом ущерба, связанного с вмешательством, была максимальной.

К сожалению, практическая реализация этих принципов сталкивается с серьезными трудностями — отсутствием общепринятой методики определения оптимального баланса между опасностью и выгодой от вмешательства или той или иной деятельности, позволяющей количественно выразить в одних и тех же единицах как опасность, так и выгоду той или иной деятельности с учетом социальных и экономических последствий для личности и общества.

Предложенный принцип оценки совокупного риска и управлению им в социально-экономической системе позволяет наиболее эффективным образом реализовать рекомендации МКРЗ на практике. Фундаментальное значение при этом имеет то обстоятельство, что предложенный принцип использует в качестве единицы измерения безопасности человека среднюю ожидаемую продолжительность его предстоящей жизни. Поскольку она представляет собой величину, мерой которой является количественный показатель, процесс управления риском может быть поставлен на научную основу [1, 4—6].

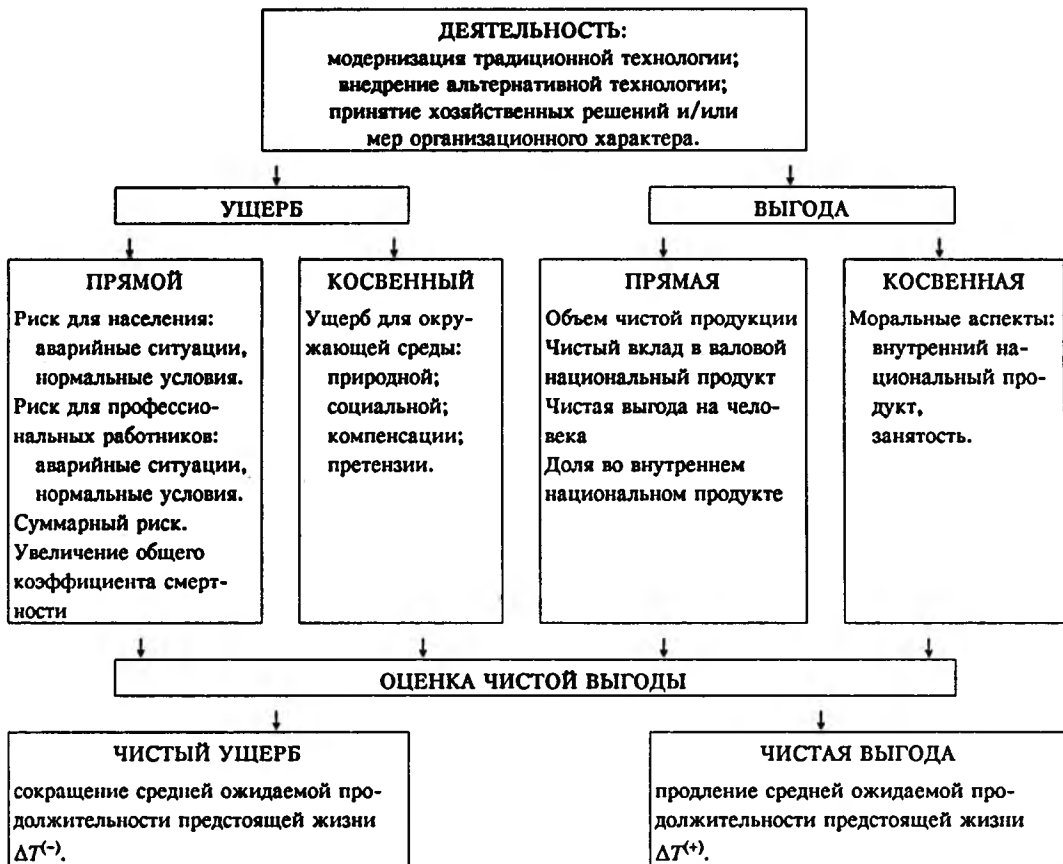
В соответствии с этим принципом риск для населения от вмешательства или внедрения в практику рассматриваемого вида деятельности выражается в виде сокращения средней ожидаемой продолжительности предстоящей жизни (обозначим ее как $T^{(-)}$), а выгоду от нее — в виде ее продления ($T^{(+)}$). Сопоставление этих показателей (рис. 1) и позволяет количественно оценить величину и характер изменения уровня безопасности от рассматриваемой деятельности или вмешательства.

