

**В.А. Легасов, В.Ф. Демин,
Я.В. Шевелев**

ИАЭ-4072/3

**ЭКОНОМИКА БЕЗОПАСНОСТИ
ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Москва 1984

Ключевые слова: безопасность, ядерная энергетика, экономический анализ, риск, цена риска, оптимизация, радиационная защита.

Выполнен критический анализ существующих концепций и подходов к обеспечению безопасности ядерной энергетике и других сфер производственной и непроизводственной деятельности человека. Показана необходимость развития обобщенного метода экономического анализа безопасности (МЭАБ). Его назначение — обоснование и оптимизация защитных мероприятий. Рассмотрены проблемы развития МЭАБ. Предложен ряд решений по развитию концептуальных основ и составных частей МЭАБ. Рассмотрен вопрос о цене риска и радиационного облучения человека. Обосновано применение процедуры дисконтирования к оценке риска и ущерба, обусловленных вредным воздействием на здоровье человека. Приведены примеры анализа ряда систем безопасности в ядерной энергетике и других областях жизни и деятельности человека.

The existing conceptual and methodical basis for the decision-making process insuring safety of the nuclear power and other (industrial and non-industrial) human activities is critically analyzed. Necessity of developing a generalized economic safety analysis method (GESAM) is shown. Its purpose is justifying safety measures. Problems of GESAM development are considered including the problem of costing human risk. A number of suggestions on solving them are given. Using the discounting procedure in the assessment of risk or detriment caused by harmful impact on human health is substantiated. Examples of analyzing some safety systems in the nuclear power and other spheres of human activity are given.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ядерная энергетика (ЯЭ) благодаря принятым мерам защиты характеризуется высоким уровнем безопасности для персонала и населения [1]. Вместе с тем по мере расширения масштабов внедрения ЯЭ в народное хозяйство происходит дальнейшее совершенствование систем безопасности на ее предприятиях. Растут расходы на защитные мероприятия. До какого уровня оправдан рост этих расходов? Этот же вопрос, независимо от достигнутого уровня безопасности, стоит практически перед любым производством.

В настоящее время в каждой отрасли промышленности или области человеческой деятельности, как правило, вырабатываются свои принципы безопасности и ее обеспечения. Таково положение как в нашей стране, так и за рубежом. В результате имеют место большие различия в положении дел с обеспечением безопасности в разных областях человеческой деятельности. Некоторые данные, характеризующие эти различия, приведены в табл. 1. Важно отметить, что главное здесь не в разных уровнях безопасности, а в неоптимальном распределении средств на меры ее обеспечения.

Все это ставит проблему разработки универсальных принципов и методов анализа безопасности, а также оптимизации мер по ее обеспечению.

Настоящая работа посвящена развитию концептуальных основ и ряда составных частей метода экономического анализа безопасности (МЭАБ). Кроме того, приведены примеры анализа некоторых систем безопасности в ЯЭ.

Т а б л и ц а 1. Эффективность ϵ предельных затрат на обеспечение безопасности в некоторых сферах деятельности и жизни человека (данные для США и Англии) [2 – 4]

Мера безопасности, снижения риска	ϵ , число спасенных жизней на 10^6 дол.
Газоочистка на АЭС	$\leq 0,1$
50%-ная очистка от серы дымовых газов угольных ТЭС	0,4
Контроль качества питьевой воды	0,4
Безопасность на дорогах	7
Раннее обнаружение рака	10 – 100
Изотопное поддержание ритма сердца	20
Передвижные кардиологические пункты неотложной помощи	30

П р и м е ч а н и е. Имеются данные о том, что в развитых странах большое число жизней может быть спасено с эффективностью $\epsilon > 3$, если будут выделены соответствующие средства на обеспечение безопасности [3]

2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ИСХОДНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Риск r – индивидуальная вероятность заболевания или смерти под влиянием некоторого вредного фактора (радиационного облучения, аварий и т.п.).

Риск R , или коллективный риск – сумма индивидуальных рисков в рассматриваемом коллективе людей: $R = \sum_i r_i$; или $R = \sum_k N_k \cdot r_k$, где N_k – число людей, для которых $r = r_k$; иначе R можно назвать числом случаев заболевания или смерти в этом коллективе.

Интенсивность или уровень риска – приращение риска за единицу времени действия вредного фактора, размерность – год⁻¹, обозначение \dot{r} или \dot{R} . Пример: среднее значение \dot{r} в промышленности равно $2 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹ (погибает в том или ином возрасте 2 чел. из 10 тыс. чел. в результате всех причин, обусловленных их участием в течение года в производственном процессе).

Безопасность – понятие, характеризующее степень защищенности человека на производстве или вне его от некоторого опасного фактора (аварии, аварийное или постоянно действующее загрязнение окружающей среды, рабочих помещений и т.п.).

Защита — технические и прочие меры по обеспечению безопасности; *X* — *затраты на защиту* (включают капитальную и прочие составляющие).

Экономическая значимость риска Y; в более узком смысле и значении (в каком *Y* чаще всего понимается в настоящее время) — это прямой *ущерб*, обусловленный преждевременной смертью или заболеванием людей под действием рассматриваемого фактора.

Основной фактор воздействия предприятий ЯЭ на здоровье человека — ионизирующее излучение. При существующих и предполагаемых уровнях облучения человека за счет ЯЭ эффектами этого облучения являются канцерогенные и генетические заболевания. Их проявление носит вероятностный характер и не имеет порога действия. В соответствии с рекомендациями ряда отечественных и международных регламентирующих и научных организаций для оценки радиационного риска смерти в результате названных выше эффектов следует использовать линейную зависимость доза — эффект [1,5 — 11]:

$$r = a H \quad (2.15)$$

или

$$R = a S, \quad (2.16)$$

где *H* — индивидуальная эффективная эквивалентная доза облучения человека, служащая мерой радиационного риска, единица измерения — бэр (биологический эквивалент рентгена); *S* — коллективная доза — сумма индивидуальных доз в рассматриваемом коллективе людей:

$$S = \sum_k N_k H_k \quad \text{или} \quad S = \int_0^{\infty} N(H) H dH, \quad (2.2)$$

где N_k — число людей, получивших дозу H_k ($N(H) dH$ — число людей, получивших дозу в интервале $(H, H + dH)$). Единица измерения *S* — человеко-бэр. Коэффициент пропорциональности *a* равен $a \approx 2 \cdot 10^{-4}$ / (бэр или чел.-бэр). Это значение *a* включает риск смерти от рака ($\approx 1,2 \cdot 10^{-4}$), риск появления серьезных наследственных заболеваний в первых двух ($\approx 0,4 \cdot 10^{-4}$) и последующих ($\approx 0,4 \cdot 10^{-4}$) поколениях. Эти заболевания по степени вреда для общества считаются эквивалентными смерти от рака [5,6].

Примеры значений дозы облучения людей: годовое значение H в среднем 0,1 бэр для облучения за счет естественного радиационного фона и примерно столько же за счет медицинских рентгеновских процедур [1]. Соответствующая интенсивность радиационного риска равна $\dot{r} = 2 \cdot 10^{-5}$ /год для каждого из этих источников радиационного облучения (это значение соответствует смерти двух человек на 1 год действия источника и на каждые 100 тыс. населения).

Осуществление мер радиационной безопасности на предприятиях ЯЭ и других радиационно опасных производствах регламентируется следующими принципами [6,12]:

- 1) исключение всякого необоснованного облучения;
- 2) непревышение установленного основного дозового предела (ДП);
- 3) снижение дозы облучения до возможно низкого уровня (с учетом экономических и социальных факторов [6]).

Например, для работы предприятий в нормальном режиме установлены следующие основные ДП: 5 и 0,5 бэр/год соответственно для персонала и населения. Кроме того, санитарными правилами установлен контрольный уровень 0,025 бэр/год, ограничивающий дозы облучения населения за счет АЭС [1]. Следует особо подчеркнуть, что основные нормативы в радиационной безопасности — ДП — имеют другой смысл, чем основные нормативы, устанавливаемые для ряда химических загрязнителей биосферы. А именно, ДП служат цели ограничения радиационного риска сверху. Верхний предел риска, по которому вычисляются соответствующие ДП, устанавливается на уровне *допустимого риска*. Значения допустимого риска получаются путем его сопоставления с риском, с которым человек сталкивается в повседневной жизни или производственной деятельности. При установлении ДП экономический анализ не используется.

Упомянутый выше МЭАБ предлагается использовать для практической реализации третьего принципа радиационной безопасности — для обоснования снижения доз облучения H ниже ДП и тем самым снижения соответствующего радиационного риска.

Актуальность разработки МЭАБ для этой цели отмечена в ряде решений Национальной комиссии по радиационной защите и Всесоюзной проблемной комиссии "Радиационная гигиена" [13,14].

Современный уровень обеспечения радиационной безопасности на АЭС характеризуется следующими данными: дозы облучения персонала не превышают ДП, а в среднем $\dot{H} = 1$ бэр/год; \dot{H} для населения (за

счет радиоактивных выбросов в нормальном режиме работы) не превышает 0,001 бэр/год, что намного меньше ДП [1].

Считаем необходимым сделать следующее замечание относительно использования беспороговой линейной зависимости (БЛЗ) доза – эффект в оценке радиационного риска.

Использование БЛЗ не обязательно для развиваемого МЭАБ. В МЭАБ может быть включена и другая зависимость доза – эффект, если она будет рекомендована регламентирующими органами для практического использования. Однако в настоящее время БЛЗ является самой правдоподобной рабочей гипотезой. Поэтому она и должна использоваться в анализе радиационного риска.

3. НУЖНО ЛИ ЗНАТЬ МЕРУ В ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ

Любой вид производственной деятельности, как правило, создает опасность для здоровья как участников этого производства, так и населения. Возникает необходимость осуществления технических и прочих мер защиты здоровья человека.

Главный принцип обеспечения безопасности, предлагаемый отечественной гигиеной в качестве основы при принятии решения о мерах защиты, сводится к требованиям обеспечения “нулевой опасности”, или “абсолютной безопасности” [15]. Может ли быть этот принцип универсальным и всеобъемлющим? Или (поставив этот вопрос иначе) можно ли путем увеличения расходов на защиту достичь “абсолютной безопасности”? Имеющийся опыт показывает, что можно, но далеко не всегда.

На рис. 1 приведены две принципиально отличающиеся возможные зависимости риска R от затрат X на защиту. Кривая 1 соответствует случаю, когда “абсолютной безопасности” достичь можно: при некотором конечном $X = X_0$, риск R от вредного воздействия становится равным нулю. Примерами таких производств являются предприятия, во вредных выбросах (сбросах) которых присутствуют только вещества с пороговым действием. В этих случаях принцип “абсолютной безопасности” может быть реализован путем установления нормативов (предельно допустимых концентраций, выбросов и т.п.), обеспечивающих непревышение порога действия вредного фактора. Кривая 2

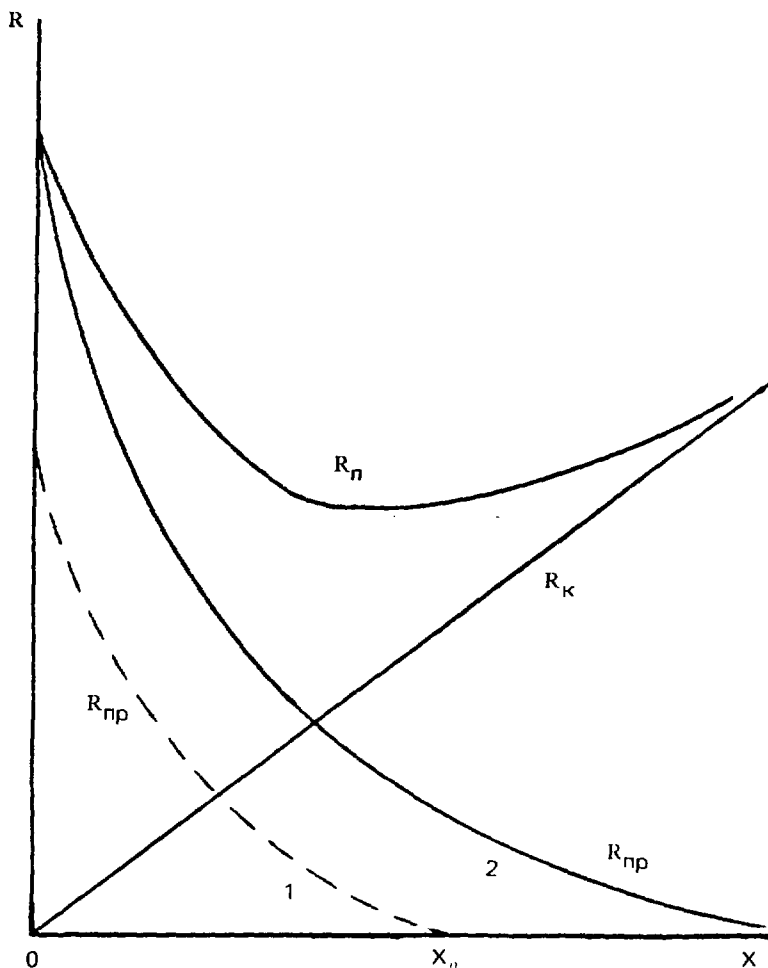


Рис. 1. Зависимость риска R для населения, создаваемого некоторым производством, от X . Для прямого риска $R_{пр}$ показаны два варианта, характеризующиеся возможностью (кривая 1 (пунктир)) и невозможностью (кривая 2) достичь нулевого риска. Косвенный $R_{к}$ и полный $R_{п}$ риск относится к варианту 2 поведения $R_{пр}$

соответствует случаю, когда достичь "абсолютной безопасности" принципиально невозможно. Такое поведение эффективности затрат на защиту характерно, например, для радиационно опасных производств.

