

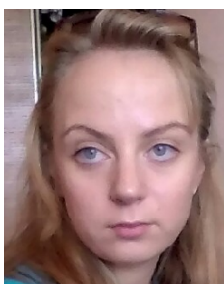
ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО РИСКА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА ПЕРИОДА  
УСТОЙЧИВОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

ASSESSMENT OF TECHNICAL RISK ACCORDING TO THE MONITORING PERIOD  
OF STABLE OPERATION OF COMPLEX OBJECTS



*МАЛОВИК Константин*  
*MALOVIK Konstantin*  
*konstmalovik@mail.ru*

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности,*  
*Севастополь, 299015, улица Курчатова, 7*



*ЕЛИСЕЕВА Мария*  
*ELISEEVA Maria*  
*[marysia\\_a\\_a@mail.ru](mailto:marysia_a_a@mail.ru)*

*Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности,*  
*Севастополь, 299015, улица Курчатова, 7*

*В работе рассмотрены вопросы повышения качества менеджмента технического риска при мониторинге и устойчивой эксплуатации сложных объектов. Выделены зоны неопределенности технического риска и сформулированы показатели качества проектирования технического риска сложных объектов.*  
*Ключевые: технический риск, зона неопределенности, показатели ресурсоспособности, качество проектирования.*

*The paper considers the questions of improvement of quality of management of technical risk monitoring and sustainable operation of complex objects. Separate sitting area uncertainties technical risk and defined indicators for the quality of the design of the technical risk of complex objects.*  
*Keywords: technical risk, the zone of uncertainty, the parameters of resursoemkost, quality of design.*

**1. Введение.** Анализ Чернобыльской аварии на Украине, аварии на Саяно-Шушенской ГЭС в России, критических событий на АЭС Фукусима в Японии показывает, что они имеют системные причины, которые в обобщенном виде можно сформулировать как недостаточный уровень культуры безопасности [1, 2]. Поэтому вопросы анализа, оценивания и прогнозирования предотказных и предельных состояний и отказов оборудования сложных объектов (СО) продолжают оставаться чрезвычайно актуальными. В этом плане необходимо дальнейшее развитие одного из важных разделов теории безопасности – теории технического риска по отношению к процессу долгосрочной эксплуатации сложных опасных производственных

объектов, к которым можно отнести атомные станции, магистральные нефтегазопроводы, железнодорожный транспорт, комплексы тепловой энергетики, а также другие производственные системы и промышленные зоны [3].

**2. Анализ требований к оценке технического состояния СО.** Для дальнейшего рассмотрения предлагается определить, что СО это объект, который состоит из множества элементов с разными механизмами старения, прежде всего деградационного и (или) ресурсного характера, который требует для оценивания технического состояния применения принципов системного анализа, учитывая индивидуальность подхода к выбору и нормированию показателей

ресурсоспособности и долгосрочной эксплуатации [2]. При этом необходимо учитывать, что особенностями таких СО, которые следует рассматривать на всех этапах их жизненного цикла, можно определить [4]:

- применение высоконадежного, уникального оборудования, которое не должно отказывать и не выпускается в условиях массового или мелкосерийного производства;
- разработка специальных требований Потребителя или Заказчика, которые не являются типовыми стандартными;
- достижение максимального эффекта от обеспечения оборудованием данного СО того условия, которой взято за основу его функционирования, т.е. обеспечение принципа Гермейера;
- возможность классификации СО на базе модели динамики состояний их ресурсоспособности, учитывая, что оценивание ресурсных характеристик происходит в сложных условиях многофакторности влияющих воздействий и третьего этапа их жизненного цикла.

### 3. Анализ и выбор показателей надежности для оценивания вероятностей отказов оборудования СО

Применение термина «технический риск» - (R) на основании классификации рисков по объекту воздействия [5], предопределяет наличие большого числа проблем при определении значений вероятностей отказов которые связаны с решением таких непростых задач, как высокая надежность оборудования, малое число критических несоответствий вызванных его предельным состоянием, неоднородность и усеченность выборок, разнородность элементной базы и материалов, различие технологических схем и т.д. [6].