Цель оптимизации безопасности состоит в том, чтобы при этом обеспечить чистую выгоду, которую можно выразить следующим образом:

$$B = T^{(+)} - T^{(-)}, \quad (1)$$

где B — чистая выгода; $T^{(+)}$, $T^{(-)}$ — продление и сокращение средней ожидаемой продолжительности предстоящей жизни, обусловленные соответственно «выгодой» и «ущербом», характеризующими обсуждаемую деятельность или вмешательство (см. рис. 1).

Оценку ожидаемой чистой выгоды от рассматриваемой деятельности в единицах продления жизни предлагается выполнять, используя статистические данные, которые определяют зависимость средней ожидаемой продолжительности предстоящей жизни в какой-либо социально-экономической системе от уровня развития ее экономики (рис. 2). Используя эти данные, можно рассчитать для той или иной социально-экономической системы, достигшей определенного уровня экономического развития (валового национального продукта на душу населения), эффективность снижения при-сущего ей риска. В качестве показателя эффективности $S(M_i)$ принято следующее соотношение: $S(M_i) = \Delta M_i / \Delta T_i$, где $\Delta M_i = M_{i+1} - M_i$; $\Delta T_i = T_{i+1} - T_i$; M_i — годовые материальные ресурсы среднестатистического человека в данном обществе (валовой



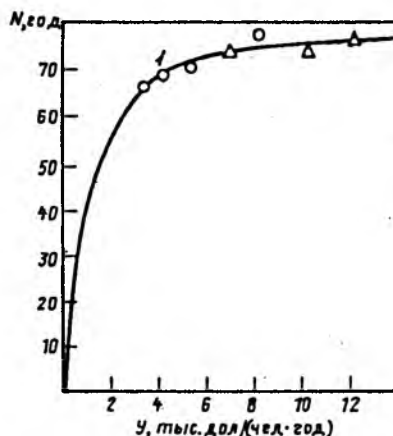
Р и с. 1. Оценка результирующей полезной деятельности: если $T^{(+)} - T^{(-)} > 0$, то деятельность оправдана

национальный доход или продукт на душу населения); T_i — средняя ожидаемая продолжительность предстоящей жизни в этом обществе. По этой формуле определяют ежегодные затраты на каждого человека, которые необходимы в данной социально-экономической системе, характеризующейся показателями T_i и M_i , на продление жизни среднестатистического человека на один год. Так как ежегодные затраты ($\Delta M_i = M_{i+1} - M_i$) необходимы на весь период жизни человека, то полная стоимость продления жизни (на один дополнительный год) среднестатистического человека составит

$$S = S_i(M_i) \int_0^{T_{\max}} \exp(-rt) dt =$$

$$= S_i(M_i) [1 - \exp(-rT_{\max})] / r,$$

где $\exp(-rt)$ — известная в экономике функция дисконтирования (временной взвешивающий фактор), позволяющая взвешивать затраты с течением времени; r — ко-



Р и с. 2. Ожидаемая продолжительность жизни N в зависимости от экономического развития Y : 1 — СССР; O, Δ — группы, включающие 11—13 и 3—4 страны соответственно

эффицент дисконтирования (норматив приведения затрат к единому времени, год⁻¹); $T_{\max}$ — продленная средняя ожидаемая продолжительность жизни. Отметим, что величину типа S в экономической теории называют предельными затратами. Здесь они означают стоимость продления жизни на год среднестатистического человека в рассматриваемой социально-экономической системе вследствие повышения его благосостояния (на единицу валового годового продукта или дохода) и соответственно снижения для него совокупного риска от многочисленных источников опасности, имеющих в данной системе.

Полученные таким образом значения стоимости продления жизни для некоторых стран, отличающихся уровнем социально-экономического развития, представлены в таблице.

Оценка стоимости продления жизни и оптимальных затрат на снижение коллективной дозы облучения на 1 чел.·Зв (по состоянию на 1985 г.)

Страна	Личное потребление, межд. дол. на 1 чел./год	Валовой национальный продукт, межд. дол. на 1 чел./год	Стоимость продления жизни на 1 год, тыс. межд. дол.	Оптимальные затраты на снижение дозы в 1 чел.·Зв, тыс. межд. дол.
Китай	1114	2444	1—6	1—6
СССР	2198	4996	5—30	5—30
Великобритания	5174	8655	30—80	30—80
США	8542	12532	80—200	80—200

* Монетарная единица, используемая в экономических расчетах ООН.