Как бы мал ни был уровень радиационного облучения, он будет создавать ненулевой радиационный риск для человека [1]*).

*). Есть основания считать, что действие химических канцерогенов также носит беспороговый характер [11].

Обеспечение безопасности на транспорте при разного рода авариях на промышленных предприятиях также характеризуется принципиальной невозможностью достичь "абсолютной безопасности".

Каким принципом следует руководствоваться, если "абсолютной безопасности" достичь невозможно?

Существует точка зрения, согласно которой любые затраты на защиту здоровья человека оправданы, ибо ему нет цены. Поэтому был предложен следующий принцип обеспечения безопасности: внедрение всех мер защиты, которые практически осуществимы, или, другими словами, установление уровня опасности настолько низким, насколько это достижимо практически (принцип ALAPA – as low as practicably achievable (см. в [4])). Этот подход привлекательный, но не научный. У него есть принципиальный недостаток: последовательное его применение в конечном счете приводит к неэффективному расходованию средств на защиту или даже к возрастанию опасности (риска), а не к ее уменьшению. Дело в том, что помимо создаваемого данной технологией прямого риска $R_{пр}$, на уменьшение которого направлены меры безопасности, существует еще и косвенный риск $R_{к}$. Он обусловлен строительными работами, изготовлением оборудования и материалов для защитных сооружений, их эксплуатацией и т.д. С ростом расходов X на безопасность риск $R_{пр}$ уменьшается, а риск $R_{к}$ растет. Уменьшается также эффективность затрат на защиту*). Начиная с некоторого уровня этих расходов при дальнейшем росте X будет происходить возрастание полного риска $R_{п} = R_{пр} + R_{к}^{**}$) (см. рис. 1) [4].

Таким образом, последовательное и повсеместное применение принципа ALAPA или "абсолютной безопасности" сделало бы систему безопасности в стране в целом обременительной, неэффективной и, в конечном счете, более опасной.

Признание невозможности в ряде случаев или нецелесообразности достижения "нулевой опасности" (или "минимальной опасности" по принципу ALAPA) поставило проблему определения приемлемого

*) Величина $|\Delta R_{пр}|/\Delta X$ (уменьшение риска на единицу дополнительных затрат).

**) Из сказанного здесь должно быть понятным появление в последнее время в научной и популярной литературе работ с парадоксальными на первый взгляд названиями типа "Почему безопасность означает опасность", "Насколько безопаснее "слишком" безопасное" и т.п., см., например, [4].

уровня "опасности" или риска или, другими словами, установления меры в обеспечении безопасности.

По проблеме приемлемого риска имеется большое число публикаций и целый ряд предложений (см., например, [4,6,16 – 19]). Часть из них основывается на сравнении риска новой технологии с существующим риском принятых в настоящее время технологий. Риск предлагается считать приемлемым, если новая технология приводит к снижению полного риска R_{Π} (см., например, концепцию замещения рисков в [18]). При этом в одном из предложений высказывается мнение о том, чтобы риск новой технологии был по крайней мере в 10 раз меньше риска современной технологии (см. [4]). Другие предложения сводятся к применению процедуры оптимизации расходов на безопасность, в которой критерием оптимума служит минимум полного риска (см. рис. 1). Эта процедура рассматривается как один из вариантов другого, хорошо известного принципа обеспечения безопасности – ALARA: установление уровня опасности настолько низким, насколько это можно разумно достигнуть (ALARA – as low as reasonably achievable) [4].

Нетрудно видеть, что во всех упомянутых выше подходах к установлению уровня приемлемого риска исходят из единственного критерия – увеличение продолжительности жизни человека или уменьшение уровня риска. В целом эти подходы разумны. Однако они не оптимальны.

Затраты на защитные мероприятия отвлекают средства из других областей, в частности тех, где формируется качество жизни. Поэтому они не должны быть чрезмерными. Именно это очевидное требование игнорируется во всех подходах к обеспечению безопасности, основанных на критерии уменьшения или минимизации суммарного риска и т.п.

Таким образом, при принятии решения о мерах защиты, при их оптимизации необходимо сопоставление в некоторых показателях риска и расходов на защиту. Наиболее последовательно, по нашему мнению, это может быть осуществлено в рамках экономического анализа.

Формально метод экономического анализа и оптимизации средств защиты уже разработан (см. принцип ALARA с учетом экономических и социальных факторов, концепцию "взвешивания" пользы и вреда [5,6,20], методы определения эффективности и оптимизации природоохранных мероприятий [21 – 24] и др.). Согласно этому формальному

методу, данное мероприятие или производство, связанное с риском для здоровья населения, считается оправданным, если получаемый от него чистый экономический эффект D

$$D = \mathcal{E} - P - X - Y \quad (3.1)$$

больше нуля. Здесь \mathcal{E} — полный экономический эффект; P — основные приведенные затраты (без затрат на обеспечение безопасности). Остальные величины определены ранее.

Критерием оптимальности мероприятия или производства служит *максимум величины D* . Этот критерий может быть распространен и на отрасль производства в целом. Максимизация D осуществляется изменением всех параметров или характеристик, от которых зависят входящие в (3.1) величины.

Критерием оптимальности конкретной меры защиты на предприятии (например, на АЭС), когда основные технологические и экономические характеристики производства фиксированы (\mathcal{E} и P — константы), служит минимум величины Z :

$$Z = X + Y. \quad (3.2a)$$

Обобщая понятие затрат, распространив его на величину Z , этот критерий можно сформулировать как *минимум обобщенных приведенных затрат Z* (рис. 2).

Последний критерий иногда используется в другой, но эквивалентной формулировке: *максимум чистого экономического эффекта $D^{(3)}$ от данной меры защиты*. $D^{(3)}$ определяется как

$$D^{(3)} = \mathcal{E}^{(3)} - X, \quad (3.26)$$

$\mathcal{E}^{(3)}$ — полный экономический эффект, обусловленный снижением риска в результате принятой меры защиты стоимостью X ; $\mathcal{E}^{(3)} = Y(R_0) - Y(R)$, R_0 (R) — риск до (после) принятия этой меры.

Отметим, что

$$D^{(3)} = \mathcal{E}^{(3)} - X = Y_0 - (X + Y),$$

где $Y_0 = Y(R_0)$. Отсюда видно, что минимум Z соответствует максимуму $D^{(3)}$ (см. рис. 2).

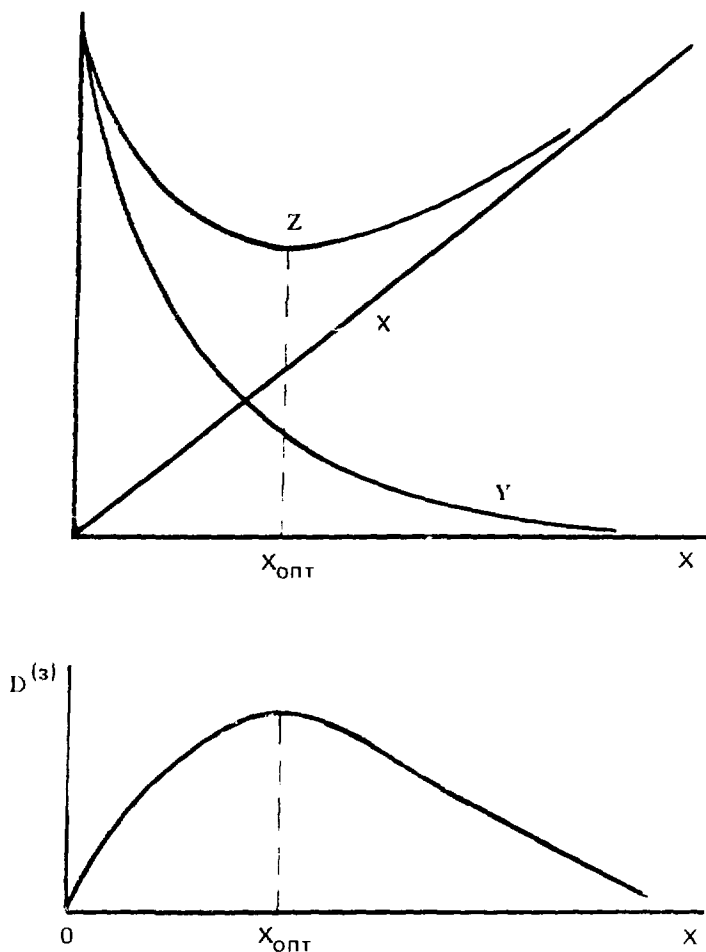


Рис. 2. Экономическая значимость риска Y , обобщенные приведенные затраты $Z = X + Y$ и чистый экономический эффект $D^{(3)}$ от защитного устройства как функции затрат X на защиту

Величина $D^{(3)}$ может служить критерием эффективности или обоснования меры защиты: данная мера считается оправданной или обоснованной, если $D^{(3)} > 0$.

Метод экономического анализа и оптимизации защиты нашел свое отражение в принципах радиационной безопасности, выработанных международной (МКРЗ) и национальной (НКРЗ) комиссиями по радиационной защите, в рекомендациях по противопожарным мероприятиям и мерам повышения безопасности на транспорте [25,26]

и др. Однако широкого распространения и практического применения он не получил. В частности, технические и прочие меры радиационной безопасности, реализуемые в проектах предприятий отечественной ЯЭ и правилах их эксплуатации, основаны только на принципе радиационной безопасности, требующем соблюдения основных нормативов — ДП.

В принятии мер по дальнейшему снижению доз облучения населения руководствуются, главным образом, сознательно или большей частью интуитивно принципом ALARA (см. выше).

Причина такого положения — недостаточная обоснованность экономического анализа безопасности. Она заключается в основном в недостаточной количественной и даже качественной обоснованности величины Y как функции риска R .

Покажем существующие трудности в определении зависимости $Y(R)$ на примере анализа радиационного риска — риска, обусловленного радиационным облучением человека.

При относительно малых индивидуальных рисках r можно считать справедливой линейную зависимость между Y и R :

$$Y = \alpha \cdot R. \quad (3.3a)$$

Здесь α — цена риска. В качестве единицы риска r или R удобно взять значение $2 \cdot 10^{-4}$. В этом случае цена риска будет одновременно и ценой облучения (ценой единицы коллективной дозы 1 чел.-бэр, см. формулу (2.16)):

$$Y = \alpha \cdot S. \quad (3.3b)$$

В формуле (3.3a) и ниже под риском понимается риск преждевременной смерти, если специально не поясняется.

Анализ выполненных работ по оценке α свидетельствует о наличии больших противоречий как в подходах к определению α или ее отдельных компонент, так и в оценке их значений. По разным источникам (табл. 2)

$$\alpha = 4 \div 800 \text{ руб. } (5 \div 1000 \text{ дол.}) / \text{чел.} \cdot \text{бэр.} \quad (3.4)$$

Другая трудность в обосновании экономического анализа безопасности ЯЭ связана с использованием величины S в формуле (3.3b). В радиоактивных отходах предприятий ЯЭ содержатся радионуклиды,

Т а б л и ц а 2. Значения α по данным разных научных и регламентирующих организаций

α	Страна (организация)
10 – 1000 дол.	Все страны [28]
5 – 40 дол.*)	– “ –
40 дол.*)	США (безопасность на дорогах ^{2*)}) [29]
1000 дол.	США (безопасность АЭС ^{2*)}) [30]
100 дол.	Аргентина ^{2*)} [35]
40, 200, 1000 дол. ^{3*)}	Великобритания ^{2*)} [30]
100 – 200 дол. ^{4*)}	Ряд стран Западной Европы [34]
400 крон (40 руб.)*)	ЧССР [31]
7 руб.*)	СССР (ЛИРГ) [33]
20 руб.*)	СССР (ИБФ МЗ) [32]
~200 руб.	Настоящая работа

*) Только “хозяйственная” компонента α .

2*) Рекомендации национальных регламентирующих организаций.

3*) В зависимости от уровня риска (соответственно для $N < 5, \sim 50, \leq 500$ мбэр в год).

4*) В этом диапазоне лежат большинство значений α , предлагаемых зарубежными организациями или отдельными авторами [34].

П р и м е ч а н и е. ЛИРГ – Ленинградский институт радиационной гигиены. ИБФ МЗ – Институт биофизики Министерства здравоохранения.

имеющие большие периоды полураспада $T_{1/2}$. Например, для углерода-14 и йода-129 $T_{1/2}$ равен соответственно 5730 и $1,6 \cdot 10^7$ лет, т.е. их радиационное воздействие длится тысячи и более лет. Величина S в этом случае представляет собой интеграл (сумму) доз (ее называют ожидаемой коллективной дозой и обозначают S^c) по всему времени действия радионуклида:

$$S = S^c = \int_0^{\infty} \dot{S}(t) dt, \quad (3.5)$$

где $S(t)$ – мощность дозы в момент времени t после выброса радионуклидов.

У специалистов нет единого мнения относительно использования формулы (3.5). Спорными вопросами при этом являются: одинаковую или разную значимость придавать радиационному риску, реализующемуся в разное время – в настоящем и отдаленном будущем; можно ли

сегодняшние представления об экономических, биологических и прочих закономерностях переносить на отдаленное будущее и т.п.

Как паллиативное разрешение этих противоречий в ряде работ (см., например, [7,8]), для оценки радиационного воздействия предприятий ЯЭ предложено использовать так называемую неполную ожидаемую дозу:

$$S_H^c = \int_0^{T_{\max.}} S(t) dt. \quad (3.6)$$

В ней интегрирование (суммирование) доз осуществляется до некоторого конечного момента времени T_{\max} в будущем. Ранее значение T_{\max} бралось равным 500 лет [7]. В последнее время в конкретных расчетах используется значение 10^4 лет [8].

