

ОБОБЩЕНИЕ ПОНЯТИЯ РИСКА НА СЛУЧАЙ ВРЕМЯЗАВИСИМЫХ ЕГО КОМПОНЕНТОВ

Ю.В. Волков

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



Получены соотношения для оценок риска от объектов ядерных технологий для случая, когда его компоненты – вероятность аварии и величина ущерба от нее – зависят от времени. С помощью простых моделей продемонстрированы новые возможности при проведении ВАБ, которые дает такое обобщение понятия риска. В качестве примера по простейшей модели проведен анализ безопасности хранения РАО с однокомпонентной активностью.

В Федеральном законе № 184-ФЗ от 27.12.2002 «О техническом регулировании» дано такое определение риска: «Риск – вероятность причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда». Авторы этого определения, составляя его, по-видимому, не особенно заботились о количественном измерении риска. Иначе они определили бы как учитывать «тяжесть этого вреда». Поэтому приведенное определение допускает его неоднозначное толкование. Например, некоторые специалисты по проведению вероятностного анализа безопасности (ВАБ) в области ядерных технологий понимают под его количественной мерой – вероятностное распределение величины ущерба для постулированного набора аварийных событий. Но при такой интерпретации никак не фигурирует временная компонента, т.е. возможные зависимости от времени этого распределения. В мировой практике и в литературе по ВАБ [1–5] широко распространено определение риска R как произведения

$$R = P * C \quad (1)$$

вероятности неприятного события P на ущерб от него C . Такое количественное определение риска, не противореча его качественному определению в цитированном Федеральном законе, также не может считаться удовлетворительным, т.к. не учитывает возможные зависимости от времени обеих величин, входящих в это произведение.

Пример: Хранилища, заполненные радиоактивными отходами (РАО), могут потерять герметичность в какой-то случайный момент времени после начала эксплуатации. Следовательно, активность РАО, выделившихся в окружающую среду в этот момент (ущерб), будет определяться законом распада РАО и временем от начала эксплуатации хранилища до момента его повреждения. При этом, оставаясь за пределами хранилища, РАО будут распадаться и в дальнейшем, т.е. выделившаяся ак-

тивность (ущерб) будет и дальше изменяться во времени. И затраты на ликвидацию последствий аварии с разгерметизацией хранилища, возможно, будут изменяться во времени по более сложному закону, чем закон радиоактивного распада, т.к. на них могут влиять, например, стоимость работ по ремонту и герметизации хранилища, инфляционные процессы и т.д. Следовательно, как надежность хранилища $P(t)$, так и ущерб от его повреждения $C(t)$ являются функциями времени.

В работах [6, 7], в связи с изучением вопроса о необходимости и эффективности трансмутации РАО, предпринята попытка оценивать среднюю активность, выделяемую в окружающую среду при аварийной разгерметизации хранилища. Полученные оценки этой активности занижены, т.е. сделаны не в запас безопасности.

Далее будем придерживаться количественной меры риска, подобной определенной в работах [1–5]. Правильный учет временных зависимостей в оценках риска должен приводить к более сложному выражению для риска, чем (1).

В самом деле, пусть объект, риск от которого требуется вычислить, остается в работоспособном состоянии в течение времени t с вероятностью $P(t)$. Тогда вероятность того, что объект откажет в малом единичном интервале времени после момента времени t , при условии, что до этого момента времени он не отказал (интенсивность повреждения объекта), согласно [8], есть

$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP}{dt}. \quad (2)$$

Пусть при отказе объекта в произвольный момент времени τ внутри отрезка $[0, t]$ возник ущерб от объекта, составивший к моменту времени t величину $C(t, t - \tau)$. Тогда среднее значение ущерба от объекта, образовавшееся к фиксированному моменту времени t будет

$$R(t) = \int_0^t C(\tau, t - \tau) P(\tau) \lambda(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где произведение $P(\tau) \lambda(\tau) d\tau$ есть вероятность того, что объект не откажет к моменту времени τ и откажет в малом интервале времени $d\tau$ после этого момента.