Высококачественного оценивания и прогнозирования таких вероятностей особенно важно при исследовании безопасной долгосрочной эксплуатации СО, для чего разработана и предложена система показателей их ресурсоспособности [2]. При этом показано, что одним из определяющих показателей ресурсоспособности можно считать диапазон допустимых значений предельной наработки соответствующий

интенсивности предельных отказов при пессимистическом и оптимистическом прогнозе, который должен иметь научно-техническое обоснование на стадии проектирования СО. Известно [7], что для повышения точности и достоверности результатов расчета интенсивности таких отказов  $\lambda(t)$  целесообразно применение непараметрического метода ядерной оценки:

$$\lambda(t) = \frac{f_{\xi_n}(t)}{1 - F_{\xi_n}(t)}, \quad (1)$$

где  $F_{\xi_n}(t)$  и  $f_{\xi_n}(t)$  – ядерные оценки функции плотности распределения, соответственно;

$n$  – общее число наблюдений;

$\xi$  – случайная величина выборки  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ .

Для дальнейшего выполнения операций определения  $\lambda(t)$  необходимо иметь данные о назначенном  $t_H$  и гамма-процентном ресурсе  $t_\gamma$ , которые устанавливаются на этапе проектирования СО. Одновременно для этих ресурсных характеристик должны быть указаны диапазоны изменений интенсивности отказов  $\lambda_H^H - \lambda_H^B$  и  $\lambda_\gamma^H - \lambda_\gamma^B$ , предусматривающие пессимистическое и оптимистическое прогнозирование.

Тогда состав функций для определения вида тренда  $\lambda(t)$  (1) можно ограничить совокупностью двухпараметрических семейств:

$$\lambda_1(t) = a + bt, \lambda_2(t) = at^b, \lambda_3(t) = ae^{bt}, \lambda_4(t) = e^{at}t^b. \quad (2)$$

Последующее изложение можно рассмотреть на примере показательной функции  $\lambda_3(t)$ , которая является характерной и наиболее распространенной для подавляющего большинства СО. Используя операции логарифмирования и замены переменных, можно получить выражение для определения исследуемого времени предельного состояния  $T_{\text{ПР}} \text{ СО}$

$$T_{\text{ПР}} = \frac{\ln \frac{\lambda_{\text{ПР}}}{a}}{b}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{ПР}}$  – значение интенсивности  $\lambda(t)$ , соответствующее предельному состоянию СО;

$a, b$  – неизвестные параметры аппроксимирующих функций, которые

подлежат оценки имеющимся экспериментальным данным,

$$a = \lambda_H \left( \frac{t_H}{t_Y} \right)^{\frac{t_H}{t_Y - t_H}}, b = \frac{\ln \lambda_H - \lambda_Y}{t_H - t_Y}.$$

Следовательно для расчета  $T_{\text{ПР}}$  необходимо определить предельное значение  $\lambda_{\text{ПР}}$ , нижнее и верхнее значения которого определяются выражениями [7]

$$\lambda_{\text{ПР}}^H = \lambda_{\text{ПР}}^C - \Delta\lambda_{\text{ПР}}, \lambda_{\text{ПР}}^B = \lambda_{\text{ПР}}^C + \Delta\lambda_{\text{ПР}} \quad (4)$$

где  $\lambda_{\text{ПР}}^H, \lambda_{\text{ПР}}^B$  - диапазоны изменений интенсивности отказов  $\lambda(t)$ , соответствующее предельному состоянию СО предусматривающие пессимистическое и оптимистическое прогнозирование;

$\lambda_{\text{ПР}}^C = \frac{M_\eta(t)}{1-F(t)}$  - среднее значение  $\lambda$ -характеристики, в котором  $F(t)$  - функция распределения наработки до отказа,  $M_\eta(t)$  - математическое ожидание случайной величины  $\eta$ , которое определяется как

$\eta = \frac{1}{\sigma} G\left(\frac{t-\xi_i}{\sigma}\right)$ , при выбранных  $\sigma$ - параметр локальности и  $G(\xi)$  - ядро разложения;

$\Delta\lambda_{\text{ПР}} = t_{n,\alpha/2} \sqrt{\frac{D_\eta(t)}{n}} \cdot \frac{1}{1-F(t)}$  - допустимое отклонение  $\lambda$ - характеристики, в котором  $D_\eta(t)$  - дисперсия случайной величины  $\eta$ , а  $t_{n,\alpha/2}$  - расчетное значение критерия Стьюдента при выборке объема  $n$  и заданном уровне значимости  $\alpha/2$ .

