

# Насколько безопасно "слишком" безопасное?

---

С. К. Блэк и Ф. Нихаус

Любой вид деятельности человека содержит определенный риск для жизни или здоровья. Хотя можно уменьшить существующий риск, возникающий в результате определенной деятельности, невозможно достичь "нулевого риска" или "абсолютной безопасности", которой часто требуют. Если признать этот главный факт, то становится необходимым определить приемлемый уровень риска.

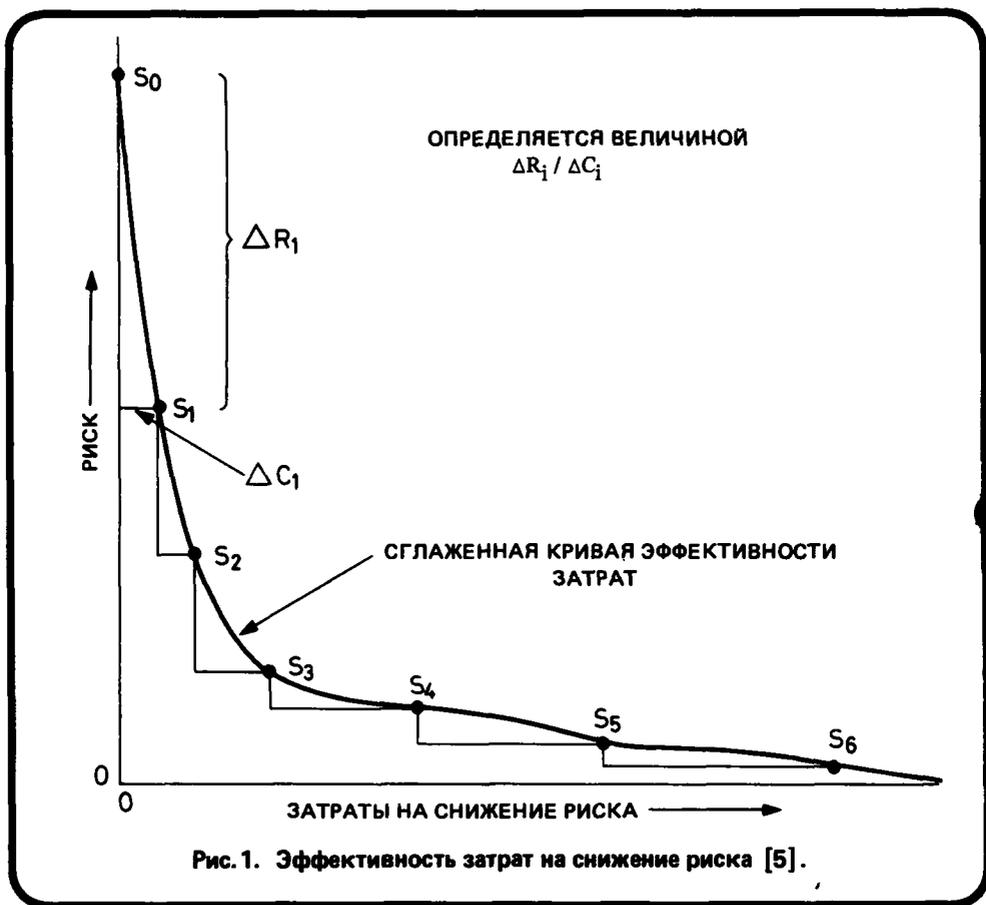
Для определения приемлемого уровня риска наиболее употребительны три метода. Согласно первому методу, *рассматривая риск в перспективе*, можно определить, благоприятно ли сравнение риска данной технологии с существующим риском принятых в настоящее время технологий [1, 2]. Высказывается мнение, что риск новой технологии должен быть по крайней мере в 10 раз меньше риска хорошо разработанных технологий [3, 4]. Согласно второму методу, может использоваться *сравнение риска и выгоды* группы альтернатив для выбора одного из вариантов. Такая процедура требует выражения риска и выгоды в общих единицах, обычно в денежных. Однако эти два метода не дают ответа на вопрос, следует ли сделать данную технологию более безопасной. Поэтому, согласно третьему методу, решение о безопасности базируется на более сложном подходе — *анализе эффективности затрат*, который синонимичен методу предельных показателей затрат — выгод.