Подстановка (2) в (3) приводит к выражению

$$R(t) = -\int_0^t C(\tau, t - \tau) dP(\tau) \quad (4)$$

или, что то же самое

$$R(t) = \int_0^t C(\tau, t - \tau) f(\tau) d\tau, \quad (4')$$

где $f(\tau)$ – плотность распределения времени до отказа объекта.

Из формулы (4') видно, что риск $R(t)$ – условное среднее значение ущерба от объекта, при условии, что этот ущерб образовался до момента времени t .

Соответственно

$$R(\infty) = \int_0^{\infty} C(\tau, \infty - \tau) f(\tau) d\tau \quad (5)$$

есть среднее значение ущерба от объекта за все время, пока он представляет хоть какую-нибудь опасность (реальную или потенциальную) и может принести ущерб.

Это и есть обобщение понятия риска на случай зависимости от времени как вероятностей неприятных событий, так и ущербов от них.

Понятно, что интеграл в правой части выражения (5) может не сходиться, и в этом случае $R(\infty) = \infty$. Это происходит, когда произведение $C(\tau, \infty - \tau) f(\tau)$ при $\tau \rightarrow \infty$ стре-

мится к нулю недостаточно быстро. Нетрудно показать, что условием сходимости интеграла в выражении (5) является требование, чтобы при достаточно больших τ

$$C(\tau, \infty - \tau)f(\tau) \approx \tau^{-(1+\alpha)}, \quad (6)$$

где $\alpha > 0$.

Поскольку никакая разумная деятельность (в том числе и в области ядерных технологий) не должна приводить к катастрофически большим рискам, то из асимптотики (6) следует важный вывод: *имеет право на существование только такая разумная деятельность, в результате которой возникают объекты, ущерб от аварий на которых растет со временем τ не быстрее, чем*

$$u(\tau) = f^{-1}(\tau) \tau^{-(1+\alpha)}. \quad (7)$$

Зависимость (7) может служить ограничивающим критерием на развитие технологий (в том числе и ядерных).

В работе [3] дано обоснование того, что очень надежные объекты (сооружения блоков АС, хранилища РАО и т.п.) должны иметь плотность распределения времени до повреждения, близкую к экспоненциальной. Тогда, положив

$$f(\tau) = v e^{-v\tau},$$

для экспоненциально надежных объектов можно получить оценку

$$u(\tau) = \frac{e^{v\tau}}{v\tau^{1+\alpha}} = \frac{1}{v} e^{v\tau - (1+\alpha)\ln\tau}.$$

Из изложенного можно сделать важный вывод: *чтобы риски от какой-либо разумной деятельности не становились для нее катастрофическими, необходимо, чтобы ущербы от аварий на создаваемых объектах росли со временем медленнее, чем уменьшается их надежность.*

Если рассматривается несколько событий в данном виде деятельности, и они несовместны, то парциальные риски $R_i(t)$ складываются, чтобы получить полный риск

$$R(t) = \sum_{i=1}^n R_i(t)$$

от всех рассматриваемых n событий. При этом условия полноты совокупности событий, а также их несовместности должны соблюдаться для каждого момента времени.

Для иллюстрации возможностей и полезности использования введенного здесь обобщенного понятия риска рассмотрим простой пример оценки риска от эксплуатации хранилища РАО, который можно определить несколькими способами, например, как

- среднюю величину активности, выделяемую в момент разрушения хранилища;
- среднюю величину интегральной активности, выделенной к моменту времени t , если разгерметизация хранилища произошла до этого момента.

Предположим, в начальный момент времени $t = 0$ в хранилище заложено N_0 ядер РАО одного типа. Эти ядра, распадаясь, превращаются в ядра стабильного изотопа, не представляющего опасности. В соответствии с законом радиоактивного распада, количество РАО к моменту времени t будет равно

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda_0 t},$$

где λ_0 – постоянная распада РАО.