Следует отметить, что выбор ядра  $G(\xi)$  зависит от априорной информации о свойствах плотности  $f_{\xi,n}(t)$ , поэтому в настоящее время для его подбора могут быть применены треугольная функция, ядро Порзена, ядро Резенблата, ядро Коши, ядро Тьюни и др. [8].

Такой подход для аналитического обратного прогнозирования времени предельного состояния позволяет оценивать и нормировать его допустимые изменения при разном характере поведения  $\lambda$  - характеристики, включая экстенсивные и интенсивные механизмы деградации [7]. При этом следует отметить, что исследование времени предельного состояния  $T_{\text{ПР}}$  СО

определяется входной информацией, которая характеризует объективные и субъективные условия таких этапов жизненного цикла СО, как проектирование, изготовление и эксплуатация. Поэтому для оценивания  $R$  при мониторинге и устойчивой эксплуатации СО на базе выбранных показателей надежности определяемых выражениями (1, 3, 4) можно получить нижнюю и верхнюю границы интервальной оценки вероятностей отказов  $P_{\text{П}}^H, P_{\text{П}}^B, P_{\text{И}}^H, P_{\text{И}}^B, P_{\text{Э}}^H, P_{\text{Э}}^B$  [9], а также зоны их допустимых изменений  $\Delta P_{\text{П}}, \Delta P_{\text{И}}, \Delta P_{\text{Э}}$  для указанных этапов жизненного цикла оборудования СО.

#### 4. Применение динамической модели для определения технического риска

Для дальнейшего исследования  $R$  СО в оговоренных условиях, учитывая этапы оценивания и менеджмента риска [10], целесообразно применение обобщенной динамической модели, графическая интерпретация которой показана на рис.1 [6].

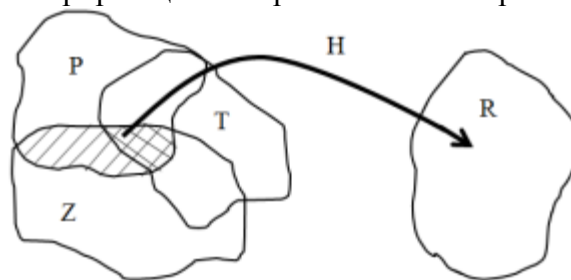


Рис. 1. Графическая интерпретация соотношения технического риска  $R$ , вероятностей предельных состояний  $P$ , ущерба  $Z$  во время  $T$  эксплуатации СО

При этом учитывая, что  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, p_i \in P, i = \overline{1, n}$  - множество возможных вероятностей исходных событий предельных состояний СО,  $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}, z_i \in Z, i = \overline{1, n}$  - множество последствий (ущерба) от свершения  $i$ -тых исходных событий,  $t_i \in T$  - множество моментов времени,  $r_i \in R$  - множество возможных рисков

$$R = H\{P \times Z \times T\}, \quad (5)$$

где  $H$  - оператор, реализующий отображение  $\{P \times Z \times T\} \rightarrow R$ .

То есть

$$R(p, z, t) = H\{t, t_0, R_0(p_0, z_0, t_0), R(p, z]_{t_0}^t\}, \quad (6)$$

где  $t$  – текущий момент времени, в который определяется риск;  $t_0$  – начальный момент наблюдения за состоянием СО,  $t \geq t_0$ ;  $p_0, z_0, R_0$  – соответственно вероятность исходных состояний СО, ущерб и риск в начальный момент времени наблюдения.

