

УДК 621.039.5

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНСЕРВАТИВНОСТИ ОЦЕНОК ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ МАЛОЙ СТАТИСТИКЕ ПО ОТКАЗАМ

**Ю.В. Волков, Д.С. Самохин**

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



Разработан и продемонстрирован на данных по аварийным остановам реактора ВВР-ц метод анализа степени консервативности оценок показателей надежности и безопасности объектов ядерных технологий. Показаны возможности предложенного подхода при анализе статистических данных по отказам оборудования, в том числе и при малой статистике по отказам.

### ВВЕДЕНИЕ

При оценке показателей надежности и безопасности оборудования объектов ядерных технологий по эксплуатационным данным, среди прочих, часто возникают проблемы двух родов:

- 1) проблема малой статистики по отказам;
- 2) проблема выбора адекватных законов распределения изучаемых случайных величин.

**Суть первой проблемы.** Ввиду потенциальной опасности ядерных технологий все лица и организации, причастные к ним, принимают необходимые меры для того, чтобы обеспечить в максимальной степени уровни их надежности и безопасности. Поэтому крупные аварии и отказы оборудования с серьезными последствиями в ядерных технологиях крайне редки или не происходят вообще. С другой стороны, в отличие от массовых (например, компьютерных, авиационных) технологий, в ядерных технологиях в значительной мере используются единичные экземпляры оборудования, специально предназначенные для безотказного выполнения специфических для этого рода деятельности работы и/или технологических операций в течение длительного времени. *Например*, корпуса реакторов с водой под давлением, некоторые приводы органов СУЗ и другие изготавливаются в единичных экземплярах и предназначены для безотказного выполнения своих функций в течение десятков лет.

*Другой пример.* Операции по перегрузкам ТВС в ядерных реакторах проводятся со специальными мерами предосторожности, чтобы избежать различные потенциальные опасности, например, такие как падение ТВС в активную зону или хранилище, чрезмерные перекосы ТВС в направляющих в процессе движения и т.п. Хотя

эти операции, в принципе, носят массовый характер, тем не менее, реализации подобных опасностей, приведшие к повреждению ТВС, крайне редкие события.

*Третий пример.* В отличие от массовых перевозок обычных грузов (угля, нефти, строительных и других материалов) перевозки по железным дорогам контейнеров с ТВС между ЯЭУ и заводами по их изготовлению или переработке, а также единичных экземпляров космических ЯЭУ от места изготовления до полигона [1], являются уникальными операциями со специально принятыми мерами предосторожности, обеспечивающими в максимальной степени их безопасность и делающими транспортные аварии с такими объектами крайне маловероятными.

Поэтому при оценках количественных характеристик надежности и безопасности для ядерных технологий часто возникают ситуации, связанные с тем, что такие оценки необходимо проводить для уникальных объектов и операций, отказы и/или аварии которых происходили чрезвычайно редко, а зачастую статистика об их отказах и вовсе отсутствует или имеет нечеткий характер.

**Суть второй проблемы** подробно обсуждена в работе [2] и состоит в том, что для выбора адекватных законов распределения изучаемых случайных величин имеется не так много возможностей. Это связано с необходимостью, например, учитывать фактор регулирования параметров ЯЭУ с целью недопущения их выхода за уставки, или учитывать, что реальное время неотрицательно, а соответственно интервалы времени между отказами технических систем, как случайные величины, не могут принимать отрицательные значения с вероятностью единица и т.д.

В работах [1, 3, 4] предложена модель для анализа безаварийного опыта эксплуатации с использованием пуассоновского закона распределения. Здесь, в этой статье с использованием распределения Вейбулла эта модель развита для анализа степени консервативности получаемых оценок показателей надежности.

Поскольку распределение Вейбулла является распределением экстремального значения, т.е. минимальной случайной величины из очень большого (в пределе бесконечного) множества альтернатив, оно является подходящим для описания результатов эксплуатации объектов, со множеством возможных причин их отказов [2].