Значит скорость изменения числа радиоактивных ядер в момент времени t будет

$$N'(t) = -\lambda_0 N_0 e^{-\lambda_0 t}.$$

Предположим, что при разгерметизации хранилища все количество РАО выходит в окружающую среду и там продолжает распадаться с выделением активности.

Тогда при разрушении хранилища в случайный момент времени τ , в этот момент из хранилища выйдет

$$C(\tau) = \lambda_0 N_0 e^{-\lambda_0 \tau} \quad (8)$$

активности. Как отмечено выше, надежность хранилища РАО должна быть близкой к экспоненциальной

$$P(t) = e^{-vt}. \quad (9)$$

Следовательно, согласно формуле (4), средняя величина активности, выделенной из хранилища в момент его разрушения до момента времени t , будет равна

$$R(t) = \frac{v \lambda_0 N_0}{v + \lambda_0} (1 - e^{-(v + \lambda_0)t}). \quad (10)$$

Тогда

$$R(\infty) = \frac{\lambda_0 v}{\lambda_0 + v} N_0.$$

Оценим, сколько интегральной активности в среднем может быть выделено к моменту времени t при разрушении хранилища в случайный момент времени $\tau \leq t$. К моменту времени t всего распадется

$$N(\tau, t - \tau) = \int_{\tau}^t N'(u) du$$

ядер РАО, и выделенная интегральная активность будет равна

$$C(\tau, t - \tau) = N_0 e^{-\lambda_0 \tau} [1 - e^{-\lambda_0(t - \tau)}]. \quad (11)$$

Подстановка (9) и (11) в (4) приводит следующему выражению для среднего значения интегральной активности, выделенной в окружающую среду при разгерметизации хранилища к моменту времени t

$$R(t) = N_0 \left\{ \frac{v}{\lambda_0 + v} - e^{-\lambda_0 t} \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_0 + v} e^{-vt} \right) \right\}, \quad (12)$$

отсюда

$$R(\infty) = \frac{v}{\lambda_0 + v} N_0.$$

При $\lambda_0 \gg v$

$$R(t) \approx N_0 \left\{ \frac{v}{\lambda_0} - e^{-\lambda_0 t} (1 - e^{-vt}) \right\},$$

и соответственно

$$R(\infty) \approx \frac{v}{\lambda_0} N_0.$$

Следовательно, для короткоживущих РАО средняя интегральная активность, которая может выделиться из-за разрушения хранилища за все время наблюдения за ним, очень мала и определяется количеством РАО N_0 , загруженным в начале, и отношением $a = v/\lambda_0$ «постоянной распада» хранилища v к постоянной распада хранящегося изотопа λ_0 . Физически это объясняется тем, что короткоживущий изотоп распадается очень быстро, и его мало остается в хранилище до разрушения, а после разрушения хранилища он быстро исчезает в окружающей среде.

Если $\nu \gg \lambda_0$, то

$$R(t) \approx N_0 \left\{ 1 - e^{-\lambda_0 t} \left(1 - \frac{\lambda_0}{\nu} e^{-\nu t} \right) \right\},$$

и

$$R(\infty) \approx N_0.$$

Таким образом, для долгоживущих РАО средняя интегральная активность, которая может выделиться при разрушении хранилища в любой момент времени, определяется только количеством РАО, т.к. после разрушения хранилища практически все количество изотопа выходит в окружающую среду.