Должно быть очевидным, что как сама процедура "обрезания" интервала интегрирования, так и значения предела $T_{\max} = 500$ или 10^4 лет не имеют серьезного обоснования.

Не вдаваясь в дальнейшие подробности противоречий относительно определения и использования величины S^c , отметим, что значения S^c для разных вариантов расчета могут различаться на 2 – 3 порядка.

Настоящая работа посвящена только проблемам, возникающим на уровне анализа риска. Вопросы, связанные с оценкой радиационного риска и касающиеся соотношения доза – эффект, моделей оценки доз и т.п., здесь не рассматриваются.

В разд. 4 и 5 дается обоснование экономического подхода к анализу безопасности и излагается точка зрения авторов на пути и способы решения отмеченных выше проблем развития МЭАБ.

4. БЕЗОПАСНОСТЬ КАК ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКТОР.

ЦЕНА РИСКА

Рассмотрим сначала следующий вопрос: что такое экономические факторы и относится ли к ним безопасность? Или в несколько иной формулировке: что такое экономический анализ, какой круг вопросов он должен и может охватить?

Многие, отождествляя экономику с бухгалтерией, полагают, что экономический анализ имеет цель вскрыть резервы увеличения денеж-

ных доходов предприятия, отрасли или государства. При таком подходе к экономике из нее исключается целый ряд факторов, влияющих на жизнь людей, и в их числе безопасность. Некоторые из этих факторов присутствуют в экономическом анализе, но только в виде строгих внеэкономических ограничений, которые накладывают органы, стоящие над экономикой, например санитарный надзор.

При таком подходе к экономике остается открытым вопрос: кем должны руководствоваться те люди, которые выставляют разные обременительные для промышленности ограничения. Исключая из экономики ряд факторов, влияющих на жизнь людей, мы лишаемся возможности сопоставить их с другими факторами, которым почему-то повезло больше.

Многие факторы (чистота воздуха, вкус воды, красота леса и др.) могут быть учтены в денежных балансах лишь в той своей малой части, в какой они через посредство здоровья людей отражаются в затратах на медицинское обслуживание и выплатах по больничным листам. Но самочувствие и здоровье есть самостоятельный и, пожалуй, самый драгоценный фактор. Люди ценят свое здоровье независимо от того, дорого или дешево обходится государству их лечение. Исключение подобных факторов из экономики нелогично, ведь доход предприятий и государства не самоцель, а средство улучшения жизни людей во всех ее аспектах.

Экономический анализ, понимаемый широко, — это анализ возможностей улучшения жизни людей. Поэтому экономическим следует считать любой фактор, удовлетворяющий двум условиям. Первое: этот фактор должен влиять прямо или косвенно на жизнь человека. Второе: человек должен иметь реальную возможность изменять влияние фактора на жизнь людей. Например, бытовой комфорт, чистота воздуха, продолжительность рабочей недели, интенсивность, опасность и другие характеристики трудовой деятельности, обеспеченность питанием — все это прямо влияет на жизнь людей. Промышленность, сельскохозяйственные угодья, полезные ископаемые — от этих факторов в конечном счете зависят бытовой комфорт, питание и прочее, и поэтому они косвенно влияют на условия жизни человека. Но вот сила тяжести Земли — фактор, прямо влияющий на жизнь человека, однако к числу экономических его пока что относить не стоит. У нас нет сегодня реальных средств изменить воздействие силы тяжести на многих людей. Этот фактор не удовлетворяет второму условию.

Опасность от жесткой компоненты космических лучей — внеэкономический фактор, так как средства защиты от него всего населения нам недоступны. Опасность радиоактивного облучения населения продуктами работы ядерного реактора — экономический фактор: на жизнь людей влияет, средства защиты известны и практически доступны.

К экономическим факторам относятся также и другие техногенные опасности.

Таким образом, безопасность является экономическим фактором. Но только в той своей части, которой человек в состоянии управлять.

Как включить безопасность в экономический анализ? Каким должен быть критерий оптимальности народнохозяйственного мероприятия в обобщенном экономическом анализе?

Таким критерием не может быть уже доход от этого мероприятия, если при расчете использовать только реальные денежные поступления и расходы. Им не может быть и требование максимума безопасности или, другими словами, продолжительности жизни.

В комплексе жизненных благ, ценимых человеком, безопасность занимает видное, но не самодавлеющее место. Она, конечно, исключительно весомое благо. Но ее вес в жизни человека соизмерим с весами материальных и духовных благ, не удлиняющих жизнь, а повышающих качество жизни.

Поэтому критерий оптимизации народнохозяйственного мероприятия должен включать оба показателя: безопасность и качество жизни. Обобщенный показатель, включающий безопасность и качество жизни, используют социологи. Это так называемый уровень жизни [27] (см. также [18]).

Таким образом, принцип оптимизации народнохозяйственного мероприятия в обобщенном экономическом анализе должен основываться на *критерии максимума уровня жизни* (см. рис. 3). Однако, чтобы сделать этот принцип инструментом практической плановой и инженерной деятельности, нужно уметь уравновешивать качество и безопасность жизни, т.е. уметь строить линии постоянного уровня жизни, изображенные на рис. 3.

Безопасность, как она определена в разд. 2, — качественное понятие. Величина, ее характеризующая, это ожидаемая продолжительность предстоящей жизни (есть такой термин у демографов [27]) или обратная ей величина — риск. Переходя к количественным соотношениям, следует говорить об уравновешивании качества жизни и риска. Такое

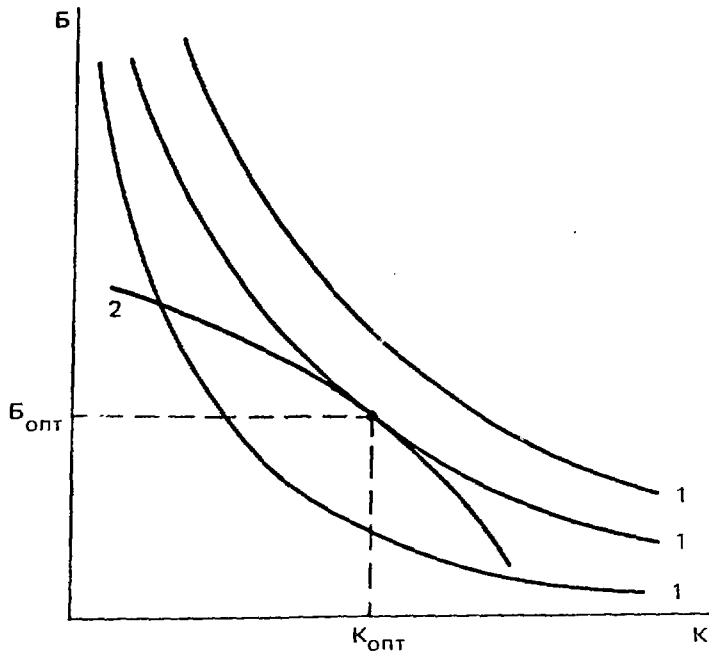


Рис. 3. Линии постоянного уровня жизни (1) и экономических возможностей (2) на плоскости безопасность (Б) – качество жизни (К) (уровень жизни включает в себя безопасность и качество жизни). Точка касания линий постоянного уровня жизни и экономических возможностей соответствует оптимальной безопасности $B_{\text{опт}}$

уравновешивание безусловно отражает мнение большинства людей. В повседневной практике люди допускают некоторое увеличение риска в обмен на качество жизни. Такой обмен совершается, например, когда человек пользуется современным транспортом, устраивается на работу с вредными условиями труда, переезжает на новое место работы или жизни с менее благоприятными условиями для здоровья. При этом человек получает те или иные удобства, льготы, блага, в частности в виде добавки к зарплате.

Итак, от общей характеристики обобщенного экономического анализа мы вернулись к первой его проблеме, сформулированной в разд. 3, – проблеме цены риска. Напомним, что цену риска мы ранее определили как цену 1 чел.-бара или единицы риска $R = 2 \cdot 10^{-4}$ и обозначили ее α [см. формулы (3.3а) и (3.3б)].

В табл. 2 приведены значения α , рекомендованные рядом научных и регламентирующих безопасность организаций. Как это уже отмечалось,

они характеризуются очень большим разбросом — до двух порядков [см. также формулу (3.4)]. Наиболее простой смысл имеют значения α , близкие к минимальному α_{\min} . Они получаются, если в качестве Y брать прямой экономический ущерб — недополучение общественно-полезного продукта в результате преждевременной смерти человека. Он равен разности между дисконтированным (см. разд. 5) полным экономическим эффектом от использования его рабочей силы и дисконтированными затратами на жизнеобеспечение работника. Соответствующее значение α уместно назвать "хозяйственной" ценой риска. Обозначаем ее как α_x . Условный пример расчета α_x : 25-летнему человеку предстоит проработать 35 лет и прожить 50 лет; полный годовой экономический эффект от использования его рабочей силы в 2 раза превосходит его годовую зарплату, составляющую 3000 руб., а на его жизнеобеспечение уходит 75% зарплаты (часть ее он тратит на иждивенцев, часть его жизнеобеспечения идет из общественных фондов). При этих условиях приведенный полный эффект от использования его рабочей силы 58 200 руб., приведенные затраты на жизнеобеспечение 22 350 руб., его хозяйственная цена равна 35 850 руб. Отсюда $\alpha_x = 35\,850 \text{ руб.} \times 2 \cdot 10^{-4} \approx 7,2 \text{ руб.}$

Величина α_x зависит от возраста, пола, профессиональной подготовки человека и пр. Например, для людей пенсионного возраста, нетрудоспособных инвалидов α_x отрицательна. Среднее значение α_x , по-видимому, не превышает нескольких рублей. Приведенные в табл. 2 значения α , равные 20 и 40 руб., 40 дол., соответствуют "хозяйственной" цене риска. Но они, вероятно, дают завышенную оценку α_x . В частности, значение $\alpha_x = 20 \text{ руб.}$ [32] получилось завышенным из-за того, что не учитывалось дисконтирование.

Для риска заболеть и временно потерять трудоспособность аналогичную "хозяйственную" цену риска можно получить, оценивая ущерб за счет временной нетрудоспособности и затрат на лечение человека, так как это рекомендуется в методиках [21,23].

Отметим, что значение $\alpha = \alpha_x$ предлагают использовать для анализа безопасности ряд отечественных организаций: ГАИ для оптимизации мер безопасности на транспорте; пожарная охрана — для обоснованного выбора новой пожарной техники и пожаропрофилактических мероприятий [25,26]; Ленинградский институт радиационной гигиены — для обоснования мер радиационной защиты [33]. В [25,26] ущерб от гибели среднестатистического человека оценивается в 20 — 30 тыс. руб. (в зависимости от возраста и др.). В пересчете на α_x это дает $\alpha_x = 4 \div 6 \text{ руб.}$

Простой смысл имеет и максимальное значение $\alpha_{\max} = 1000$ дол. Оно введено Комиссией ядерного регулирования США для того, чтобы зафиксировать достигнутый высокий уровень безопасности на современных АЭС. Можно думать, что оно принято также под влиянием выступлений общественности против строительства АЭС. По нашему мнению, использование $\alpha = \alpha_{\max}$ в экономическом анализе безопасности фактически является реализацией принципа ALARA (см. разд. 3) под формальной личиной экономического анализа и оптимизации.

Перейдем к изложению нашей точки зрения на выбор значения α в обобщенном экономическом анализе. Прежде всего отметим, что ориентация на одну лишь "хозяйственную" ценность человека — это проявление узкоэкономического подхода. Оптимизация какого-либо мероприятия с использованием только "хозяйственной" цены риска фактически соответствует критерию максимума денежного дохода, но не максимума уровня жизни. Обобщенный экономический анализ не может основываться на "хозяйственной" цене риска.

Величина α_x не учитывает интересы людей, их нежелание подвергаться дополнительному риску за счет фактора, пользы от которого они не получают. Интересы человека должны быть учтены независимо от того, представляет ли он "хозяйственную" ценность для общества. Для этого к α_x должна быть добавлена еще одна компонента цены риска, отражающая субъективное отношение человека к риску. В противовес α_x ее можно назвать субъективной ценой риска. Обозначим ее α_c . Именно с помощью компоненты α_c можно правильно уравновесить безопасность и качество жизни. Измерить α_c могут и должны социологи с участием экономистов.

Наибольшую информацию может дать исследование того, какую дополнительную зарплату или иные материальные блага человек считает достаточной компенсацией данного дополнительного риска. Пусть δC — прибавка к годовой зарплате, компенсирующая в глазах человека увеличение интенсивности риска на $\delta \dot{r}$. Тогда $\alpha_c = \delta C / \delta \dot{r}$. Интенсивность промышленного риска в среднем составляет $2 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹. В горнодобывающих отраслях она поднимается до 10^{-3} год⁻¹ и выше [1].

Предположим удалось установить, что дополнительная интенсивность риска $\delta \dot{r} = 10^{-3}$ год⁻¹ окупается с точки зрения людей прибавкой к зарплате 10^3 руб./год. Тогда, взяв в качестве единицы риска значение $2 \cdot 10^{-4}$, как это было решено выше, получаем цену риска:

$$\alpha_C = (10^3 \text{ руб./год} : 10^{-3} \text{ год}^{-1}) \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 200 \text{ руб.} \quad (4.1)$$

Отметим, что в грубом приближении выбранные значения δC и δr в среднем характеризуют условия труда горнорабочих.