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАТРАТ

Расходы на обеспечение безопасности обычно следуют экономическому закону уменьшения отдачи. Основная зависимость этого закона отражена на рис. 1 [5], а результаты тематических исследований даны в библиографии [6, 7]. Из приведенного графика следует, что можно снизить относительно большой риск до значительно меньшего уровня (например,  $\Delta R_1$ ) при относительно малом увеличении затрат (например,  $\Delta C_1$ ). Однако дальнейшее снижение риска обходится все более и более дорого (например, от  $S_5$  до  $S_6$ ). Отношение  $\Delta R/\Delta C$  (т.е. первая производная) в каждой точке кривой является мерой эффективности затрат на дальнейшее снижение риска, начиная от уровня безопасности, представленного этой точкой. Эти предельные затраты на снижение риска измеряются в таких величинах, как предупрежденное отрицательное воздействие на человеческое здоровье на единицу стоимости уменьшения

---

Д-р Блэк — старший сотрудник и д-р Нихаус — руководитель совместного проекта МАГАТЭ/МИПСА по оценке риска.



риска (например, предупрежденная потеря человеко-дней на миллион долларов\*). Из этого рисунка можно сделать два главных вывода:

- 1) предельные затраты на снижение риска увеличиваются с увеличением достигнутого уровня безопасности;
- 2) для любого данного уровня безопасности возможно дальнейшее снижение любого существующего риска; однако снизить риск до нуля невозможно.

Два фактора, вытекающие из этих выводов, нуждаются в дальнейшем обсуждении. Во-первых, следует ли добиваться того, чтобы технологии были *настолько безопасными, насколько это технически достижимо*? Хотя на первый взгляд это могло бы показаться весьма привлекательным подходом, наш повседневный опыт свидетельствует о том, что это невыполнимо. Например, в отношении автомобилей существуют бесчисленные возможности для увеличения безопасности. Но, очевидно, что не все улицы могут быть защищены ограждениями или снабжены уличным освещением, что не все пересечения в одном уровне могут быть заменены пересечениями на разных уровнях и т.д. Решения о безопасности, следовательно, должны прини-

\* Все значения стоимости в денежном выражении приводятся в данной статье в долларах США.

маться таким образом, чтобы расходовать ограниченные средства общества эффективным образом. Два вывода из графика, приведенного на рис. 1, подразумевают, что "безопасность" всегда определяется компромиссом между двумя целями: использовать ограниченные средства наиболее эффективно (сведение к минимуму затрат) и достигнуть наивысшего уровня безопасности (сведение к минимуму риска).

Во-вторых, можно ли оценить человеческую жизнь в денежном выражении? Любая точка кривой на рис. 1, которая могла бы быть выбрана как предел, за которым дальнейшее снижение риска не рассматривается, характеризуется удельными расходами на единицу снижения риска. В частности, любой предотвращенный риск смертельного исхода подразумевает денежную стоимость спасенной человеческой жизни. Это соотношение, связанное с любыми решениями в отношении безопасности, часто неправильно интерпретируется, что служит причиной значительной путаницы. Было предпринято много попыток для определения "ценности человеческой жизни" [8] (например, подход в смысле человеческого капитала, подход в смысле готовности нести расходы). По личному мнению авторов, такие подходы не связаны с принятием решений относительно безопасности и фактически ставят под угрозу проблему завоевания признания общественностью норм безопасности. Попытка определить "ценность человеческой жизни" *не должна* быть основным соображением при выборе нормированной величины для такого соотношения. Такое соотношение обосновано только для *сравнения расходов на безопасность* в различных областях риска, которому подвергается человек. В настоящее время такие расходы, как представляется, колеблются около величины 300 тыс. долларов на спасенную жизнь. Эта величина отражает лишь широкий диапазон существующего опыта, ее появление не явилось результатом применения какого-либо общего правила или методики. Расходы, намного превосходящие эту величину предельной стоимости снижения риска, показывают, что более эффективно было бы вложить ограниченные ресурсы общества в другие области, где они могли бы привести к большему снижению риска. Эти соображения особенно уместны в отношении основных областей обслуживания общества, таких, как производство электроэнергии, где расходы, выходящие за пределы осуществления принципа "наименьшего разумно достижимого уровня" (ALARA), непосредственно отражаются на стоимости одного киловатт-часа электроэнергии и, таким образом, возлагаются на каждого члена общества. В работе [9] предлагалось, чтобы для разных отраслей промышленности применялась какая-то единая величина, а отклонения от нее отражались в увеличении или снижении их налоговых платежей.