Плотность распределения Вейбулла для интервала времени  $t$  между двумя соседними случайными событиями имеет вид:

$$f(t) = \alpha \rho (pt)^{\alpha-1} \exp\{-(pt)^\alpha\}. \quad (1)$$

Заметим, что экспоненциальный закон распределения является частным случаем закона распределения Вейбулла при  $\alpha = 1$ .

Вероятность безотказной работы объекта в течение заданного времени  $t$  для распределения Вейбулла определяется формулой

$$P(t) = \exp\{-(pt)^\alpha\}. \quad (2)$$

Таким образом, распределение Вейбулла есть экспоненциальное распределение степенного преобразования времени  $\vartheta = t^\alpha$  с параметром  $\omega = \rho^\alpha$ .

Тогда распределение числа отказов  $k$  на интервале  $[0, \vartheta]$  имеет вид

$$P_s(k) = \frac{(\omega\vartheta)^k}{k!} \exp\{-\omega\vartheta\} \quad (3)$$

и является пуассоновским.

Примененные в работах [1, 3, 4] экспоненциальный и пуассоновский законы распределения случайных величин на реальной временной шкале  $[0, t]$  являются частными случаями (при  $\alpha = 1$ ) более общих законов (1) и (3). Следовательно, предположение об экспоненциальности закона распределения времени безотказной работы какого-либо объекта автоматически означает, что предполагается

$\alpha = 1$  в распределениях (1) и (3). Но в реальности это может быть не так. Например,  $\alpha$  может быть случайной величиной, принимающей значения в интервале  $(0, \infty)$ . Во всяком случае оценки  $\alpha$  по данным испытаний или эксплуатации объекта подвержены статистической изменчивости. Поэтому такое предположение требует дополнительных обоснований.

**Определение возможной статистической изменчивости параметра  $\alpha$  на примере анализа аварийных остановов реактора ВВР-ц.** Величину  $\alpha$  можно оценить, например, следующим образом. Предположим, что при эксплуатации до момента времени  $\tau < t_k$  отказов объекта не было, и первый отказ произошел в этот момент. Под  $t_k$  далее везде понимается некоторый фиксированный момент времени после отказа (это может быть текущий момент времени, или заданный пропорционально  $\tau$ , или момент времени следующего отказа). Тогда, задавая вероятность  $P_\alpha = 1 - u$  ( $u < 1$ ) недоверия к наблюдаемому результату, следует считать, что с вероятностью  $P_\alpha$  отказ объекта должен был произойти раньше момента времени  $\tau$ , но из-за статистической изменчивости данных «нам повезло». Принципиально важным моментом при определении параметров распределения Вейбулла, является определение меры недоверия  $u$ , к зафиксированному числу отказов. Вопрос о выборе величины  $u$  и смысле вероятности  $P_\alpha$  подробно обсужден в работах [1–4].

Имеем

$$e^{-(\rho \cdot \tau)^\alpha} = u, \quad (4)$$

далее следует допустить, что с той же вероятностью  $P_\alpha$  к моменту времени  $t_k$  должно было произойти не менее двух отказов, но нам «повезло». Тогда

$$P_{t_k}(0) + P_{t_k}(1) = \exp\{-(\rho \cdot t_k)^\alpha\} [1 + (\rho \cdot t_k)^\alpha] = u. \quad (5)$$

Введя обозначения  $y_1 = (\rho \cdot \tau)^\alpha$  и  $y_2 = (\rho \cdot t_k)^\alpha$ , при заданном значении  $u$  из (4) и (5) получим для  $y_1$  и  $y_2$  уравнения

$$\exp(-y_1) = u \quad (6)$$

и

$$(1 + y_2) \exp(-y_2) = u. \quad (7)$$

Зная корни уравнений (6), (7), можно (для  $y_1 \neq 1$  и  $y_2 \neq 1$ ) получить оценку  $\alpha$  как