Из данных, представленных в таблице и рис. 2, можно сделать следующий вывод: развитие каждой социально-экономической системы (например, государства или того или иного экономически независимого региона в государстве) требует характеризовать помимо таких общепринятых показателей, как валовой национальный продукт и доход, определяющих экономическое развитие и потребление в обществе, еще одним показателем — стоимостью продления ожидаемой продолжительности предстоящей жизни, которая оценивает эффективность системы безопасности данной социально-экономической системы. При этом по мере социально-экономического развития вклад единицы ресурсов в социально-экономическую систему безопасности становится все менее эффективным с точки зрения повышения средней ожидаемой продолжительности предстоящей жизни, т.е. защищенности населения от опасностей данной социально-экономической системы. Природа этого закона имеет простую интерпретацию. В высокоразвитых странах фактически ликвидированы те виды опасности, которые могут быть устранены с помощью относительно экономически недорогих мер защиты. Вследствие этого повышение безопасности населения в этих странах требует реализации дорогостоящих программ. В слаборазвитых странах снижение смертности и заболеваемости и соответственно продление продолжительности жизни достижимо за счет менее дорогостоящих программ (мер защиты), таких, как обеспечение населения простейшими продуктами питания и простейшими медикаментами, повышением культуры гигиены, грамотности и т.д.

Из данных таблицы и рис. 2 следует, что стоимость продления средней ожидаемой продолжительности предстоящей жизни на год дополнительной жизни в социально-экономической системе равна годовому валовому национальному продукту (Π) или годовому доходу (D), приходящемуся на душу населения, возведенному в квадрат: $S = [\Pi/(\text{чел.} \cdot \text{год})]^2 = [D/(\text{чел.} \cdot \text{год})]^2$.

Необходимо отметить, что понятие «стоимость продления жизни» следует отличать от понятия «стоимость человеческой жизни», которое обычно применяется в традиционных методах управления риском. Однако понятие «стоимость жизни», представленное в денежном эквиваленте, является недопустимым по моральным и этическим соображениям. Никто, кроме самого индивидуума, не может устанавливать денежную

стоимость жизни. Если установлена стоимость продления жизни в какой-либо социально-экономической системе, то выгода $T^{(+)}$ от рассматриваемой деятельности в единицах продления жизни составит $T^{(+)} = \Delta C/S$, где ΔC — годовой прирост валового национального продукта или дохода на душу населения в результате внедрения этой деятельности в практику.

Оценку ущерба от рассматриваемой деятельности в единицах сокращения продолжительности жизни, т.е. $T^{(-)}$ следует выполнять для каждого конкретного вида деятельности, учитывая его особенности. В эту оценку должны быть включены различные виды воздействия на человека и окружающую среду, обусловленные данным видом деятельности (см. рис. 1).

Укажем, что переход от показателей риска $R(f)$ для населения, проживающего в районах АЭС, к показателям продолжительности жизни можно выполнить с помощью

соотношения $\Delta T^{(-)} = \int_0^T R(t) t dt$, где $\Delta T^{(-)}$ — сокращение средней продолжительности

жизни вследствие индивидуального риска преждевременной смерти в возрасте t , равного $R(t)$. Если $R(t) = R_0 = \text{const}$, то $T^{(-)} = R_0 T^2/2$.

Отметим, что, например, при средней продолжительности жизни, равной 75 годам, дополнительный индивидуальный риск преждевременной смерти, составляющий, например, $R_0 = 10^{-5}$ в год, приводит к сокращению продолжительности жизни на $\Delta T^{(-)} = 24,6$ ч, т.е. на одни сутки, т.е. фактически не существен и согласно международным нормам [8] считается пренебрежимо малым.

Как показывают данные рис. 2, можно увеличить продолжительность жизни $T^{(+)}$ до любого желаемого уровня, используя все более и более совершенные меры защиты в рассматриваемой деятельности. Однако это повлечет возрастание стоимости затрат на такие меры и соответственно уменьшение вклада указанной деятельности в повышение валового национального продукта и других показателей, определяющих ее выгоду. В конечном итоге уменьшится прирост продолжительности жизни $T^{(+)}$ за счет внедрения данной деятельности.

Таким образом, встает задача об оптимизации затрат, направляемых на снижение риска от рассматриваемой деятельности. Условие оптимальности затрат, т.е. максимальности чистой выгоды V , определяемой соотношением (1), и является тем необходимым и достаточным условием, обеспечивающим максимальную общественную полезность рассматриваемой деятельности. Согласно теореме равновесия в управлении риском это условие можно представить в виде

$$S_T = S, \quad (2)$$

где стоимость продления жизни S_T определяет эффективность затрат на снижение риска от рассматриваемой деятельности (например, развития ядерной энергетики) вследствие совершенствования мер безопасности (технического или организационного характера), а стоимость продления жизни S — эффективность затрат на снижение совокупности всех других видов риска, характеризующих данную социально-экономическую систему.