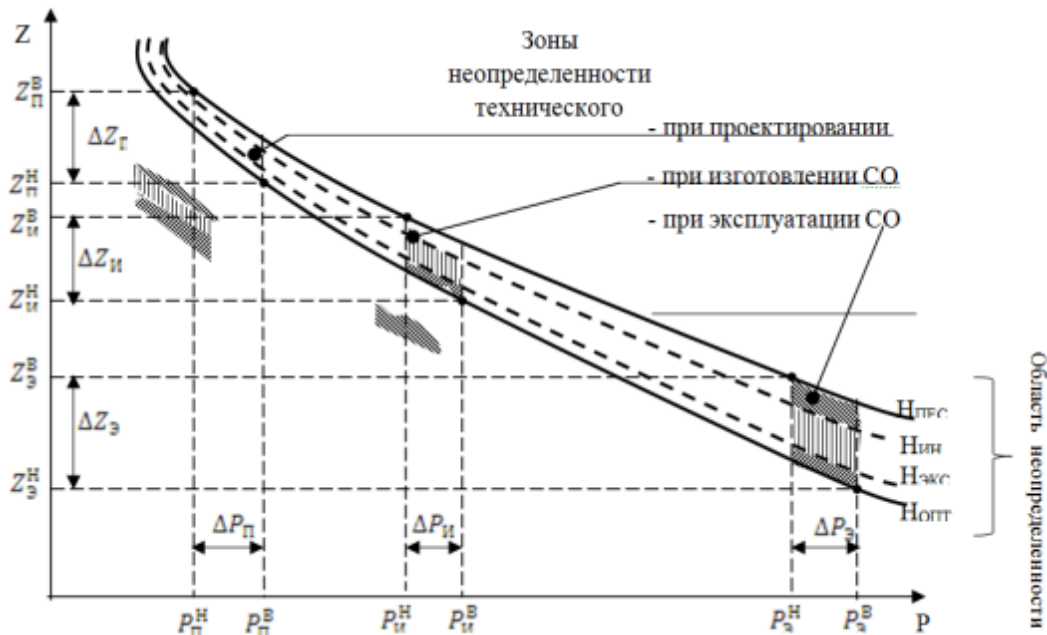
**5. Развитие диаграммы Фармера для оценки технического риска оборудования СО.** Классический подход к определению количественного значения  $R$  интерпретируется двухмерной кривой (диаграммой) Фармера [2, 5, 6, 7]. Если вероятность исходных событий  $P_i$  и ущерб  $Z_i$  являются независимыми случайными величинами, задаваемыми в общем случае своими законами распределения  $f_p(p/z_i)$  и  $f_z(z/p_i)$ , то  $R = H\{p, z\}$  и функция распределения риска  $F_R(\mu)$  имеет вид [6]:

$$F_R(\mu) = \iint_W f_p(p)f_z(z)dpdz, \quad (7)$$

где  $W$  – область определения, задаваемая как

$$W: \begin{cases} 0 \leq p \leq 1; \\ 0 \leq z \leq z_{max}. \end{cases}$$

Тогда может быть представлен набор (множество) кривых равного уровня риска (изориска), который зависит от функциональной структуры и взаимодействий элементов, блоков, устройств СО (т.е. характера внутренних связей), влияния факторов внешней среды, видов опасностей и угроз и др. [2, 11]. Поэтому имеет место определенный разброс кривых Фармера, который можно представить в виде области неопределенности, включающей кривые изориска при оптимистическом и пессимистическом прогнозе  $H_{ОПТ}$ ,  $H_{ПЕС}$ , а так же при интенсивном и экстенсивном характере уровня  $R$  -  $H_{ИНТ}$ ,  $H_{ЭКС}$ , что показано на рис. 2.