$$\tilde{\alpha}(q) = \frac{\ln(y_2/y_1)}{\ln q}, \quad (8)$$

где

$$q = \frac{t_k}{\tau}. \quad (9)$$

Авторы располагают данными по аварийным остановам реакторной установки ВВР-ц, зафиксированным с момента ввода реактора ВВР-ц в эксплуатацию (25 марта 1965 г.) по 2004 г. включительно. За указанный промежуток времени наблюдалось 147 незапланированных остановов. Все они являлись следствием различных отказов и/или ошибок персонала [5]: отказы приборов, подсадки напряжения в электросети, ошибки персонала, неисправности экспериментальных устройств и т.д. Предварительный качественный анализ данных показал, что остановки ВВР-ц, произошедшие с интервалом времени менее одних суток, были следствием неполного устранения причины первоначального останова реактора. Отказы, явившиеся следствием неустранения или частичного устранения неисправности после предшествующего отказа, при обработке данных во внимание не принимались. Поэтому в выборке, подвергнутой обработке, остались 139 данных об отказах.

Оценку статистической изменчивости оценок  $\tilde{\alpha}$  предлагается провести следующим способом.

Допустим, отношение (9), входящее в формулу (8) для оценок  $\tilde{\alpha}$ , является случайной величиной. В работе [2] показано, что для аварийных остановов реактора ВВР-ц  $q$  есть отношение суммы двух одинаково экспоненциально распределенных случайных величин к одной из них. В этом случае плотность распределения  $q$  имеет вид:

$$f_q(q) = \begin{cases} \frac{C}{q^2} & q > 0 \\ 0 & q \leq 0 \end{cases}. \quad (10)$$

Согласно работе [6], зная плотность распределения  $q$ , можно по формуле

$$f_x(x) = f_q(x(q)) \left/ \left| \frac{dx(q)}{dq} \right| \right., \quad (11)$$

воспользовавшись преобразованием (8), найти плотность распределения оценки  $\tilde{\alpha}$  в виде

$$f_{\alpha}(\alpha) = \begin{cases} \frac{C}{\tilde{\alpha}^2} e^{-\frac{C}{\tilde{\alpha}}} & \tilde{\alpha} \geq 0 \\ 0 & \tilde{\alpha} < 0 \end{cases}, \quad (12)$$

где  $C = \ln(y_2/y_1)$  – параметр в формуле (8). Если обозначить

$$z = \frac{1}{\tilde{\alpha}}, \quad (13)$$

то в соответствии с формулой (11)

$$f_z(z) = \begin{cases} C e^{-Cz} & z \geq 0 \\ 0 & z < 0 \end{cases}, \quad (14)$$

т.е. случайная величина  $z$  распределена экспоненциально с параметром  $C$ . Тогда  $\ln f_z(z) = \ln C - Cz$  является линейной функцией  $z$ .

Составим по данным об аварийных остановах реактора ВВР-ц, аналогично работе [2], выборку отношений

$$q_i = \frac{t_{k,i}}{\tau_i} (i = \overline{1, 139}), \quad (15)$$

где  $t_{k,i} = \tau_i + \tau_{i+1}$ ,  $\tau_i$  – интервал времени между  $(i-1)$ -м и  $i$ -м аварийными остановами.

По каждому из 138 отношений вида (15) с помощью формул (8), (13) оценены 138 значений  $\tilde{\alpha}$  и  $z_i$ . По этим выборкам построены гистограммы оценок распределений случайной величины  $z$  для разного количества разрядов. Для удобства анализа на рис. 1–3 гистограммы показаны в полулогарифмическом масштабе, и поэтому точками приведены не значения частот попадания в разряды, а натуральные логарифмы от них. Сплошная прямая линия на всех рисунках подобранная по МНК теоретическая зависимость  $\ln f_z(z) = \ln C - Cz$ .

Теоретическое распределение (14) можно подбирать методом наименьших квадратов с проверкой его соответствия гистограммам по критерию  $\chi^2$  [7] при уровне значимости 0.05 следующими двумя способами:

1) считаем, что  $C$  известно, и, например, при  $u=0.05$  равно 0.46 (именно это значение принято при составлении выборок  $\tilde{\alpha}$  и  $z_i$ );

2) считаем, что  $C$  неизвестно и подлежит оценке.

Результаты расчетов вторым способом приведены в табл.1 и на рис. 1-3.