Измерение субъективной компоненты цены риска смерти или заболевания — задача очень важная, но и очень трудная. Осложняют исследования два обстоятельства. Во-первых, промышленный риск мал, люди его плохо осознают. Иначе говоря, приходится измерять малые величины. Вести исследования в условиях большого риска нельзя: результат может отличаться от того, что нужно для оптимизации безопасности больших масс людей. Во-вторых, зарплата в нашей стране — неполный измеритель материальной обеспеченности человека, в которую несомненно, входят такие компоненты, как качество жилища, школьного образования, снабжения, санаторно-курортного обслуживания, доступность детских учреждений и т.п. Все эти компоненты могут наряду с зарплатой и нематериальными стимулами использоваться для компенсации риска. Несмотря на указанные трудности, измерять субъективную компоненту цены риска нужно.

Как было условлено, под риском понимается риск смерти. Для радиационного воздействия этот риск дает основной вклад в ущерб Y [5]. Для других вредных факторов существенную или даже главную роль может играть риск заболевания. Его цена — хозяйственная $\alpha_X^{(6)}$ и субъективная $\alpha_C^{(6)}$ — должна быть также определена. Цену риска заболевания нужно знать не только для оптимизации мер безопасности но и для рационального выделения ресурсов на здравоохранение и для других целей.

Компонента $\alpha_X^{(6)}$ рассчитывается по величине прямого ущерба $Y^{(6)}$, обусловленного заболеванием. Она включает затраты на лечение и потери народного хозяйства от недоиспользования труда заболевшего человека, если до болезни он работал.

Намного сложнее обстоит дело с оценкой компоненты $\alpha_C^{(6)}$, служащей мерой нежелания людей болеть. Некоторые, но очень слабые возможности открывает статистика посещаемости платных поликлиник. Чтобы получить достоверные результаты, необходимы изощренные экспериментальные методики.

Итак, при оптимизации мер защиты предлагается использовать цену риска, равную сумме

$$\alpha = \alpha_x + \alpha_c \quad (4.2)$$

и

$$\alpha^{(6)} = \alpha_x^{(6)} + \alpha_c^{(6)} \quad (4.3)$$

Выше сделаны некоторые оценки значений α_x и α_c . Эти оценки весьма приближенны и их нельзя считать окончательными. Установление значений компонент α , а также $\alpha^{(6)}$ — важная задача в развитии МЭАБ.

В плановых расчетах должно использоваться единое для всех людей значение α_c ($\alpha_c^{(6)}$), несмотря на возможное большое различие субъективных оценок. В отличие от α_c ($\alpha_c^{(6)}$) хозяйственная компонента должна дифференцироваться по возрасту, квалификации и другим особенностям человека. Средние значения α_x , как это видно из приведенных выше оценок, $\ll \alpha_c$. Аналогичное соотношение, по-видимому, выполняется и между $\alpha_x^{(6)}$ и $\alpha_c^{(6)}$.

В научной литературе иногда цену риска нормируют на коллективный риск $R = 1$ (один случай преждевременной смерти), и вместо цены риска в некоторых работах используют термин "цена жизни". Этот весьма неудачный термин вызывает представление о том, будто бы речь идет о продаже человеком своей жизни. Отметим, что никакого отношения к такой продаже или обмену "жизнь на деньги" введенная выше цена риска не имеет. Некорректно введенный в некоторых работах термин "цена жизни" и его неправильная интерпретация привели к тому, что ряд специалистов вообще отвергают экономический анализ безопасности.

Подчеркнем, что экономический анализ безопасности, использующий понятие цены риска, никак не противоречит этическим нормам социалистического общества. Цель анализа — найти оптимальные условия жизни человека с точки зрения его безопасности и качества жизни.

5. ДИСКОНТИРОВАНИЕ И КОМПРОМИСС МЕЖДУ ПОКОЛЕНИЯМИ

Среди радиоактивных ядер, образующихся в ядерном реакторе, есть очень долгоживущие. Наше поколение оставит их в наследство потомкам. Возникает следующая проблема: как соизмерять сегодняшние затраты на защитные мероприятия с полезным эффектом от уменьшения облучения людей, который будет получен в отдаленном будущем? Чуть проще, но того же сорта задача: затраты на защитное мероприятие производятся в момент строительства установки, а полезный эффект — уменьшение радиоактивных или других вредных и не обязательно долгоживущих выбросов — получается в течение десятков лет эксплуатации. В обоих случаях вред и польза разнесены во времени. Как их соизмерять?

Современное общественное производство характеризуется относительно высокой производительностью труда и эффективностью. Благодаря этому общество может осуществлять расширенное воспроизводство материальных благ, переводя их частично из фонда потребления в фонд накопления. Пусть C_0 — некоторые материальные средства, переведенные в фонд накопления. Через t лет они станут равными:

$$C_t = C_0 e^{Et}, \quad (5.1)$$

где E — так называемая норма дисконтирования. Ее размерность — год^{-1} . Значение E устанавливается с учетом, с одной стороны, готовности людей жертвовать частью сегодняшних благ ради большего их количества в будущем. С другой стороны, учитывается эффективность современного общественного производства, его способность оправдать ожидания людей.

Установление значения E , соотношения между фондом потребления и накопления — одна из ключевых задач, стоящих перед теорией и практикой современной экономики и регламентирующими экономическими органами. В настоящей работе взято $E = 0,1 \text{ год}^{-1}$ [21,36].

Возможность перевода средств из фонда потребления в фонд накопления и их расширенного воспроизводства приводит к важному следствию. Оно заключается в необходимости учета фактора времени в тех случаях, когда приходится суммировать разновременные доходы или затраты.

Пусть в некоторый будущий момент времени t будет получен доход C_t . Он эквивалентен получению дохода $C_0 = C_t \cdot e^{-E \cdot t}$ в настоящий момент времени [см. (5.1)]. Аналогичный перерасчет необходимо произвести, если C_t не доход, а какой-либо расход или ущерб.

Другой пример: на интервале времени $0, t_{\max}$ получается доход или, наоборот, совершается расход средств с интенсивностью $\dot{C}(t)$. ($\dot{C}(t)$ — приращение дохода или расхода в единицу времени в момент времени t .) Пусть необходимо рассчитать полную сумму C дохода или расхода. Просто так сформулировать задачу в экономическом расчете недостаточно. Нужно еще указать, к какому моменту времени отнести эту сумму. Для определенности положим, что этот момент — $t = 0$. Тогда, производя пересчет к $t = 0$, получаем

$$C_0 = \int_0^{t_{\max}} \dot{C}(t) e^{-Et} dt. \quad (5.2)$$

Таким образом, суммировать разновременные доходы или затраты необходимо со взвешивающим множителем, равным e^{-Et} . Эта же сумма C_0 равноценна пересчитанной на момент времени $t = t_{\max}$ денежной сумме

$$C_t = C_0 e^{Et_{\max}}.$$

Процедуру перерасчета доходов или затрат с одного времени на другое называют дисконтированием или приведением разновременных затрат, временной фактор

$$F_d = e^{-Et} \quad (5.3)$$

— функцией дисконтирования, величину E — нормативом приведения разновременных затрат.

Отметим, что в современных экономических расчетах для $F_d(t)$ чаще используется другое выражение (см., например, [23]):

$$F_d(t) = (1 + E)^{-t}.$$

Количественно оно незначительно отличается от $F_d(t)$ вида (5.3). С математической точки зрения определение (5.3) более строгое.

При оценке ущерба, обусловленного загрязнением окружающей среды и характеризующегося некоторой задержкой или "растяжкой"

действия во времени, также необходимо рассчитывать приведенный ущерб с учетом функции дисконтирования $F_d(t)$. Пусть, например, загрязнение среды вызвано некоторым прои. ответственном процессом в момент времени $t = 0$ и пусть воздействие его растянуто во времени и характеризуется интенсивностью ущерба $\dot{Y}(t)$. Тогда, согласно (5.2), приведенный к $t = 0$ ущерб Y равен

$$Y = \int_0^{\infty} \dot{Y}(t) e^{-Et} dt. \quad (5.4)$$

Рассмотрим эту формулу в применении к ущербу за счет радиоактивного загрязнения среды предприятиями ЯЭ.

Пусть в результате производства единицы энергии в окружающую среду поступило некоторое количество радиоактивных веществ. Из-за присутствия в радиоактивных выбросах ЯЭ долгоживущих радионуклидов коллективная доза облучения населения будет формироваться в течение длительного времени. Пусть $\dot{S}(t)$ — мощность коллективной дозы, получаемой населением в момент времени t , отсчитываемый от момента выброса. Тогда

$$\dot{Y}(t) = \alpha \dot{S}(t) \quad (5.5)$$

— интенсивность ущерба.

Подставляя (5.5)*) в (5.4), получаем для полного, приведенного к $t = 0$ ущерба формулу [37]

$$Y = \alpha S_d^C, \quad (5.6)$$

где

$$S_d^C = \int_0^{\infty} \dot{S}(t) e^{-Et} dt. \quad (5.7)$$

Таким образом, экономический подход к оценке приведенного ущерба, обусловленного радиационным облучением, неизбежно требует, чтобы в формуле (3.36) вместо S ставилась не полная S^C , а дис-

*) Вопрос о возможной зависимости α от времени рассмотрен в [37] и ниже.

контированная ожидаемая доза S_d^C так, как это показано в (5.6). Величина S_d^C задается формулой (5.7).

Наличие функции $e^{-E \cdot t}$ под интегралом в (5.4) или (5.7) эквивалентно "обрезанию" интервала интегрирования (суммирования) разновременных ущербов или доз: замене верхнего предела $t = \infty$ на $t_{\max} \approx \tau_{\text{ЭК}} = 1/E$. Это значит, что дисконтированную дозу можно рассматривать как вариант неполной дозы [см. (3.6)]. Однако в отличие от (3.6), где предел обрезания T_{\max} устанавливается произвольным образом, в S_d^C этот предел обусловлен действием экономического закона — дисконтирования. Величину S_d^C уместно назвать экономически значимой мерой ожидаемой дозы.

Отметим, что применение процедуры дисконтирования в оценке ожидаемой дозы позволяет избавиться от трудностей, связанных с неопределенностями долгосрочных прогнозов относительно биологических, геологических и прочих закономерностей (они используются при оценке годовых доз $\dot{S}(t)$). Эти неопределенности возникают в основном за пределами интервала $(0, \tau_{\text{ЭК}})$ и не оказывают заметного влияния на значение S_d^C . Напротив, они могут оказывать сильное влияние на значение доз S^C и S_H^C .

Использование S_d^C вместо S^C при оценке приведенного ущерба приводит к тому, что ущерб, реализующийся при относительно больших временах $t > \tau_{\text{ЭК}}$, становится несущественным. При этом приведенный ущерб Y получается меньшим, чем простая временная сумма ущербов, вычисляемая по (5.4) с $E = 0$ ($Y_{E=0}$). Использование Y , а не $Y_{E=0}$ в оптимизации мер защиты приводит к сдвигу оптимума в сторону уменьшения X .

Может показаться, что экономическая теория, требующая дисконтирования будущего ущерба, создает противоречие между поколениями: выгоду от игнорирования далеких ущербов ($t > \tau_{\text{ЭК}}$) и тем самым от экономии средств на защите окружающей среды получает наше поколение, а ущерб достается будущим поколениям. На самом деле этого противоречия нет. Норма дисконтирования $E > 0$ соответствует такому развитию общества, при котором часть материальных средств переводится в фонд накопления, т.е. на постоянное улучшение будущих условий жизни. В результате современное поколение передает следующему больший объем материальных благ, чем тот, который оно получило, вступая в жизнь.

Будущие поколения в качестве компенсации за появление некоторого длительно действующего вредного фактора получают материальные средства, часть из которых они, если захотят, потратят на ликвидацию этого фактора. Важно только, чтобы рассматриваемый фактор был экономическим, т.е. в распоряжении людей были доступные средства борьбы с ним.

Однако было бы совершенно неправильно думать, что здесь речь идет о получении материальной выгоды за счет снижения безопасности. Отказ в настоящее время от какой-либо нерентабельной меры защиты высвобождает средства, которые могут найти более эффективное применение в разных сферах. Можно потратить их на сегодняшние материальные блага, но можно потратить их и на иное, экономически более эффективное защитное мероприятие. Наконец, можно потратить их на увеличение производительности труда, что принесет пользу, в частности, и нашим потомкам, которые, в свою очередь, могут по-разному распорядиться дополнительными ресурсами. В частности, этих ресурсов (а они могут быть не малыми) может хватить на такие защитные мероприятия, которые нам сегодня недоступны. Тем самым суммарный риск для наших потомков в результате сегодняшней экономии на нерентабельном мероприятии, призванном защищать биосферу от долговременного фактора, не увеличится, а уменьшится.

Применение процедуры дисконтирования обеспечивает своевременное и более эффективное распределение средств на меры защиты против фактора, действие которого значительно растянуто во времени. Отказ от этой процедуры в экономическом анализе и при принятии решения о мерах безопасности привел бы к неоправданному ущербу с точки зрения безопасности и качества жизни настоящего и будущих поколений.

Здесь уместно подчеркнуть, что разрабатываемый обобщенный экономический анализ основан не на критерии максимума дохода, а на критерии максимума уровня жизни, объединяющем безопасность и качество жизни.

Поясним эти общие рассуждения на конкретном примере, относящемся к обеспечению радиационной безопасности ЯЭ (подробнее см. в разд. 6). При переработке облученного топлива АЭС в радиоактивные отходы попадают упомянутые в разд. 3 долгоживущие радионуклиды ^{14}C и ^{129}I . Будучи выброшенными в окружающую среду, они распространяются на расстояния глобального масштаба и значительная

их часть пребывает в биосфере в течение длительного времени — до тех пор, пока не произойдет их радиоактивный распад.

В настоящее время разрабатываются методы улавливания этих радионуклидов при переработке облученного топлива. Исследуется вопрос об экономическом обосновании необходимости улавливания и о методах оптимизации способов улавливания.