**Рис.2. Иллюстрация построения зон неопределенности технического риска СО**

Предложенная область неопределенности при рассмотрении совместно с полученными ранее диапазонами допустимых изменений вероятностей отказов, определенных на базе показателей ресурсоспособности СО, позволяет построить зоны неопределенности  $R$  при проектировании, изготовлении и

эксплуатации СО (рис. 2). Такой подход позволяет определить нижнюю и верхнюю границы ущерба от вероятностей предельного состояния СО  $Z_П^В$ ,  $Z_П^Н$ ,  $Z_И^В$ ,  $Z_И^Н$ ,  $Z_Э^В$ ,  $Z_Э^Н$  и диапазоны их допустимых изменений  $\Delta Z_П$ ,  $\Delta Z_И$ ,  $\Delta Z_Э$  для указанных этапов жизненного цикла оборудования СО. Характерно, что

указанные зоны неопределенности R состоят из определенных модулей, (показанных различной штриховкой на рис. 2) характеризующих характер поведения кривых изориска. Так как анализу R присуща значительная неопределенность [12], вызванная изменениями различных параметров и предположений, то применение таких модулей позволяет анализировать чувствительность риска в зависимости от уменьшений отдельных индивидуальных входных параметров [12]. Для такого анализа можно применять функции чувствительности  $S_p^R \cong Z \cdot \Delta R / \Delta P$ , количественная и качественная оценка которых может быть выполнена на основании исходных данных показанных на рис. 2. В результате применения предложенных зон неопределенности можно так же:

- идентифицировать значимость исходных данных;
- обеспечить полноту и достаточную точность анализа R CO.

#### 6. Разработка показателей качества проектирования технического риска CO

Оценивание и менеджмент R является неотъемлемой составляющей процессов разработки, изготовления и эксплуатации CO, включая технологии ресурсного проектирования [2]. При этом необходимо применение различных принципов и способов прогнозирования, сопровождаемое уровнем качества соответствующим требованию предельного состояния CO [13]. Поэтому необходимо рассмотрение определенного числа показателей качества прогнозирования R CO, учитывая предложенные подходы более полного оценивания их технического состояния.

1. Точность прогнозирования R характеризуется интервалом значений прогнозируемой величины (точность оценки) и вероятностью того, что именно в этот интервал попадает истинное значение прогнозируемой величины (достоверность оценки). Применение предложенных зон неопределенности (рис. 2) иллюстрирует возможности повышения данного показателя качества прогнозирования R

CO.

2. Информационный показатель качества прогнозирования R, указывает на сколько увеличивается информация об исследуемом CO в результате прогнозирования с помощью выражения

$$\frac{\sum_i (\mathcal{E}_{oi} - \mathcal{E}_i)}{\sum_i \mathcal{E}_{oi}}, \text{ где } \mathcal{E}_{oi} \text{ и } \mathcal{E}_i -$$

начальная и конечная энтропия по i-му параметру соответственно. При этом энтропия характеризует меру неопределенности состояния CO в виде выражения:  $-\sum_1^n p_i \log p_i$ , где  $p_i$  – вероятность возможного состояния CO, а n – число всех возможных состояний. Этот показатель в общем случае может учитывать полноту прогнозирования R, которая представляет собой отношение числа параметров охваченных контролем, к общему числу параметров, определяющих в данном случае, прежде всего ресурсоспособность [2], а не только работоспособность CO. В рамках рассматриваемого подхода оценивания R:

- применена система показателей ресурсоспособности CO, включая выбор определяющего из них;
- разработана модель динамики состояний ресурсоспособности, и прежде всего предотказных и предельных состояний CO;
- показана целесообразность учета пессимистического и оптимистического характера прогноза при рассмотрении кривых Фармера, что позволяет считать более полной количественную оценку данного показателя качества.

3. Показатель эффективности прогнозирования R показывающий на сколько улучшились эксплуатационные характеристики исследуемого CO в результате прогноза.

Результаты проведенного исследования показывают возможность повышения качества оценивания и прогнозирования R за счет более точной и достоверной оценки неопределенности и чувствительности, что позволяет считать такой подход более приемлемым при принятии решений о мониторинге и устойчивой долгосрочной эксплуатации оборудования CO

производственных систем и промышленных зон.