Таблица 1

**Результаты сравнения гистограмм оценок  
распределения случайной величины  $z$  с подобранным вторым  
способом теоретическим распределением  $f_z(z)$**

Число разрядов гистограммы	Оценка параметра $C$	Фактическая величина $\chi^2$	Критическое значение $\chi^2$
13	0,415	17,4	20,7
23	0,485	14,8	33
34	0,445	20,7	44

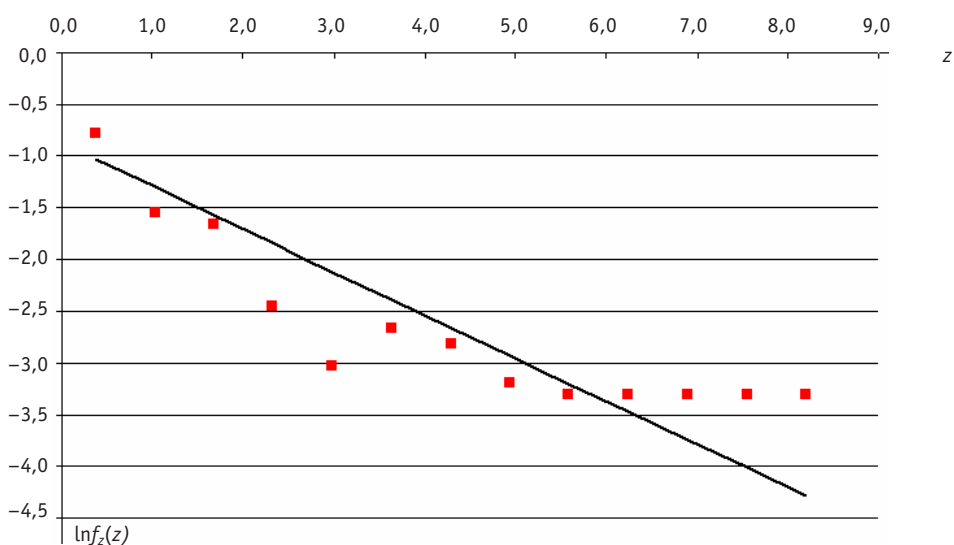


Рис.1. Сравнение гистограммы распределения случайной величины  $z$  с теоретической зависимостью (14) в полулогарифмическом масштабе при разбиении размаха выборки на 13 разрядов

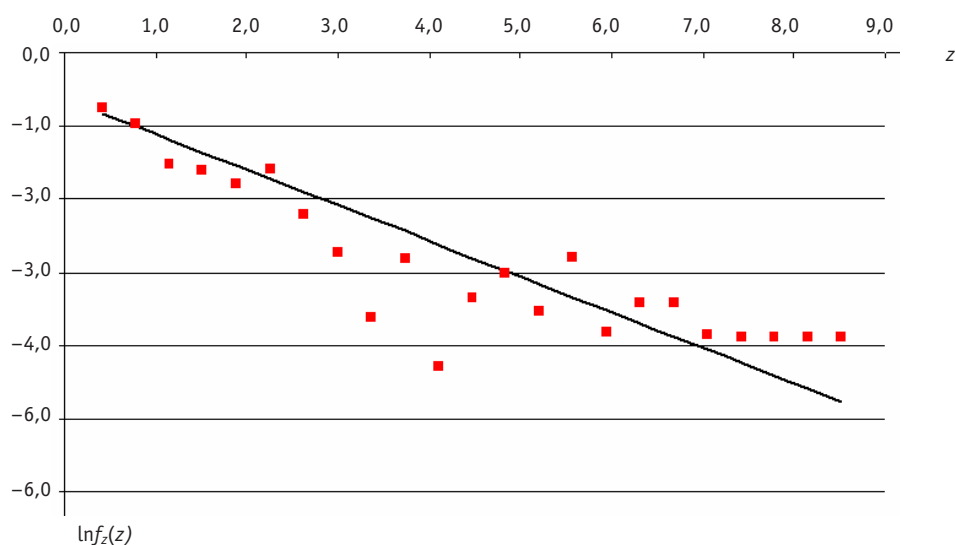


Рис. 2. Сравнение гистограммы распределения случайной величины  $z$  с теоретической зависимостью (14) в полулогарифмическом масштабе при разбиении размаха выборки на 23 разряда