Доводом в пользу вышеуказанного подхода является оптимальное ассигнование ограниченных ресурсов общества на расходы в области безопасности. Однако это не дает ответа на более общий вопрос относительно всей суммы расходов на безопасность, так как в соответствии с рис. 1 любой существующий риск может быть уменьшен до любого заданного уровня за очень высокую цену. Тем не менее излагаемый ниже материал говорит о том, что существует практический предел снижения риска, так как чрезмерные расходы на снижение риска будут фактически увеличивать общий риск для общества.

Рассмотрим вопрос о дальнейшем снижении риска эксплуатации энергетических атомных реакторов. В отношении мер безопасности при этих чрезвычайно высоких

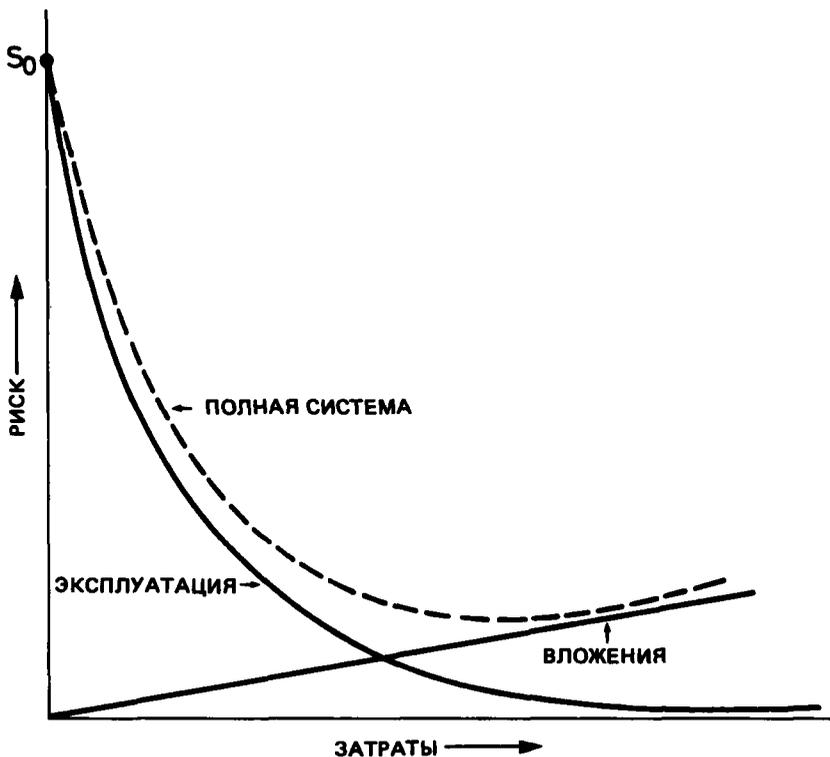


Рис. 2. Основное соотношение между затратами и снижением риска, учитывающее полную экономическую систему.