### 7. Выводы

1. Сформулировано дальнейшее развитие кривой Фармера для оценки технического риска оборудования СО;
2. Более полно, с помощью предложенных зон, определена область неопределенности при оценивании и прогнозировании безопасности оборудования СО;
3. Получены аналитические выражения для определения области допусков времени предельного состояния оборудования СО;
4. Показана возможность анализа чувствительности технического риска оборудования СО;
5. Научно обосновано повышение качества менеджмента технического риска при мониторинге и устойчивой эксплуатации СО.

### Conclusions

1. Formulated further development of the curve of the farmer to evaluate the technical risk of the equipment complex objects to more fully quantify the quality metric

prediction of technical risk;

2. More fully, with the help of the proposed zones, the range of uncertainty in the assessment and prediction of safety equipment complex objects and the expediency of considering the pessimistic and the optimistic nature of the forecast when considering curves farmer;

3. The analytical expressions to define the scope of the tolerance time limit condition of the equipment complex objects;

4. The possibility of sensitivity analysis technical risk equipment complex objects;

5. Scientifically proven improving the quality of management of technological risk monitoring and sustainable exploitation of complex objects, as the results of the study show the possibility of improving the quality of assessment and forecasting of the technical risk due to more accurate and reliable assessment of uncertainty and sensitivity that allows us to consider this approach more acceptable when making decisions about monitoring and sustainable long-term equipment operation of complex industrial systems and industrial zones.

**Литература:** 1 Копчинский Г.А. *Безопасность атомных станций. Чернобыль. В прошлом, настоящем и будущем* / Г.А. Копчинский, Н.А. Штейнберг. – К.: Основа – Принт, 2011. – 222 с. 2. Маловик К.М. *Развиток научных засад підвищення якості оцінювання та прогнозування ресурсних характеристик складних об'єктів: Автореф. дис...докт. техн. наук* / К.М. Маловик. – Львів, 2013. – 36 с. 3. РД 03-418-01. *Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов.* — Утвержд. Госгортехнадзором России Постановлением от 10.07.2001 № 30. — Срок введения в действие 1.10.2001. 4. Елисеева М.А., Маловик К.Н. *Особенности оценивания ресурсных характеристик методом гиперслучайных величин* // Проблемы розвитку та впровадження систем управління, стандартизації, сертифікації, метрології в регіонах України: Матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції 7 - 10 квітня 2014 року – Донецьк: ДонНТУ, 2014. – С. 31 – 36. 5. Вишняков Я.Д. *Общая теория рисков: учеб. пособие для студ. Высш. учеб. заведений* / Я.Д. Вишняков, Н.Н. Радаев. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 368 с. 6. Острейковский В.А. *Математическое моделирование техногенного риска от эксплуатации нефтегазового оборудования* / В.А. Острейковский // Вестник кибернетики. 2012. № 11. – С. 71 – 75. 7. Маловик К.Н. *Аналитическое прогнозирование времени предельного состояния сложных изделий* / К.Н. Маловик // Труды Одесского политех. ун-та. – Одесса: Опу, 2012. – № 2 (39). – С. 120 – 129. 8. Антонов А.В. *Статистические модели в теории надежности: учеб. пособие* / А.В. Антонов, Н.С. Никулин. – М.: Абрис, 2012. – 390 с. 9. Антонов А.В. *Интервальная оценка характеристик надежности уникального оборудования* / А.В. Антонов, К.Н. Маловик, И.А. Чумаков // Фундаментальные исследования: науч. журнал. – М.: Академия естествознания, 2011. – Ч. 1. – № 12. – С. 71 – 76. 10. ГОСТ Р 51901.1-2002 *Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.* 11. Елисеева М.А., Маловик К.Н. *Безопасность объектов критического применения. Развитие диаграммы Фармера* // Стандарты и качество. – 2013.- №7. – С. 40- 41. 12. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 *Менеджмент риска. Методы оценки риска.* 13. ГОСТ 27.202-83 *Надежность в технике. Технологические системы. Методы оценки надежности по параметрам качества изготавливаемой продукции.*