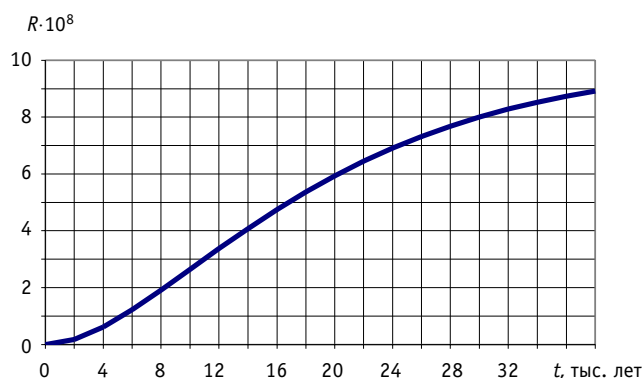


Рис.1. Зависимость риска от времени при $\nu = 10^{-7}$ и $a = 10^{-5}$

На рис. 1 приведены результаты оценок риска от разгерметизации хранилища РАО по формуле (12), приходящегося на одно хранящееся радиоактивное ядро ($N_0 = 1$), при $\nu = 10^{-7}$ 1/год (как это рекомендовано нормативным документом [9]), и при $a = \nu/\lambda_0 = 10^{-5}$. Видно, что при малых значениях a (хранится, сравнительно, короткоживущий изотоп с $\lambda_0 = 10^{-2}$ 1/год) кривая $R(t)$ достаточно быстро выходит на асимптотику. Если период полураспада изотопа равен периоду «полураспада» хранилища РАО или больше его, например, в 10 раз, то насыщение кривой $R(t)$ может не наступить даже за миллионы лет. Следует заметить, что данные на рис. 1 иллюстрируют ситуацию с хранением РАО, содержащих такие изотопы, как, например, U^{232} (период полураспада примерно 70 лет), или Cs^{137} (период полураспада примерно 33 года), т.е. РАО, наиболее токсичные для человека. Распадаясь, эти изотопы превращаются в практически стабильные изотопы с периодами полураспада в миллионы лет.

Понятно, что риски оценивать и прогнозировать имеет смысл только для разумных времен. Автор полагает, что «разумные времена» это примерно 50–100 лет, т.к. на более далекие перспективы, как правило, люди стараются ничего не прогнозировать. И если такие прогнозы появляются, то к ним обычно относятся как к неким фантазиям. Оценки рисков по формуле (12) при $\nu = 10^{-7}$ 1/год и различных значениях a , для времен 50 и 100 лет приведены в табл. 1.

Таблица 1

ν (1/год)	10^{-7}		
a	0.00001	1.	10.
T (лет)	50		
R	$9 \cdot 10^{-9}$	$1.25 \cdot 10^{-18}$	$1.25 \cdot 10^{-20}$
T (лет)	100		
R	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-18}$	$5 \cdot 10^{-20}$

Из данных табл. 1 можно сделать следующий вывод: *если при организации хранения РАО ориентироваться на ближайшую перспективу (заботиться пока только о ближайших двух поколениях потомков), то основная забота должна быть о хранении РАО с периодами полураспада в десятки – сотни лет. Долгоживущие изотопы (при достаточной надежности хранилища) в ближайшее время дадут риск, в миллионы – миллиарды раз меньший.* Расчеты показывают, что изотоп с $a=1$ даст риск, сравнимый с риском от изотопа с $a=0.00001$ только через примерно 2 млн. лет, а изотоп с $a=10$ более чем через 10 млн. лет.

Таким образом, введенное обобщенное понятие риска дает новые возможности при оценках безопасности объектов ядерных технологий, и не только их. Автор вполне осознает, что полученные здесь на основании простых моделей выводы относительно рисков от технологий и хранения РАО могут кому-нибудь показаться или банальными, или спорными. Представляется, что если материал статьи послужит поводом для открытия дискуссии между специалистами на эту тему, то одна из целей ее написания будет достигнута.

Автор благодарит профессора Ю.А. Казанского за доброжелательную критику и полезные обсуждения результатов работы.