предельных затратах на снижение риска важное значение приобретает учет профессионального и общественного риска, связанного с производством самого оборудования по обеспечению безопасности, который не учитывался в графике на рис. 1. Это предполагает, что кривую следует несколько изменить. Как показано на рис. 2, для учета риска производства оборудования по обеспечению безопасности следует добавить некоторый линейный член. Это не изменяет зависимости, представленной на рис. 1, для относительно малых предельных затрат. Однако для значительно более высоких величин этот линейный член при сложении с другой кривой приводит в результате к суммарной кривой полного риска, которая проходит через минимум. При высоких затратах кривая полного риска не стремится более к нулевому уровню риска, а приближается к риску производства оборудования по обеспечению безопасности. Минимум имеет место тогда, когда предельные затраты на снижение риска (т.е. первая производная эксплуатационной кривой) равны удельному риску производства оборудования по обеспечению безопасности (т.е. крутизне линейного члена).

## РИСК ПРОИЗВОДСТВА ОБОРУДОВАНИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ

Вычисление этого риска равнозначно определению крутизны прямой линии на рис. 2, представляющей *ущерб здоровью на единицу стоимости оборудования по обеспечению безопасности*. Для наших расчетов мы предположили, что стоимость установленного оборудования по обеспечению безопасности включает стоимость строительных работ — 30%, стоимость обслуживания — 10% и стоимость механизмов и электрического оборудования — 60%. Для производства механизмов, например, требуется добыча руды и угля, обогащение руды, производство кокса, выплавка стали, литье, транспортировка, использование электроэнергии и т.д., в результате чего образуется матрица деятельности. Эта матрица называется таблицей входа (выхода) и используется в экономике для описания взаимных связей отраслей экономики в денежном выражении. Используя эти таблицы и данные по профессиональным травмам и случаям со смертельным исходом, можно построить матрицу, иллюстрирующую потоки ущерба здоровью вместо денежных потоков. Простая математическая операция (обратная матрица Леонтьева) позволяет суммировать риск от всех предварительных стадий изготовления. Используемые здесь профессиональные последствия выведены из данных за 1973 год по Федеративной Республике Германии. В таблице 1 приведены выборочные результаты для некоторых отраслей промышленности. Можно отметить, что горнодобывающая промышленность наносит наибольший ущерб здоровью на единицу стоимости произведенного продукта, хотя требует в сумме меньше рабочих часов, чем строительство. Наибольшее число производственных происшествий со смертельным исходом в результате использования автотранспорта относится к строительству.

Если принять упомянутую выше структуру оборудования по обеспечению безопасности, то полный профессиональный риск и необходимые затраты труда приводятся в таблице 2. Заслуживает внимания относительно высокая доля в ущербе здоровью от производственных автомобильных аварий. В таблице 2 данные включают случаи со смертельным исходом и потерю рабочего времени вследствие болезни. Они были обобщены на основе предположения, что один смертельный случай эквивалентен потере 6000 человеко-дней.

Если качество данных о профессиональных несчастных случаях достаточно высоко, то таких данных относительно риска для всего общества вообще не имеется. При определении порядка величины риска для общества были сделаны следующие допущения.

Из области энергетики. Предположим, что для производства оборудования стоимостью 1 млн. долларов требуется полная первичная энергия около 700 тонн угольного эквивалента (туэ) [10]. Если эта энергия получается из угля и если предположить число смертельных случаев/ГВт (эл.) · год равным 10, то суммарный риск был бы  $2,6 \times 10^{-3}$  смертельных случаев/1 млн. долларов стоимости оборудования.

Из области промышленности. Данные за 1970 год по Федеративной Республике Германии [11] свидетельствует о том, что риск от индустриальных выбросов примерно равен риску от производства энергии.

Из области автомобильных аварий. Предполагается, что риск для общества от автомобильных аварий примерно равен соответствующему профессиональному риску.

**Таблица 1. Полное количество рабочих часов и случаи профессионального ущерба для здоровья при производстве товаров и услуг на сумму 1 млн. долларов**

Отрасли промышленности	Количество рабочих часов, всего	Число случаев смерти при авариях на производстве ( $10^{-2}$ )	Число связанных с производством случаев смерти при автомобильных авариях ( $10^{-2}$ )	Число случаев смерти в результате профессиональных заболеваний ( $10^{-3}$ )	Потеря рабочего времени (в часах)
Станки и электрическое оборудование	82000	0,470	0,354	0,302	416
Горнодобывающая промышленность	76600	1,916	0,340	8,740	1040
Земляные работы	63200	1,182	0,356	0,894	438
Текстильная и швейная промышленность	119600	0,270	0,314	0,232	336
Услуги, пищевая промышленность, художественные товары	75000	0,566	0,210	0,206	118
Строительство	101000	1,492	0,592	0,344	630