Если эти радионуклиды не улавливать, то они будут накапливаться в биосфере по мере увеличения выработки энергии ЯЭ. Однако отметим, что в любом обозримом будущем средние индивидуальные годовые дозы облучения населения будут относительно малы: к 2025 г. они будут составлять десятые доли миллизера для ^{14}C и еще намного меньше для ^{129}I . После 2025 г. эти дозы несколько возрастут, но в любом случае они не превысят нескольких миллизера в год. Это намного меньше существующих нормативов. Большие полные ожидаемые дозы, накапливаемые за счет этих радионуклидов, определяются большой длительностью их пребывания в биосфере и воздействия на население [1].

О какой мере защиты от этих радионуклидов в отдаленном будущем может идти речь? Разумеется, здесь не имеется в виду фильтрование всего водного или воздушного океана с целью удаления радионуклидов из биосферы. Речь может идти об эквивалентной мере защиты. Рассматриваемые дозы облучения являются малой частью дозы облучения населения за счет техногенно-измененного радиационного фона. В настоящее время техногенная добавка ΔH_T к естественному радиационному фону составляет 200 — 300 мбэр в год в среднем на одного человека. Она формируется главным образом за счет естественной радиоактивности современных жилых каменных зданий^{*)} и медицинских диагностических процедур с использованием проникающего излучения.

Техногенная добавка ΔH_T может быть уменьшена путем строительства менее радиоактивных жилищ, увеличения скорости воздухообмена в помещениях^{**)} и использования в целях рентгенодиагностики более чувствительной и дорогой аппаратуры. В настоящее время на значительное уменьшение ΔH_T потребовались бы большие расходы. На

*) За счет естественной радиоактивности современных строительных материалов — бетона, кирпича и т.п. .

***) При этом уменьшается концентрация в воздухе радона — продукта распада радиоактивных примесей в материалах строительных конструкций.

них не может пойти современное общество. Однако в будущем может быть осуществлено постепенное уменьшение ΔH_T по мере накопления средств. Потомки смогут позволить себе тратить на безопасность столько, сколько не позволительно современному обществу.

Следует отметить, что даже небольшое постепенное уменьшение ΔH_T с избытком компенсирует малую добавку к ΔH_T за счет ЯЭ.

Вернемся теперь к вопросу о целесообразности улавливания ^{14}C и ^{129}I . Если не учитывать дисконтирование в экономическом анализе, то будет получен безусловный вывод о целесообразности их улавливания (см. разд. 6). При учете дисконтирования улавливания ^{129}I с точки зрения уменьшения его глобальных эффектов становится нецелесообразным, а эффект от улавливания ^{14}C , хотя и остается положительным, но оказывается близким к нулю. Соответствующее оптимальное значение X также уменьшается.

Почему первый вариант решения хуже второго? Первый вариант рекомендует сразу вложить средства в защиту против фактора, главная составляющая вредного эффекта от которого накапливается много десятков и даже сотен лет спустя. Тем самым происходит преждевременное расходование средств, их "замораживание". Ущерб от "замораживания" средств — явление, хорошо известное в экономике.

Если поставить задачу — достичь того же эффекта в уровне безопасности, что и в первом варианте, но расходовать средства постепенно, используя их для уменьшения ΔH_T , то этих средств понадобится намного меньше. Разумеется, здесь сравнение средств надо производить, приводя их к некоторому конкретному моменту времени. Например, стоимость улавливания ^{129}I (при коэффициенте "очистки" 100, см. разд. 6) составляет примерно 10 руб./МВт(эл.).год. Средства, которые понадобятся для достижения эквивалентного эффекта, но при их постепенном вводе, в приведенном исчислении будут на несколько порядков ниже.

Выше речь шла о разрешении кажущегося противоречия. Однако при проведении экономического анализа на много десятков и сотен лет вперед может возникнуть и реальное противоречие.

Пока речь идет о сопоставлении благ и ущербов, разделенных интервалом времени, сравнимым с продолжительностью нашей жизни, мы смело можем пользоваться для приведения их к одному моменту времени функцией дисконтирования, отражающей наши собственные желания. Ведь речь идет о наших собственных благах и ущербах. Но как быть, если интервал времени расширяется?

Сможем ли мы правильно угадать норму дисконтирования потомков, а также значения других величин, используемых в экономическом анализе, например цены риска, цены радиоактивности и др.? И тем самым сможем ли мы правильно учесть интересы будущих поколений?

Есть некоторые основания предполагать, что будущая норма E будет несколько меньше нашей. Темп улучшения жизни, возможно, будет снижаться из-за исчерпания дешевых ископаемых ресурсов, роста плотности населения и соответственно интенсификации использования земельных площадей и воды. Пока жизнь заметно улучшается, человеку мало смысла отказывать себе в чем-то сегодня ради умеренно больших благ завтра: ведь завтра и без того будет лучше. Так что при быстром улучшении жизни (у нас) норма дисконтирования больше, при медленном (предположительно у наших потомков) — меньше. При более высоком уровне жизни (у потомков) норма дисконтирования также ниже. Однако не исключено, что перечисленные факторы, неблагоприятно влияющие на темп развития, будут перекрыты эффектом роботизации промышленности. Механические интеллектуалы смогут добывать ископаемые, по сегодняшним представлениям недоступные человеку. И тогда темп улучшения жизни не снизится, а быть может, и возрастет. Если к тому же учесть, что даже при стабильном уровне жизни норма дисконтирования едва ли будет сильно отличаться от сегодняшней, то нет особого смысла отказываться от простейшей гипотезы: $E = \text{const}$.

Следует также отметить, что возможное изменение E в отдаленном будущем не изменит существенно современные оценки. Дело в том, что для изменяющейся во времени нормы $E = E(t)$ функция дисконтирования вместо (5.3) имеет вид

$$F_d(t) = \exp\left(-\int_0^t E(t') dt'\right).$$

Пусть $E = E_0 = \text{const}$ до некоторого времени t_0 , равного, скажем, 50 лет или более, а затем E начинает уменьшаться со временем по некоторому закону. В этом случае функция $F_d(t)$ равна

$$F_d(t) = \begin{cases} e^{-E_0 t}, & t \leq t_0; \\ e^{-E_0 t_0} \exp\left(-\int_{t_0}^t E(t') dt'\right), & t > t_0. \end{cases} \quad (5.8)$$

Отсюда легко видеть, что из-за наличия множителя $e^{-E_0 \cdot t_0}$ функция $F_d(t)$ при $t > t_0$ очень мала. Второй множитель (в нижней строчке формулы (5.8)) может только еще более уменьшить $F_d(t)$, так как в любом случае он не больше 1.

В заключение этого раздела считаем необходимым сделать следующие замечания.

Сначала об использовании процедуры дисконтирования. Если она применяется к некоторому экономическому показателю, то это ни у кого не вызывает возражений. Но может ли быть оправданным ее применение к величинам, которые прямо не носят экономического характера? Примеры таких величин из интересующей нас области: ожидаемая коллективная доза (сумма годовых коллективных доз по всему периоду времени действия радиационного фактора), ожидаемое число случаев смерти или заболеваний и т.п.

Эти величины часто используются для оценки воздействия того или иного производства, в частности радиационно-опасного производства, на здоровье населения, а также для сравнения разных производств по этим показателям.

Многим представляется сомнительным или неправомочным применение процедуры дисконтирования к таким величинам. При этом такая точка зрения иногда аргументируется словами, например, "экономисты, подсчитывающие ущерб, пусть применяют дисконтирование. У нас же задача другая — защита здоровья населения, и мы должны одинаково учитывать случаи смерти или заболевания независимо от того, имели место они сейчас или произойдут в отдаленном будущем".

На самом деле решение вопроса о том, применять или не применять процедуру дисконтирования, зависит не от характера показателя (экономический он или нет). Все определяется тем, является ли сам рассматриваемый фактор экономическим (в том смысле, как это описано в разд. 4). Если фактор воздействия на здоровье населения является таковым, то при оценке его воздействия независимо от того, осуществляется она в экономических показателях или нет, процедура дисконтирования должна применяться. В противном случае при принятии решения о мерах защиты от рассматриваемого фактора может быть допущена ошибка. Результатом ее могут быть зря загубленные жизни или рост случаев заболевания среди населения.

Таким образом, вывод о необходимости применения процедуры дисконтирования получен именно с позиций защиты здоровья населения.

Приведем примеры, в которых вопрос о необходимости учета дисконтирования в оценке воздействия на здоровье населения того или иного вредного фактора стоит достаточно остро.

Мерой полного облучения населения за счет предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) служит упомянутая выше ожидаемая коллективная доза S^C [см. (3.5)]. Она используется иногда для сравнения различных стадий ЯТЦ по степени радиационного воздействия на население. Таково, например, назначение основной итоговой таблицы в докладах НКДАР ООН, обобщающих исследования радиационного фактора ЯТЦ [7,8]*), и таблицы ожидаемых доз в материалах 7-й группы МОЯТЦ [38], которые обусловлены захоронением радиоактивных отходов ЯТЦ (см. также [39]). Использовать S^C для целей такого сравнения — значит прийти к неправильным выводам об относительной степени радиационной опасности разных стадий ЯТЦ. Особенно большая ошибка получается в оценке воздействия, обусловленного изотопами урана и ^{129}I (см. [37] и разд. 6).

Для недопущения подобных ошибок следует использовать вместо S^C дисконтированную ожидаемую дозу S_d^C .

Большое число работ посвящено сравнению разных отраслей энергетики по степени воздействия на здоровье населения. Для этой цели, как правило, используются такие величины, как ожидаемое число случаев смерти или заболеваний, сокращение продолжительности жизни, потери трудоспособности и т.п. Не останавливаясь подробно на анализе этого примера, укажем, что для получения правильных результатов и выводов к упомянутым выше величинам также необходимо применять процедуру дисконтирования, несмотря на то, что они не носят явного экономического характера.

Дисконтированная доза стоит в ряду таких гибридов из натуральных и экономических показателей, как дисконтированный выпуск продукции, дисконтированный расход ядерного топлива. Такого рода показатели имеют смысл тогда, когда цена фактора относительно медленно меняется во времени и ее можно вынести из-под интеграла при расчете дисконтированной экономической характеристики. Например, цена про-

*) Из-за трудностей прогноза на будущие тысячеления в этой таблице вместо S^C стоит неполная ожидаемая доза S_H^C , в которой суммирование по времени ограничено T_{\max} , равным 500 лет (10^3 лет в докладе за 1982 г. [8]). Однако отметим, что как процедура ограничения, так и взятые значения T_{\max} никак не обоснованы.

дукции предприятия в условиях, когда она постоянна, находится делением дисконтированных затрат на дисконтированный выпуск продукции; соответствующая формула называется формулой расчетных затрат. Аналогично, не зная достоверно цены топлива, можно сравнивать топливные циклы ядерного реактора, используя дисконтированные расходы топлива.

6. ПРИМЕРЫ ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ

В этом разделе анализируются следующие системы радиационной безопасности:

- 1) радиохроматографическая система (РХГС) *) очистки газов на АЭС с реактором ВВЭР-440 — одна из систем очистки радиоактивных выбросов станции в нормальном режиме работы (см. [1,40]). На РХГС осуществляется временная задержка радиоактивных атомов ксенона, криптона и др. Благодаря распаду радионуклидов в течение времени задержки во много раз уменьшается активность выбросов АЭС;
- 2) защитная оболочка (контейнмент) АЭС с реактором ВВЭР-1000 [41]. Она предотвращает загрязнение окружающей среды при возможных авариях;
- 3) системы улавливания долгоживущих радионуклидов ^3H , ^{85}Kr , ^{14}C и ^{129}I на радиохимических заводах (РХЗ). Отметим, что эти системы пока находятся в стадии разработки и проектирования. В настоящей работе используются проектные и другие данные из [42,43].

Кроме анализа этих систем, здесь произведена оценка ущерба, связанного с гибелью людей в результате вредного воздействия предприятий ЯТЦ и угольного топливного цикла на здоровье персонала и населения. Исходные данные для этой оценки взяты из [1]. В них учитывается действие не только радиационного, но и других факторов, вредных для здоровья человека.

Развиваемый в настоящей работе МЭАБ дает основу для разработки подхода к регламентированию доз облучения человека за счет естественной радиоактивности строительных материалов. В этом разделе сделаны некоторые предварительные оценки, имеющие отношение к этому вопросу.

*) Иногда в литературе ее называют УПАК — установка подавления газовой активности.

Большой объем данных по дозам облучения людей за счет этого источника получен Э.М. Крисяком [44].

Выполненный анализ ряда систем безопасности носит главным образом иллюстративный характер. Его цель заключается прежде всего в том, чтобы продемонстрировать применение развиваемого в настоящей работе МЭАБ и роль отдельных его положений, в частности, касающихся значения цены риска α и процедуры дисконтирования.

Как было отмечено в разд. 3, существующие в литературе данные относительно значения α характеризуются большим разбросом: $\alpha = 4 \div 800$ руб. В разд. 4 проанализированы причины большой неоднозначности величины α и предложен путь ее устранения. Согласно сделанной там предварительной оценке, более правдоподобное значение $\alpha_{\text{пр}}$ равно приблизительно 200 руб. В результате будущих исследований по проблеме цены риска это значение α может до некоторой степени измениться. Однако в любом случае есть все основания говорить о возможности устранения противоречий в подходах к оценке α и возможности устранения большой неоднозначности значения α , которая до недавнего времени служила серьезным препятствием применения экономического анализа безопасности.

Ниже при таком анализе использован диапазон значений $\alpha 4 \div 800$ руб., соответствующий максимальной существовавшей до сих пор неопределенности в цене облучения с выделением значения $\alpha_{\text{пр}}$. Это сделано для того, чтобы продемонстрировать возможные ошибки в принятии решений о мерах безопасности в зависимости от неточности определения значения α .