Литература

1. Швыряев Ю.В. и др. Вероятностный анализ безопасности атомных станций. Методика выполнения// Ядерное общество. – Москва, 1992.
2. Новиков В.М., Слесарев И.С., Алексеев П.Н. и др. Ядерные реакторы повышенной безопасности (анализ концептуальных разработок). – М.: Энергоатомиздат, 1993.
3. Волков Ю.В. Надежность и безопасность ЯЭУ: Учебн. пособие по курсу «Надежность и безопасность ЯЭУ». – Обнинск: ИАТЭ, 1997.
4. Гордон Б.Г. Об использовании понятия риска в различных отраслях промышленности//Вестник Госатомнадзора России. – 2003. – № 1.
5. Ковалевич О.М. К вопросу об определении «степени риска»//Вестник Госатомнадзора России. – 2004. – № 1.
6. Казанский Ю.А., Дудкин А.Н., Клинов Д.А. Трансмутация: мода или необходимость? //Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1993. – № 1.
7. Казанский Ю.А., Клинов Д.А. Эффективность трансмутации осколков деления//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2000. – № 4.
8. Кокс Д., Смит В. Теория восстановления. – М.: Советское радио, 1967.
9. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ), НП-016-2000, Госатомнадзор РФ. – М., 2000.

Поступила в редакцию 25.07.2005

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039:37

Russian Center of Nuclear Science and Education is the Way of Nuclear Engineering Skilled Personnel Training \V.M. Murogov, N.L. Salnikov; – Obninsk, 2006. – 11 pages, 1 illustration, 2 tables.

Nuclear power engineering as the key of nuclear technologies is not only the element of the power market but also the basis of the country's social-economic progress. The defenses, engineering, medicine, science, industry based on nuclear technologies are the way to highly developed country. And the problem of knowledge conversation and transmitting to new generations is the one of knowledge transmitting to developing countries.

The creation of science-research centers consolidating nuclear science and education leads to safeguarding of stability and security in Russia.

Obninsk as the first science town in Russia is the ideal place for the creation of integrated Science-Research Center of Nuclear Science and Technologies – The Russian Center of Nuclear Science and Education («Center» for conservation and development of nuclear knowledge. On the base of Obninsk education and science organizations and State Center «Kurchatov Institute» there was created the Russian Association of Nuclear Science and Education for carrying out of the scientific session with World Nuclear University and IAEA «The role of nuclear technologies in society of XXI century».

УДК 621.039.58: 621.039.52

Computational and Experimental Investigations for Safety Substantiation of ADE-Type Commercial Uranium-Graphite Reactors in Case of Emergency Depressurization of Fuel Channels \S.N. Belousov, O.Yu. Vilensky, N.G. Kuzavkov, A.V. Malkov, V.V. Petrunin, S.F. Shepelev; – Obninsk, 2006. – 10 pages, 10 illustrations, 1 table. – References, 2 titles.

The paper presents the results of computational and experimental simulation of emergencies with depressurization of fuel channels of ADE-2, ADE-4, ADE-5 production uranium-graphite reactors (PUGR). The adopted concept of emergency progress, methodology and equipment for computational and experimental investigation of emergencies are described: mathematic model, RFCD computer code, and experimental test facility developed and fabricated in OKBM. The results of analyses and full-scale experiments are compared: temperature range of graphite sleeve and block simulators is 300-550°C with impact pressure and flow pulsation with amplitude of ~ 10 MPa and frequency of ~ 100 Hz in depressurization area, which were obtained during preliminary analysis using RFCD computer code. The developed RFCD code and test facility can be also used to analyze safety of pressure-tube reactor (RBMK).

УДК 621.039.7

Generalization of Risk Concept in Case Risk Components Depend on Time \Yu. V. Volkov; – Obninsk, 2006. – 6 pages, 1 illustration, 1 table. – References, 9 titles.

Ratios of risk assessments vs. nuclear technologies objects have been obtained for cases when such risk components as accident probability and the consequent damage depend on time.

Such generalization of risk concept brings about new possibilities for performing PSA which have been demonstrated with simple models in the present work.

As an example safety of radwaste storage with monopropellant activity has been analyzed with a very simple model.

УДК 621.039.58: 519.873

Generalization of Mathematical Model of Reliability of the Complex «Protection Object – Control and Protection System» \A.I. Pereguda, R.E. Tverdohlebov; – Obninsk, 2006. – 10 pages, 9 illustrations. – References, 5 titles.