**Таблица 2. Общий профессиональный риск производства оборудования по обеспечению безопасности стоимостью в 1 млн. долларов**

Число рабочих часов, всего	87 000
Потери рабочего времени (в часах)	450
Число случаев смерти при авариях на производстве	$7,86 \times 10^{-3}$
Число случаев смерти при автомобильных авариях	$4,12 \times 10^{-3}$
Число случаев смерти в результате профессиональных заболеваний	$0,306 \times 10^{-3}$
Всего смертельных случаев	$12,28 \times 10^{-3}$
$\Sigma$ эквивалентных смертельных случаев * или	$21,6 \times 10^{-3}$
$\Sigma$ эквивалентных потерь рабочих дней *	130

\* 1 смертельный случай = 6000 потерянных человеко-дней.

В целом это говорит о том, что риск для общества добавляет около 50% к профессиональному риску. Таким образом, удельный риск производства оборудования по обеспечению безопасности ( $r_p$ ) оценивается примерно в  $3 \times 10^{-2}$  эквивалентных смертельных случаев или 180 эквивалентных потерянных человеко-дней на 1 млн. долларов стоимости оборудования. Более подробно расчеты величины  $r_p$  описаны в источнике [12].

## ПРИМЕНЕНИЕ

Удельный риск  $r_p$  определяет крутизну прямой линии на рис. 2. Это также означает, что расходы в сумме 33 млн. долларов на оборудование по обеспечению безопасности вызвали бы один эквивалентный смертельный случай в период строительства и установки.

Эта величина может теперь использоваться для определения минимального риска на основе кривой для полной системы. Этот минимум имеет место, когда кривая предельных затрат на снижение риска (кривая "Эксплуатация") имеет ту же крутизну, что и линия "Вложения", но противоположного знака. В этой точке производство и установка оборудования по обеспечению безопасности привели бы в результате к одному эквивалентному случаю ущерба для здоровья среди работников и населения в попытке предотвратить один предполагаемый случай ущерба среди населения в будущем. Иными словами, происходит один статистически достоверный смертельный случай в настоящее время вместо одного гипотетического случая в более позд-

нее время. Естественно, любые размеры расходов на безопасность, превышающие минимальные, будут приводить к большему ущербу для здоровья, чем тот, который они предотвращают. Таким образом, этот уровень — около 33 млн. долларов на одну эквивалентную спасенную жизнь — представляется нам абсолютным пределом уменьшения риска с физической точки зрения. (Следует отметить, что такой принцип используется также в медицинской практике; например, рекомендации относительно проведения вакцинации против оспы были отменены, так как риск самой вакцинации стал выше риска заболевания этой болезнью).

Безусловно, такой же риск для работников и населения имел бы место и при производстве других товаров вместо оборудования по обеспечению безопасности. Однако из этого не следует, что нужно учитывать только чистый эффект, так как производство других товаров дало бы выгоду для общества, и сравнивать следует риски, возникающие в результате различных способов производства этих товаров.

Теперь будет интересно сравнить этот результат с реальными расходами на обеспечение безопасности в различных отраслях промышленности. Подборку данных читатель найдет в источнике [9]. Пример расходов, взятый из источника [6], приводится в таблице 3. Можно видеть, что величина  $r_p$  в нескольких случаях превышена. Вторая колонка дает соотношение между предотвращенными и вызванными эффектами. Соотношение, равное 1, показывает, что предотвращение в чистом виде не достигается; величины больше 1 показывают, что риск в действительности увеличился. Однако, по причинам, излагаемым ниже, авторы не предлагают фактически увеличить предельные затраты на снижение риска до уровня в 33 млн. долларов на эквивалентную спасенную жизнь.