Аналогично путем проведения расчетов с применением и без применения процедуры дисконтирования в оценке ущерба показано влияние этой процедуры на результаты анализа.

Как уже отмечалось в разд. 3, эффективность какой-либо меры защиты определяется величиной $D^{(3)}$ — обобщенным чистым экономическим эффектом [см. (3.26)]: $D^{(3)} > 0$ — принятие данной меры обосновано, $D^{(3)} < 0$ — необосновано. Максимум $D^{(3)}$ соответствует оптимальной мере защиты. В данном разделе анализируются действующие системы безопасности или их готовые проекты. Поэтому оценивается только эффективность. Вопрос об их оптимальности не ставится.

Для его решения необходимы более подробные технико-экономические данные, которые отсутствуют в готовых проектах*).

На рис. 4 показаны значения $D^{(3)}$ в руб./ (МВт (эл.) .год) для рассмотренных здесь систем радиационной безопасности на АЭС и РХЗ. Заметим, что 10^5 руб./ (МВт (эл.) .год) — это стоимость вырабатываемой электроэнергии. Шкала вблизи нуля линейная (поскольку величина может быть и отрицательной), при $|D^{(3)}| > 100$ руб./ (МВт (эл.) .год) — логарифмическая.

Устройство РХГС на ВВЭР-440 кажется неэффективным, если учитывать только хозяйственную компоненту цены риска. На самом деле оно эффективно**). Ширина заштрихованной полосы связана с различиями в численности населения пристанционных поселков (городов), метеорологических условиях и в расстояниях до поселков. То же самое можно сказать о контейнменте для ВВЭР-1000. Он тоже эффективен, если учитывать субъективную компоненту цены риска.

При расчете эффективности устройств, улавливающих долгоживущие радионуклиды ^3H , ^{85}Kr , ^{14}C , ^{129}I на РХЗ, учитывался вред, который эти нуклиды наносят населению всей Земли. Можно ожидать, что по поводу этих нуклидов будут заключены международные соглашения, предусматривающие компенсацию ущерба, наносимого другим странам. Улавливание всех перечисленных нуклидов, кроме ^{129}I , экономически оправдано. Улавливание ^{129}I неэффективно. Но если не удастся включить в международные соглашения пункт о необходимости дисконтирования ущерба от долгоживущих радионуклидов, то придется строить устройства, улавливающие ^{129}I , для ограничения его глобального воздействия. Для ^3H рассмотрена схема обращения, включающая подземную закачку тритированной воды [42]. Другие схемы обращения намного дороже и для них $D^{(3)}$ значительно меньше 0.

Имея в виду вопрос о целесообразности рассмотренных выше защитных устройств (установка РХГС, системы улавливания глобально значимых радионуклидов), считаем необходимым сделать следующие замечания:

*) Этот вопрос уместно ставить и решать на стадии проектирования, когда такие данные могут быть получены.

**) Этот вывод нельзя автоматически переносить на системы РХГС для ВВЭР-1000 и РБМК-1000, 1500: они имеют другие параметры и характеристики. Вопрос о их рентабельности должен рассматриваться отдельно.

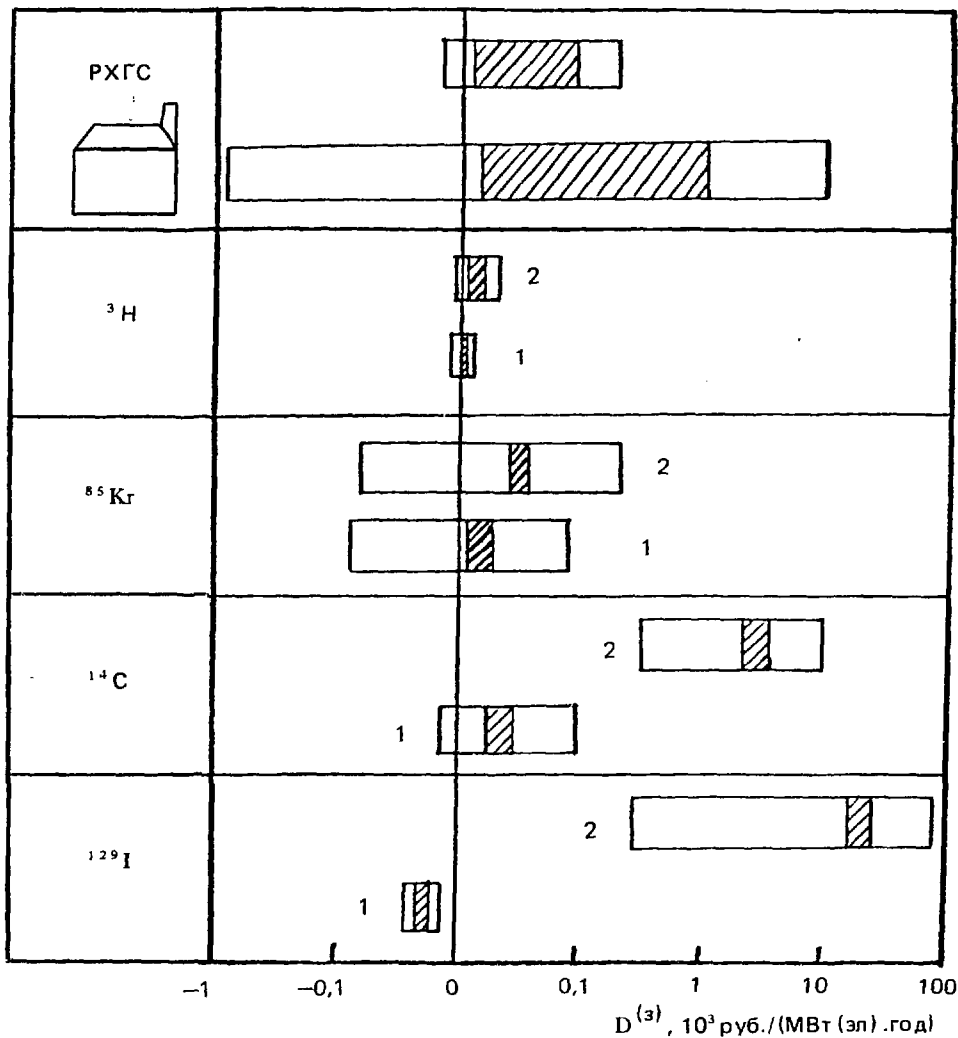


Рис. 4. Чистый экономический эффект $D^{(3)}$ для ряда защитных устройств на предприятиях ядерной энергетики: РХГС и защитной оболочки на АЭС, систем улавливания и удаления долгоживущих радионуклидов ^3H , ^{85}Kr , ^{129}I и ^{14}C на РХЗ; шкала от $-0,1$ до $0,1$ линейная; горизонтальные полосы показывают неопределенность значений $D^{(3)}$, причем левая сторона полосы соответствует α_{\min} , правая — α_{\max} ; заштрихована область, соответствующая $\alpha_{\text{пр}}$, ее ширина обусловлена неопределенностями метеорологических и других данных; 1 — расчет $D^{(3)}$ с учетом дисконтирования, 2 — без учета

1. Вывод о целесообразности этих устройств вытекает именно из применения принципа оптимизации радиационной защиты. Он никак не следует из требований соблюдения существующих норм радиационной

безопасности, ограничивающих дозу облучения отдельных лиц из населения вблизи предприятий ЯТЦ. Эти дозы достаточно малы и без рассматриваемых устройств [1].

2. В зависимости от места расположения РХЗ могут быть относительно значимыми локальные и региональные коллективные дозы облучения населения за счет выбросов ^3H и ^{129}I (на расстояниях до 1000 км от РХЗ, при так называемом первом "проходе" радионуклида в окружающей среде, до того как происходит его глобальное перемещение в атмосфере или гидросфере; это воздействие не учитывается в глобальных эффектах). Учет этих доз может сделать еще более значимой рентабельность улавливания ^3H и изменить вывод относительно нецелесообразности улавливания ^{129}I . Такая ситуация может возникнуть, в частности, при расположении РХЗ в глубине материка в районе с относительно большой плотностью населения.

На рис. 5 показаны стоимости электроэнергии, вырабатываемой ядерной и угольной электростанцией, и те добавки к стоимостям, которые нужно сделать, чтобы учесть ущерб, связанный с гибелью людей, живущих вблизи этих станций и других предприятий топливного цикла [1]. Для ядерной энергетики добавки пренебрежимо малы. Для новой угольной электростанции с хорошими золоуловителями (при хорошем угле) добавки находятся на уровне 10%, что ощутимо увеличивает экономическую выгодность ядерной энергетики. Если топливо содержит много серы, дает много золы и при этом станция не имеет хороших систем очистки, а расположена вблизи города, то добавки могут многократно увеличить стоимость электроэнергии.

На рис. 6 показана стоимость квартиры для семьи из трех человек Z_0 и ущерб $Y_{\text{обл}}$ от облучения этой семьи радионуклидами, содержащимися в строительных материалах [45]. В принципе можно уменьшить этот ущерб специальным выбором малоактивных строительных материалов, которые, конечно, есть далеко не во всех районах страны. На том же рисунке показано, во что обойдется перевозка "чистых" строительных материалов на 10^3 км. Для среднерadioактивных жилищ это нерентабельно. Однако вполне возможно, что в отдельных городах страны с особо радиоактивными местными строительными материалами использование дальнепривозных материалов экономически оправдано.

Отметим, что значения величин $Y_{\text{обл}}$, Z_0 , $X_{\text{трансп}}$ приведены к моменту сдачи дома в эксплуатацию (он принимается за начало отсчета времени $t: t = 0$). В соответствии с экономическим законом, тре-

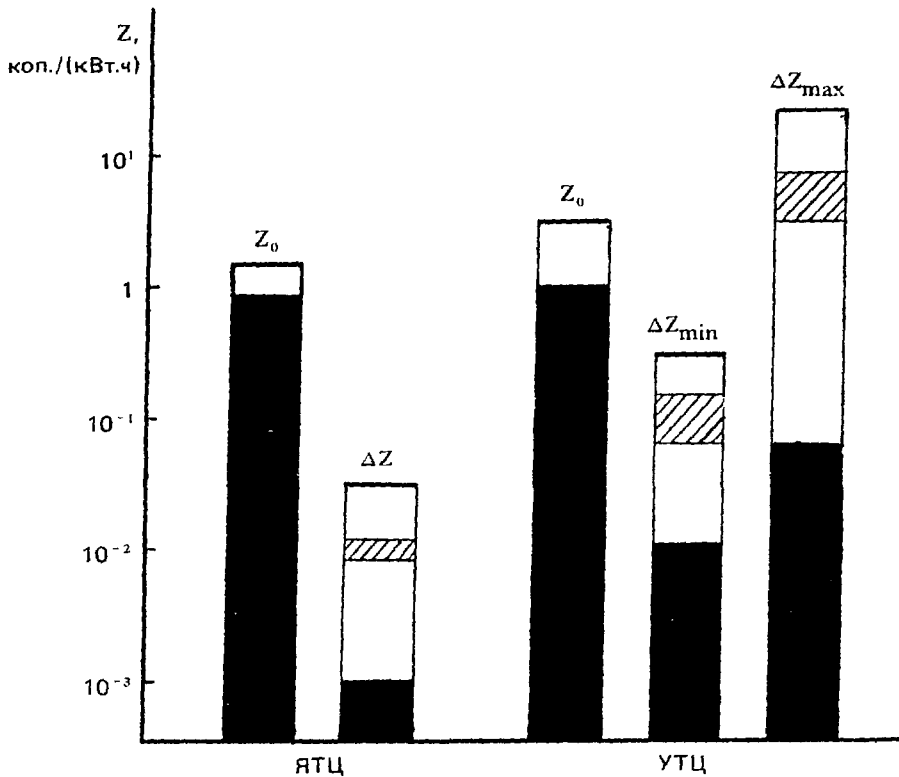


Рис. 5. Приведенная стоимость Z электроэнергии, производимой в ядерном (ЯТЦ) и угольном (УТЦ) топливных циклах; ΔZ — добавка к стоимости, обусловленная воздействием на здоровье населения; Z_0 — основная стоимость (без ΔZ). Для УТЦ рассмотрены два варианта — с хорошими (ΔZ_{\min}) и относительно плохими (ΔZ_{\max}) характеристиками ТЭС (качество очистного оборудования, угля, удаленность от мест с большой плотностью населения и т.п.). Белой частью столбика показан возможный разброс значения величин; для ΔZ нижняя часть разброса соответствует α_{\min} , верхняя — α_{\max} , заштрихована область, соответствующая $\alpha_{\text{пр}}$