Условие оптимальности затрат на снижение риска (2), следующее из теоремы равновесия в управлении риском, позволяет разработать относительно простой для практического использования метод оптимизации затрат на снижение различных видов риска.

Для этого предлагается данные о стоимости продления жизни в рассматриваемой социально-экономической системе (см. таблицу) использовать в качестве норматива ($S_{II} = S$) для принятия решения о допустимых затратах на системы безопасности в технологии, действующей или предлагаемой к применению в данной социально-экономической системе.

Согласно условию (2) системы безопасности в той или иной технологии имеют право на внедрение в практику, если стоимость продления жизни S_T с их помощью не превышает рассчитанного нормативного S_H для данной системы: $S_T < S_H$.

Используем такой подход для определения допустимых затрат на снижение риска от ядерной энергетики. Уровень риска зависит от коллективной эффективной дозы облучения населения. В соответствии с сегодняшним уровнем знаний коллективная доза 1 чел.·Зв ведет к сокращению ожидаемой продолжительности жизни в целом на 0,5—2 чел.·год из-за смертности от рака или онкологических заболеваний [1, 2]. Следовательно, согласно условию (2) затраты на снижение дозы 1 чел.·Зв за счет внедрения технических систем защиты от облучения или принятия мер организационного характера после аварий, например, эвакуации населения, равные (0,5—2) S_T , будут оптимальны, если $S_T = S_H$, где S_H — нормативная стоимость продления жизни в социально-экономической сфере какого-либо региона (см. таблицу).

Рассчитанные с помощью этой формулы оптимальные затраты на снижение дозы облучения, обусловленной ядерной энергетикой, на 1 чел.·Зв в странах с равным уровнем развития экономики представлены последним столбцом таблицы.

В соответствии с рекомендациями МКРЗ [1] в расчетах было принято, что доза 1 чел.·Зв ведет к сокращению ожидаемой продолжительности жизни на 1 чел.·год. Из данных, представленных в таблице, следует, что оптимальные затраты на снижение дозы облучения на 1 чел.·Зв равны годовому валовому национальному продукту или годовому доходу, приходящемуся на душу населения в данной социально-экономической системе, возведенному в квадрат.

Кроме того, из данных таблицы следует:

если затраты на технические системы безопасности на АЭС в регионе соответствуют (равны) оптимальным затратам, указанным в таблице, то полный риск для населения данной социально-экономической системы соответствует минимально достижимому в этом регионе уровню. При этом предполагается, что такая же оптимизация затрат реализована для технических систем безопасности в других отраслях промышленной и хозяйственной деятельности рассматриваемой социально-экологической системы;

если затраты на технические системы безопасности на АЭС в регионе превышают затраты, указанные в таблице, то полный риск для населения данного региона будет выше уровня минимально достижимого для этого региона в результате излишних затрат на АЭС и нехватки средств в других отраслях. Отметим, что в такую ситуацию попадет СНГ, если оно использует на своих АЭС дорогостоящие системы безопасности, принятые, например, на АЭС в США.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г., ч. 1. Пределы годового поступления радионуклидов в организм работающих, основанные на рекомендациях 1990 года. Публикация № 60, ч. 1, № 61 МКРЗ. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1994.
2. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Публикация № 60, ч. 2. М.: Энергоатомиздат, 1994.
3. Кузьмин И.И., Романов С.В. Уроки крупных промышленных аварий. — В сб.: Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, вып. 7. М., ВИНТИ, 1990, с. 1.
4. Кузьмин И.И., Шапошников Д.А. Концепция безопасности от риска «пулевого» — к «приемлемому». — Вестник Российской академии наук, 1994, т. 64, № 5, с. 402.
5. Babaev N.S., Kuz'min I.I., Mahutov N.A. Health and safety policies: principles for nuclear risk management. — In: Techn. Com. Meeting on Environmental Impacts and their Mitigation in Nuclear Fuel Cycle Facilities. Vienna: IAEA 14—19 November 1994 (Ref. 641-T1-TC-817.30).
6. Кузьмин И.И., Кириллова Г.В. Критерии безопасного проживания населения на территориях с повышенным риском. — В сб.: Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, вып. 3. М., ВИНТИ, 1991.
7. Cohen B. Discounting in assessment of future radiation effects. — Health Phys., 1983, v. 45, № 3, p. 687—697.
8. International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation. Vienna: IAEA, GOV/2715, 1994.