Из вычислений на основе данных таблицы 2 следует, что затраты труда в 1400 человеко-лет привели бы к смещению одного случая эквивалентной смерти (или 6000 эквивалентных потерянных человеко-дней) от периода эксплуатации (или позже) до периода сооружения без какой бы то ни было чистой выгоды. Этот пункт требует дальнейшего обсуждения. Возьмем пример рекомбинаторов и шести угольных слоев из таблицы 3.

Эффективность затрат на снижение риска путем добавления шести слоев древесного угля была оценена в 22 млн. долларов на одну эквивалентную спасенную жизнь (исходя из двух смертельных случаев на 10000 человеко-бэр). Полная сумма расходов на эту систему в расчете на одну станцию составляет около 3 млн. долларов. Предположим, что эти системы установлены на 10 реакторах; тогда общие расходы составили бы 30 млн. долларов. Данные об эффективности затрат приводят к заключению, что такие расходы спасут около 1,36 эквивалентной жизни. В настоящей статье предполагается на основе данных по Федеративной Республике Германии, которые могут оказаться непосредственно не применимыми к данной конкретной ситуации, что производство этих десяти систем привело бы примерно к 0,91 эквивалентных смертельных случаев среди работников и населения. Таким образом, реально риск был бы уменьшен только на 3000 потерянных человеко-дней. Для уменьшения риска на 0,5 жизни общество должно было бы затратить 1300 человеко-лет труда, не считая необходимой энергии и сырья. В итоге общество затратило бы 1300 человеко-лет труда и 0,9 смертельного случая для предотвращения 1,4 случая серьезного ущерба для здоровья.

Таблица 3. Сравнение предельных затрат на снижение риска [6] с  $r_p$   
(1 эквивалентный смертельный случай/33 млн. долларов)

Меры безопасности	Мли. долларов на одну спасен- ную жизнь	(Мли. долларов на одну спасен- ную жизнь) $\cdot r_p$ *
Автомобильные привязные ремни	0,3	0,01
Противопожарные меры в квартирах верхних этажей	40	1,21
50-процентная очистка выбросов сернистых газов для энергетических станций:		
при трубе высотой 30 м	0,2	0,006
при трубе высотой 120 м	2,5	0,08
Атомные электростанции:**		
с рекомбинаторами	9	0,27
с 6 дополнительными слоями древесного угля	22	0,66
с 12 дополнительными слоями древесного угля <sup>+</sup>	150	4,5
с йодной обработкой <sup>+</sup>	500	15,0

\* Величина более 1,0 показывает, что риск от введения мер безопасности превосходит предполагаемое снижение риска.

\*\* Основывается на двух эффектах на  $10^4$  человеко-бэр (смертельные случаи рака плюс серьезные генетические последствия, все поколения)

<sup>+</sup> Предлагается, не осуществлено.

Следовательно, остается вопрос о том, сколько человеко-дней затрат труда следует использовать для предотвращения одного человеко-дня ущерба здоровью. Ясно, что эта проблема нуждается в серьезном изучении, и здесь не может быть дано ее решение. В качестве грубой оценки предположим, что общество израсходовало бы один человеко-год труда, чтобы выиграть один человеко-год жизни. В этом случае потеря одной эквивалентной жизни может быть объединена с 59 рабочими жизнями (1400 человеко-лет) на 33 млн. долларов, приводя в результате к полному вложению 60 человеко-жизней или эффективному  $r_p$  величиной в 1 эквивалентную жизнь на 0,5 млн. долларов. Очевидно, что в этой величине доминируют трудовые затраты. В отношении радиационной защиты следует отметить, что эта величина была бы эквивалентна 100 долларам на человеко-бэр.