бующим учета в экономических расчетах функции приведения затрат к единому времени или иначе функции дисконтирования $e^{-E \cdot t}$, величина $Y_{\text{обл}}$ рассчитывается на основе дисконтированной ожидаемой коллективной дозы S_d^c :

$$Y_{\text{обл}} = \alpha S_d^c,$$

$$S_d^c = \int_0^T \sum_{i=1}^N \dot{H}_i^{(3d)}(t) e^{-Et} dt.$$

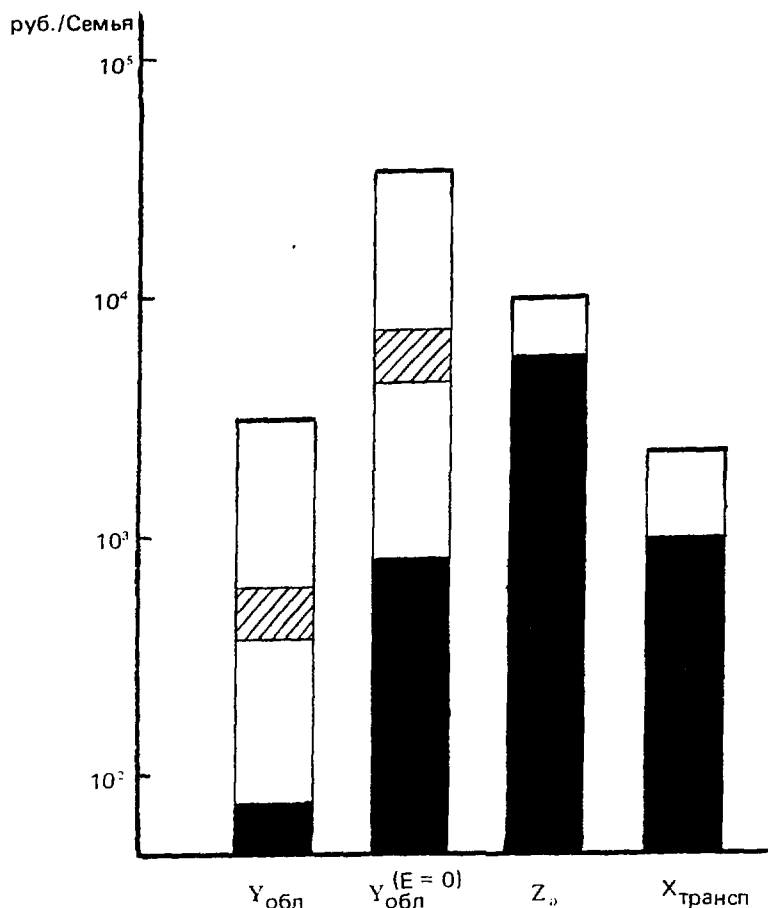


Рис. 6. Приведенные стоимость Z_0 квартиры на семью из трех человек, ущерб $Y_{обл}$ от облучения семьи за счет радиоактивности строительных материалов и расходы $X_{трансп}$ на транспортировку нерадиоактивных строительных материалов на расстояние порядка 10^3 км

Здесь N — число членов семьи (N взято равным 3); $\dot{H}_i^{(зд)}(t)$ — мощность дозы облучения i -го члена семьи за счет радионуклидов в строительных материалах в момент времени t ; T — срок службы здания (из-за относительно быстрого "обрезания" интеграла функцией дисконтирования точное значение T несущественно). В расчете использовалась средняя величина $\bar{H}_i^{(зд)}$, равная 110 мбэр/год (несколько меньше, чем приведенное в [1] значение 140 мбэр/год из-за поправки на пребывание в течение части времени суток в других помещениях: в учреждениях, школах, детских садах и т.п.).

Игнорирование дисконтирования при оценке $Y_{\text{обл}}$ (см. на рис. 6 величину $Y_{\text{обл}}^{(E=0)}$) привело бы к ошибочным выводам относительно мер радиационной безопасности в жилых зданиях.

7. О РАЗВИТИИ ОСНОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

К настоящему времени научные основы управления безопасностью ЯЭ не получили еще достаточного развития. Таково же положение и в других — производственных и непроизводственных — сферах деятельности человека. Как следствие, современная практика принятия решений по обеспечению безопасности во всех этих сферах характеризуется:

- их недостаточной методической обоснованностью;
- узковедомственным, субъективистским подходом;
- игнорированием или недостаточно полным и правильным учетом экономического и социального факторов и др.

Наиболее характерный пример — стремление некоторых регламентирующих органов абсолютизировать принцип “нулевой опасности”, распространив его на те области, где его применение необосновано.

В конечном счете все эти недостатки проявляются в принятии неоптимальных решений по обеспечению безопасности.

Для преодоления указанных недостатков необходимо развитие научно-теоретических, концептуальных и методических основ анализа безопасности и управления ею.

Эти основы должны носить универсальный характер и быть общими для всех сфер производственной и непроизводственной деятельности человека, связанных с риском. Они должны включать систему концепций и принципов обеспечения безопасности, а также метод анализа и оптимизации безопасности вместе со своей системой критериев и показателей, характеризующих социально-экономическую значимость риска, эффективность защитных мероприятий и т.п.

Для краткости эти основы анализа безопасности и управления ею обозначаем как ОАУБ.

К настоящему времени научными и регламентирующими органами, отдельными специалистами уже выработан ряд рекомендаций и предложений, которые могли бы стать составными частями ОАУБ. Как наиболее важные отметим следующие:

- принципы обеспечения радиационной безопасности, содержащиеся в основных регламентирующих документах МКРЗ и НКРЗ [6,12] (см. разд. 2) ;
- концепция “взвешивания” пользы и вреда [5,6,20] ;
- методы определения эффективности и оптимизации природозащитных мероприятий [21 – 24], анализа эффективности затрат на обеспечение безопасности (см. [4]) и др.

Интересными и важными нам представляются предложения П.В. Рамзаева по развитию гигиенической науки [33].

После некоторых обобщений и доработок или непосредственно эти рекомендации и предложения могут быть включены в ОАУБ. Так, основным принципам МКРЗ и НКРЗ при их соответствующем обобщении можно придать универсальный характер и расширить область их применения.

Настоящая работа посвящена главным образом развитию и обоснованию обобщенного метода экономического анализа безопасности как составной части ОАУБ. Только такой метод при условии его завершенности может претендовать на роль универсального метода анализа и оптимизации безопасности. Во введении ему было дано сокращенное название МЭАБ.

Считаем необходимым высказать несколько подробнее свои соображения о связи МЭАБ, а также полных ОАУБ с уже существующими рекомендациями, разработками и предложениями.

1. Развитие к настоящему времени методы оценки эффективности природозащитных мероприятий и анализа эффективности затрат на снижение риска могут войти в МЭАБ как его составная часть. Однако они не в состоянии заменить МЭАБ. Они играли и еще будут играть положительную роль в решении ряда вопросов обеспечения безопасности. В частности, эти методы могут обеспечить эффективное распределение выделенных средств на защиту или с их помощью могут быть оценены средства, необходимые для достижения заданной цели в обеспечении безопасности. Однако, опираясь на них, нельзя определить оптимальный уровень безопасности или оптимальную сумму средств на ее обеспечение. Это возможно только в рамках полного МЭАБ.

2. В разд. 3 отмечалось предложение Блэка и Нихауса [4] относительно развития метода анализа безопасности, основанного только на анализе эффективности затрат на ее обеспечение и на критерии минимума полного риска. Это предложение представляется нам интересным и по-

лезным. Однако было бы необоснованно использовать предлагаемый метод анализа безопасности в качестве универсального.

3. Формально МЭАБ в значительной степени был уже развит. В частности, некоторые его формальные основы содержатся в материалах МКРЗ [5,6]. Однако полное развитие метода (включая некоторые концептуальные основы, критерии, качественное и количественное определение величин и т.п.) может быть осуществлено только в рамках национальных научных и регламентирующих органов. Социально-экономические различия стран должны существенным образом сказаться как на МЭАБ, так и на общих основах анализа безопасности и управления ею. В частности, эти различия проявляются в значениях цены риска α , нормы дисконтирования E и в подходах к оценке ущерба от аварий и катастроф.

4. Вместе с тем следует отметить, что существует необходимость разработки некоторых международных основ экономического анализа риска. Они возникают в связи с проблемой трансграничного, в том числе глобального, загрязнения окружающей среды и ответственности за него [46]. В особенности эта проблема актуальна для развивающейся ЯЭ. Как хорошо известно, значительная, если не большая, часть коллективной дозы облучения населения за счет ЯЭ создается именно в результате глобального радиоактивного загрязнения [1].

В настоящее время в рамках МАГАТЭ предпринимаются попытки установить согласованное на международном уровне значение α [34]. Такой же вопрос возникает относительно применения процедуры дисконтирования и значения нормы E . Некоторые соображения относительно выбора значения E приведены в [37].

5. Один из принципов обеспечения радиационной безопасности сводится к требованию непревышения основных дозовых пределов. В более общем определении он может быть сформулирован как требование соблюдения основных санитарно-гигиенических норм (ОСГН). Экономическая оптимизация защиты ограничивает средний индивидуальный или коллективный риск. При этом из-за возможной неравномерности воздействия вредного фактора отдельные лица из населения могут подвергаться риску, много большему, чем среднее его значение. ОСГН и должны служить цели ограничения сверху индивидуального риска. Как бы мал ни был средний риск и как бы велика не была выгода от ка-

кого-либо производства, современное общество не может допустить, чтобы отдельные его члены подвергались большому риску^{*)}. Ограничение на риск сверху должно вводиться вне зависимости от готовности людей подвергаться большому риску за большие блага и от возможной экономической выгоды для общества от реализации такой готовности.

Значения ОСГН должны устанавливаться главным образом с учетом этических и социальных факторов. Экономический фактор, возможно, и имеет смысл учитывать тоже, но он не может быть определяющим.

Мы полагаем, что ОСГН, ограничивающие техногенный риск для персонала и населения сверху — ОСГН_I, должны быть едиными для всех отраслей народного хозяйства. Другие регламенты (отраслевые, производственные, рабочие, контрольные и пр.) должны устанавливаться на основе рекомендаций МЭАБ. Эти регламенты специфичны для каждой сферы деятельности человека, но в любом случае они устанавливаются ниже основного норматива ОСГН_I (рис. 7).

С нашей точки зрения, при установлении основных нормативов не совсем правильно использовать термин "приемлемый риск", как это делается в рекомендациях МКРЗ [6] (см. также [1]). Здесь больше подходит термин "максимально допустимый риск". Мы полагаем, что приемлемый риск следует понимать и определять иначе. Это риск, неразличимый человеком на фоне других рисков, которым он подвергается в нормальных условиях жизни и работы. Приемлемый риск можно использовать при установлении еще одного общего норматива ОСГН_{II}, ограничивающего риск (см. рис. 7). Если оптимальный уровень риска, полученный по МЭАБ, окажется ниже этого норматива — в области II, то данное производство или мероприятие может осуществляться без всяких дополнительных условий или ограничений.

^{*)} Необходимо отметить, что рассматриваемые здесь принципы не относятся к случаям так называемого добровольного риска. Он имеет место при занятии спортом, например альпинизмом, охотой и др., а также в тех экстремальных случаях, когда человек рискует своей жизнью ради спасения других людей. Тем не менее и в этих случаях устанавливаются определенные ограничения (запрет на некоторые виды спорта, спасательно-заградительные службы в горах и т.п.).

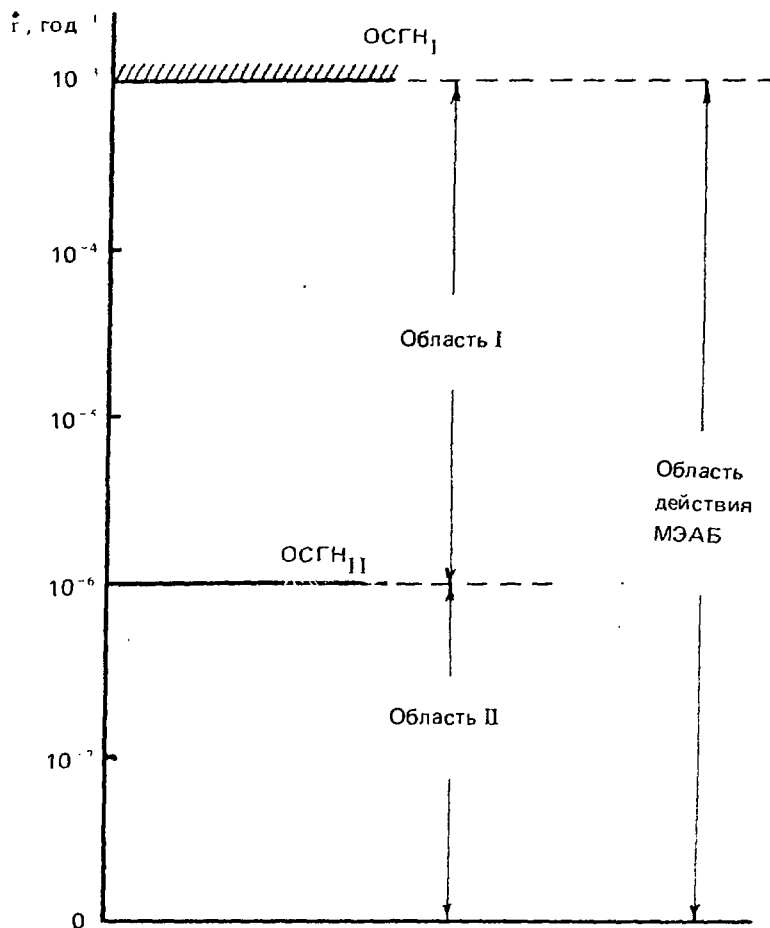


Рис. 7. Относительное расположение основных санитарно-гигиенических норм $ОСГН_I$ и $ОСГН_{II}$ и областей регламентации риска для населения на шкале интенсивности индивидуального риска \dot{r} . $ОСГН_I$ — верхний предел интенсивности риска; $ОСГН_{II}$ — верхняя граница области II устанавливается на уровне приемлемого риска. Конкретные значения $ОСГН_I$ и $ОСГН_{II}$ носят в основном иллюстративный характер. Шкала от 0 до 10^{-3} линейная

Отметим, что именно такая ситуация, по-видимому, имеет место в обеспечении радиационной безопасности населения при работе АЭС и других предприятий ЯЭ. Об этом свидетельствует накопленный опыт анализа радиационного риска для населения в ЯЭ [1].

Если оптимальный уровень риска оказывается выше этого приемлемого уровня (в области I рис. 7), то необходимо требовать выполнения дополнительных условий (установление материальной или ка-

кой-либо другой компенсации персоналу или населению, переселение населения с компенсацией всех издержек и сопутствующих неудобств, принятие дополнительных мер защиты и т.п.). Содержание этих условий должно устанавливаться компетентными органами в каждом конкретном случае.