Возвращаясь к вопросу о безопасности атомных энергетических установок, рассмотрим недавнюю работу Управления по защите окружающей среды США [7], в которой

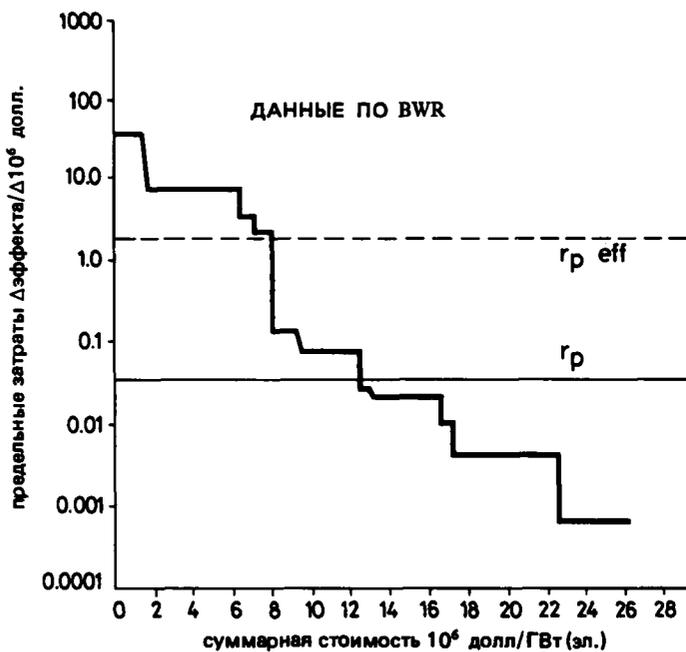
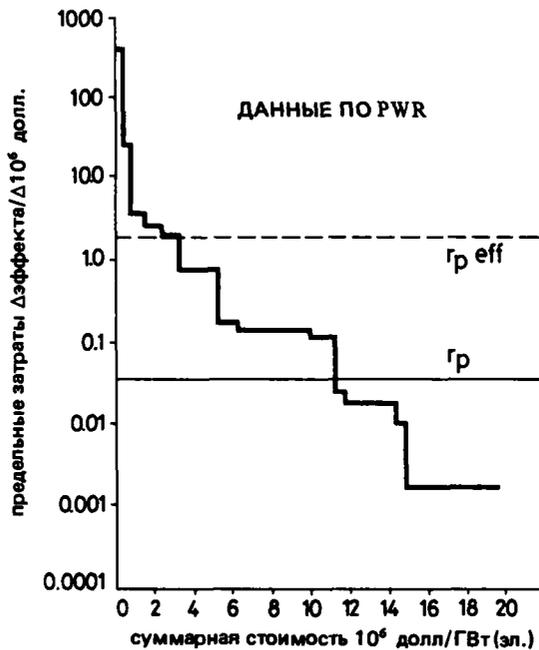


Рис. 3. Эффективность затрат на снижение риска [7].

представлены расчеты эффективности затрат для систем снижения риска в суммарных топливных циклах реакторов с водой под давлением (PWR) и кипящих реакторов (BWR). Обратные предельные затраты на снижение риска изображены на рис.3 в логарифмическом масштабе. Если учитывать удельный риск  $r_p$  в размере 1 смертельный случай/33 млн. долларов, то можно увидеть, что учтено несколько систем снижения риска, которые в действительности предотвратили бы меньше ожидаемых случаев ущерба для здоровья, чем вызвали бы их в период производства. При полной суммарной стоимости около 12 млн. долларов для PWR и BWR предельные затраты на снижение риска — учитывая полную экономическую систему — достигли бы минимума, показанного на рис.2, выше. Эффективное значение  $r_p$ , основанное на ущербе для здоровья с учетом необходимых затрат труда, также показано на диаграмме.

Необходимо отметить, что приравнивание одного эффекта в будущем к одному эффекту в период строительства содержит элемент логического суждения. Мы согласны с изложенной в источнике [13] мыслью о том, что не следует делать скидку для будущего эффекта: следовательно, один эффект в будущем должен рассматриваться так столь же серьезный, как и эффект, проявившийся немедленно. Однако это вносит элемент консерватизма в расчеты, так как не учитывается разработка в будущем улучшенных методов медицинского воздействия.

Приведенные здесь расчеты основаны на ожидаемых величинах, и в них используются конкретные допущения для приведения к суммарной величине различных видов риска для общества. Выводы, содержащиеся в этой статье, конечно, зависят от различных допущений, принятых в расчетах. Иные допущения могут привести к другим результатам; тем не менее общая методология представляется правильной и пригодна для дальнейшего применения.