6. Вплоть до настоящего времени в отсутствие обоснованного МЭАБ принципы и методы анализа риска чаще всего не учитывали экономического фактора. В ряде конкретных ситуаций они могут быть полезными для управления риском. Более того, можно показать, что получаемые на их основе решения об уровнях защиты в определенных условиях могут одновременно совпадать с частными решениями, получаемыми по МЭАБ. Например, рекомендации на основе МЭАБ и принципа "абсолютной безопасности" могут совпадать или быть близкими. Это будет иметь место тогда, когда получаемое по МЭАБ оптимальное значение $X_{\text{опт}}$ совпадает с пороговым значением X_0 (для вредного фактора с пороговым действием, см. рис. 1).

Если же X_0 относительно велико и $X_{\text{опт}}$ значительно меньше X_0 , то следовать в этом случае принципу "абсолютной безопасности" (т.е. устанавливать расходы на уровне X_0) было бы неправильным решением. Это привело бы к тем же недостаткам, которыми характеризуется применение принципа ALARA (см. разд. 3): к неэффективности расходов на защиту или даже возрастанию риска.

Другой пример: оптимизация медицинских диагностических процедур, связанных с использованием ионизирующих излучений. Пусть стоимость X процедуры мала относительно эффекта применения процедуры, выраженного через величину Y . В этом случае анализ, основанный на критерии максимума полного риска, даст практически такой же результат, что и МЭАБ. Однако, если же X не мало, игнорирование экономического фактора неизбежно приведет к неоптимальному результату.

7. Таким образом, система управления риском на основе МЭАБ не отвергает существующие в настоящее время неэкономические подходы к обеспечению безопасности. Они входят в эту систему как ее частные случаи, но только в своих областях применения.

8. Одна из важных проблем развития МЭАБ связана с защитой от маловероятных, но крупных аварий. По мнению авторов, метод оценки ущерба от таких аварий должен основываться на использовании вероятности аварии и *математического ожидания ущерба*. Вероятность

аварии, в случае необходимости, должна включать *субъективную (экспертную)* оценку вероятностей элементарных событий, которые могут вызвать аварию. Подробнее см. работы [47,48].

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные предложения и результаты настоящей работы по развитию метода экономического анализа безопасности:

1. В экономический анализ на любом уровне — общегосударственном, отраслевом или отдельного предприятия и учреждения — предлагается включить безопасность в той ее части, которая поддается управлению человеком. По этой причине такой анализ назван обобщенным.

2. Для реализации предложения п. 1 вводятся следующие показатели, величины и критерии:

— обобщенный показатель *уровень жизни*, объединяющий такие показатели, как качество жизни и безопасность;

— *экономическая значимость* риска Y ; эта величина обобщает понятие прямого экономического ущерба от заболевания или преждевременной смерти людей: кроме этого ущерба, она включает в себя социально-психологическую или, другими словами, субъективную стоимость риска;

— *цена риска* α , она позволяет вычислять значение Y по известному риску R ;

— *максимум уровня жизни* — критерий оптимальности народнохозяйственного мероприятия или плана на государственном уровне;

— *максимум чистого обобщенного экономического эффекта* — критерий оптимальности мероприятия с учетом обеспечения безопасности на уровне отрасли, отдельного предприятия или учреждения [см. (3.1)];

— *минимум обобщенных приведенных затрат* — критерий оптимальности расходов на обеспечение безопасности на уровне предприятия или учреждения при фиксированных основных технологических и экономических характеристиках производства; в другой, но эквивалентной формулировке этот критерий может быть сформулирован как максимум экономического эффекта от защитного мероприятия [см. (3.2a) и (3.2b)].

Конкретизация наиболее общего показателя и критерия "максимум уровня жизни" и выработка соответствующих рекомендаций и

методических указаний по их внедрению в практику планирования выходит за рамки настоящей работы. Это очень важная и сложная задача. Ее решение позволило бы дать основу для принятия оптимальных плановых решений относительно природозащитных мероприятий, в частности, при решении вопроса о выделении средств на эти мероприятия на общегосударственном уровне.

В настоящей работе решается более узкая задача — развитие МЭАБ для его применения на уровне отрасли или отдельного производства и прежде всего в ЯЭ.

3. Связь между безопасностью и качеством жизни устанавливает величина, определяемая как субъективная цена риска α_c . При оптимизации безопасности следует использовать цену риска α , состоящую из двух компонент — хозяйственной α_x и субъективной α_c [см. (4.2) и (4.3)].

Согласно весьма приближенным оценкам, $\alpha_x \leq 7$ руб; $\alpha_c \sim 200$ руб. Уточнение значений компонент α и их обоснование — одна из важных задач развития МЭАБ.

4. При расчете приведенных значений величин, характеризующих риск (Y , S^C , R и др., см. разд. 2 и 5), необходимо использовать процедуру дисконтирования. Это следует делать независимо от того, в каких показателях — экономических или неэкономических — выражается риск. Применение процедуры дисконтирования — путь к разрешению противоречий между поколениями, возникающих при значительном разнесении во времени пользы и вреда от данного производства. Эта процедура позволяет оптимальным образом решить задачу обеспечения безопасности и повышения качества жизни на большом промежутке времени.

5. Выполненный в настоящей работе анализ ряда систем безопасности носит в значительной степени предварительный или демонстрационный характер. Причина этого — недостаточная точность используемого значения α . Тем не менее ряд полезных выводов относительно рассмотренных систем безопасности можно сделать уже сейчас. (Подробнее о них см. в разд. 6.) По-видимому, аналогичный предварительный анализ может быть полезен и для других систем безопасности.

Последний пример (оценка радиационного ущерба за счет естественной радиоактивности строительных материалов современных каменных зданий) приведен только с одной целью — наметить подход к регламентированию этого радиационного фактора в рамках МЭАБ. Анало-

гичный подход, по-видимому, можно применить и к облучению за счет медицинских диагностических процедур. Тем самым можно рассчитывать на разработку единого подхода к регламентированию всех компонент техногенного радиационного фактора. Подробнее эти примеры будут рассмотрены в отдельных публикациях.

В заключение считаем своим долгом поблагодарить тех, кто в процессе обсуждения данной работы на семинарах или после прочтения рукописи высказал авторам свои замечания и предложения. Они были учтены при доработке рукописи.

В особенности выражаем благодарность Г.М. Аветисову, В.И. Иванову, И.Б. Кеирим-Маркусу, В.А. Книжникову, Э.М. Крисяку, И.А. Лихтареву, С.И. Нестеровой.

Список литературы

1. Бабаев Н.С., Демин В.Ф., Ильин Л.А. и др. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда/Под ред. А.П. Александрова. М.: Энергоиздат, 1981.
2. O'Donnel E.P., Mauro J.J. — Nuclear Safety, 1979, v. 20, № 5, p. 525 - 540.
3. Siddal E. — Ibid., 1980, v. 21, № 4, p. 451 — 460.
4. Блэк С.К., Нихаус Ф. Насколько безопасно "слишком" безопасное? — Бюллетень МАГАТЭ, 1980, т. 22, № 1, с. 47.
5. Cost — Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection: ICRP Publication, № 37, Pergamon Press, 1982.
6. Радиационная защита: Публикация МКРЗ № 26. М.: Атомиздат, 1978.
7. Источники и действие ионизирующей радиации. НКДАР ООН (Доклад за 1977 г. Генеральной Ассамблее ООН), ООН, Нью-Йорк, 1978.
8. Ионизирующее излучение: источники и биологические эффекты. НКДАР ООН (Доклад за 1982 г. Генеральной Ассамблее), ООН, Нью-Йорк, 1982, т. 1.
9. Филюшкин И.В. — Вопросы онкологии, 1983, т. 29, № 4, с. 106.
10. Demin V.F., Knizhnikov V.A. On assessment of individual and collective radiation risk with the linear dose-response relationship: Препринт ИАЭ-3848/3. М., 1983.

11. Книжников В.А. — Вопросы онкологии, 1983, т. 29, № 6, с. 67.
12. Нормы радиационной безопасности НРБ — 76 и Основные санитарные правила ОСП — 72/80. М.: Энергоиздат, 1981.
13. Ильин Л.А., Булдаков Л.А., Москалев Ю.А., Аветисов Г.М. — Гигиена и санитария, 1983, № 3, с. 41 — 43.
14. Решение III пленума Всесоюзной проблемной комиссии "Радиационная гигиена". М.: ИБФ МЗ СССР, 1982.
15. Бургасов П.Н. — Гигиена и санитария, 1977, № 11, с. 3 — 7.
16. Кротков Ф.Г., Терман А.В. — Там же, 1970, № 6, с. 64 — 66.
17. Ковалев Е.Е. Радиационный риск на Земле и в Космосе. М.: Атомиздат, 1976.
18. Ковалев Е.Е., Иванов В.И., Пахомов Б.Я. и др. — Вопросы философии, 1981, № 5, с. 49.
19. Fischhoff B., Lichtenstein S., Slovic P. e.a. Approaches to Acceptable Risk: A critical Guide, NUREG/CR-1614, ORNL/Sub — 7656/1, USA, 1980.
20. Ахмед Д.У., Дау Х.Т. Анализ польза — вред и радиационная защита. — Бюллетень МАГАТЭ, 1980, т. 22, № 5/6, с. 13.
21. Хачатуров Т.С. Экономика природопользования. М.: Экономика, 1982.
22. Охрана окружающей среды. Модели управления чистотой природной среды/Под ред. К.Г. Гофмана и А.А. Гусева. М.: Экономика, 1977.
23. Методы и практика определения эффективности капитальных вложений и новой техники. Сборник научной информации № 33. М.: Наука, 1982.
24. Охрана окружающей среды. Модели социально-экономического прогноза. М.: Экономика, 1982.
25. Аксенов В.А. Техничко-экономическое обоснование мероприятий, повышающих безопасность движения. М.: Транспорт, 1974.
26. Инструкция по определению экономической эффективности новой пожарной техники, пожарно-профилактических мероприятии, изобретений и рационализаторских предложений в области пожарной защиты. М.: ВНИИПО МВД СССР, 1980.
27. Пресса Р. Народонаселение и его изучение. М.: Статистика, 1966, с. 121.
28. Векслер Л.М. Атомная техника за рубежом, 1983, № 5, с. 3.
29. Okrent D. — Nuclear Safety, 1979, v 20, № 2, p. 148 — 164.

30. *Nuclear News*, Sept. 1981, p. 144 – 148.
31. Кунц Э., Шевц Й., Клемер В. Применение принципа оптимизации в радиационной защите населения. – В сб.: II радиобиологич. конф. соц. стран, Варна, Болгария, 1978, с. 167, 168.
32. Бархударов Р.М., Книжников В.А. Оценка экономического ущерба при действии малых доз ионизирующего излучения. – В кн.: Тез. докл. Всесоюз. конф. "Актуальные вопросы радиационной гигиены", нояб. 1983 г., Обнинск. М.: ИБФ МЗ СССР, 1983, с. 217.
33. Рамзаев П.В. Перспективы теории в радиационной гигиене. – Там же, с. 215.
34. *Nuclear Power Experience*. – In: Proc. of an intern. conference, Vienna, 13 – 17 Sept. 1982. Vienna: IAEA, 1983, v. 4, p. 581, 582.
35. Beninson D. Application of the Dose Limitation System. – Ibid., p. 399.
36. Определение эффективности новой техники (методика, основные положения). – Экономическая газета, № 10, март 1977 г.
37. Демин В.Ф., Ермакова Е.И., Шевелев Я.В. – Атомная энергия, 1983, т. 54, вып. 3, с. 195.
38. Сводный том материалов по МОЯТЦ. Вена: МАГАТЭ, 1980, с. 249 – 267.
39. *Nuclear power, the environment and man*. Vienna: IAEA, 1982.
40. Нахутин И.Е., Очкин Д.В., Смирнова Н.М. и др. Газоочистка и контроль газообразных выбросов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
41. Овчинников Ф.Я., Марков Ю.В., Сидоренко В.А. и др. – Атомная энергия, 1983, т. 54, вып. 4, с. 249.
42. Nuclear Energy Agency. Report of an expert group on the radiological significance and management of ^3H , ^{14}C , ^{85}Kr and ^{129}I from nuclear fuel cycle, OECD/NEA, 1980.
43. Очистка отходящих газов при переработке облученного топлива за рубежом. АИНФ 515. М., 1980, вып. 2.
44. Крисюк Э.М. Радиационная безопасность населения при использовании строительных материалов: Автореферат дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук, М.: ВЦНИИОТ ВЦСПС, 1982.
45. Типовые проекты жилых зданий. М.: ЦНИИЭПжилища, 1980.
46. Колбасов О.С. – Международно-правовая охрана окружающей среды. М.: Международные отношения, 1982.
47. Шевелев Я.В. Об игровых подходах к задачам народного хозяйства в СССР: Препринт ИАЭ-3489/3. М., 1981.
48. Атомная техника за рубежом, 1979, № 11, с. 30 – 34.

О Г Л А В Л Е Н И Е

1. Введение	1
2. Основные определения и исходные положения	2
3. Нужно ли знать меру в обеспечении безопасности	5
4. Безопасность как экономический фактор. Цена риска	13
5. Дисконтирование и компромисс между поколениями	21
6. Примеры экономического анализа безопасности	31
7. О развитии основ управления безопасностью	38
8. Заключение	44
Список литературы	46

Редактор Л.И. Кирюхина
Технический редактор Н.И. Мазаева
Корректоры В.П. Горячева, М.С. Курзова

Т-19589. 5.10.84. Формат 60х90/16. Уч.-изд. л. 3,0
Тираж 245. Индекс 3624. Заказ 2856

Отпечатано в ИАЭ

45 коп.

Индекс 3624