## РЕЗЮМЕ

В данной статье высказывается мысль о том, что полный риск не может быть уменьшен ниже любого заданного уровня. В определенной точке профессиональный и общественный риск производства оборудования по обеспечению безопасности становится выше, чем достигнутое уменьшение существующего риска. На основе данных по Федеративной Республике Германии установлено, что в период строительства и установки оборудования по обеспечению безопасности стоимостью около 33 млн. долларов происходит 1 эквивалентный смертельный случай или потеря 6000 эквивалентных человеко-дней. Таким образом, расходы на безопасность при предельных затратах на снижение риска более 33 млн. долларов на одну эквивалентную спасенную жизнь в действительности привели бы к возрастанию риска. Можно сделать вывод, что это окажется "слишком" безопасным. Более того, эти расходы предполагают, что затраты труда в 1400 человеко-лет на одну эквивалентную жизнь использованы без чистого увеличения безопасности.

Преимущество разъясненного здесь метода заключается в том, что в нем описывается эффективность снижения риска в физических единицах, т.е. через посредство профессионального и общественного риска и труда, необходимого для производства оборудования по обеспечению безопасности, что позволяет тем самым избежать сопоставления между деньгами и человеческой жизнью.

## Библиография

- [1] US Nuclear Regulatory Commission. Reactor Safety Study. An Assessment of Accident Risks in the US Commercial Nuclear Power Plants. WASH-1400 (NUREG-75/014). Washington, DC (1975).
- [2] Canvey: An Investigation of Potential Hazards from Operations in the Canvey Island/Thurrock Area. Health & Safety Executive, Her Majesty's Stationery Office, London (1978).
- [3] Higson, D.J., The Development of Safety Criteria for Use in the Nuclear Industry. Presented at the Sixth National Chemical Engineering Conference in Queensland, Australia, 6–8 November (1978).
- [4] Tattersall, J.O., D.M. Simpson, and R.A. Reynolds. A Discussion of Nuclear Plant Safety with Reference to Other Hazards Experienced by the Community. Page 671, A/CONF. 49. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria (1972).
- [5] Rowe, W.D., An Anatomy of Risk. John Wiley & Sons, New York (1977).
- [6] Sagan, L., Public Health Aspects of Energy Systems. In: H. Ashley, R.L. Rudman and C. Whipple (eds.), Energy and the Environment – A Risk-Benefit Approach pp. 87–111. Pergamon Press, New York (1976).
- [7] US Environmental Protection Agency. Environmental Radiation Protection Requirements for Normal Operations of Activities in the Uranium Fuel Cycle. EPA-520/4-76-016. Washington, D.C. (1976).
- [8] Linnerooth, J., The Value of Human Life: A Review of the Models. Economic Inquiry, 17, 52–74, January (1979).
- [9] Siddall, E., A Rational Approach to Public Safety – An Interim Report. Canatom, Ltd., Toronto, Canada (1979).
- [10] Niehaus, F., Nettoenergiebilanzen – Ein Hilfsmittel zur Analyse von Energienutzungsstrukturen. Brennstoff – Wärme – Kraft, 10, 396–400 (1975).
- [11] Niehaus, F., and H. Engelhardt. Vergleichende Darstellung atmosphärischer Schadstoffbelastungen. VDI-Bericht, 224, 127–141 (1974).
- [12] Black, S.C., F. Niehaus, and D.M. Simpson. How Safe is "Too" Safe? WP-79-68, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria (1979).
- [13] Cohen, J.J. and H.A. Tewes (1979), Development of Radiological Criteria for Nuclear Waste Management. IAEA-SR-36-22. Paper presented at the Topical Seminar on the Practical Implications of the ICRP Recommendations (1977) and the Revised IAEA Basic Standards for Radiation Protection. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

## Выражение признательности

Авторы выражают свою признательность г-ну Дэвиду Симпсону, который является соавтором более технического варианта настоящей статьи, указанного в библиографии.