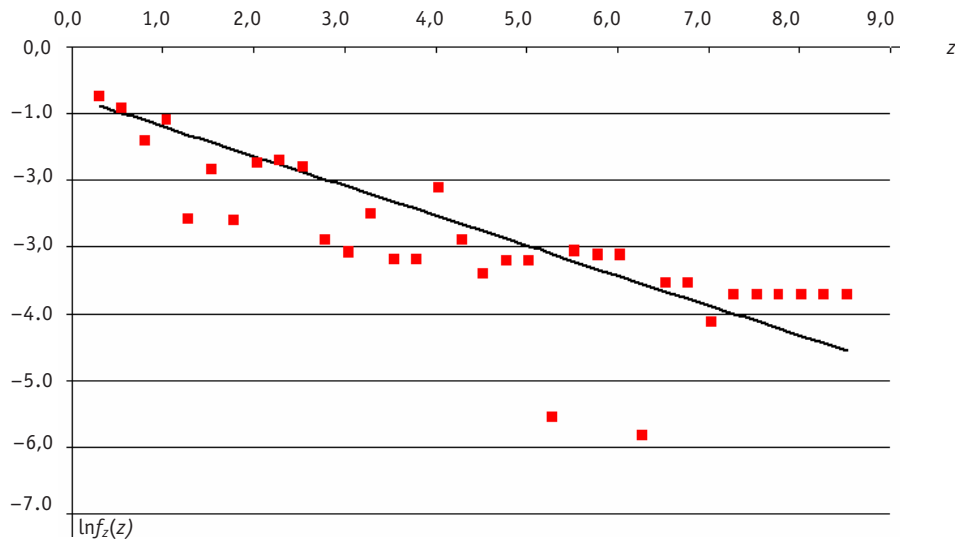


Рис. 3. Сравнение гистограммы распределения случайной величины  $z$  с теоретической зависимостью (14) в полулогарифмическом масштабе при разбиении размаха выборки на 34 разряда

*Выводы по результатам расчетов:*

1) гипотеза об экспоненциальности распределения случайной величины  $z$  не противоречит опытным данным при любом разбиении размаха выборки  $z_i$  (см. табл. 1, столбцы 3 и 4);

2) при подборе по МНК параметра  $C$  для распределения  $f_z(z)$  он в зависимости от разрядной сетки варьируется мало и близок к заданному значению  $C = 0.46$  (см. 2 столбец табл. 1).

### ОЦЕНКА КОНСЕРВАТИВНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРА ПОТОКА ОТКАЗОВ ПРИ МАЛОЙ СТАТИСТИКЕ ПО ОТКАЗАМ НА ПРИМЕРЕ АВАРИЙНЫХ ОСТАНОВОВ РЕАКТОРА ВВР-ц

Уравнения (6) и (7) имеют обобщение на случай произвольного числа  $m$  наблюдаемых отказов:

$$e^{-y_m} \sum_{k=1}^m \frac{y_m^{k-1}}{(k-1)!} = u. \quad (16)$$

На рис. 4 приведены зависимости  $y_m = f(m)$  при различных  $u$ . Видно, что при  $u = 0.5$ ,  $y_m < m$  для всех  $m$ . Однако с ростом  $m$  относительное отличие  $y_m$  и  $m$  уменьшается. Например,  $\frac{|y_m - m|}{m} = 0.307$  при  $m=1$ , и  $\frac{|y_m - m|}{m} = 0.055$  при  $m=6$ . Поскольку по определению при  $\alpha = 1$  имеет место равенство  $y_m = \rho \cdot t$ , то в этом случае оценка параметра потока отказов как среднеарифметического числа отказов в единицу времени

$$\tilde{\rho} = \frac{m}{t} \quad (17)$$

более консервативна, чем средневзвешенная оценка

$$\tilde{\rho} = \frac{y_m}{t}. \quad (18)$$

Понятно, что это не так при  $u \ll 0.5$  (см. зависимость 2 на рис.4.).

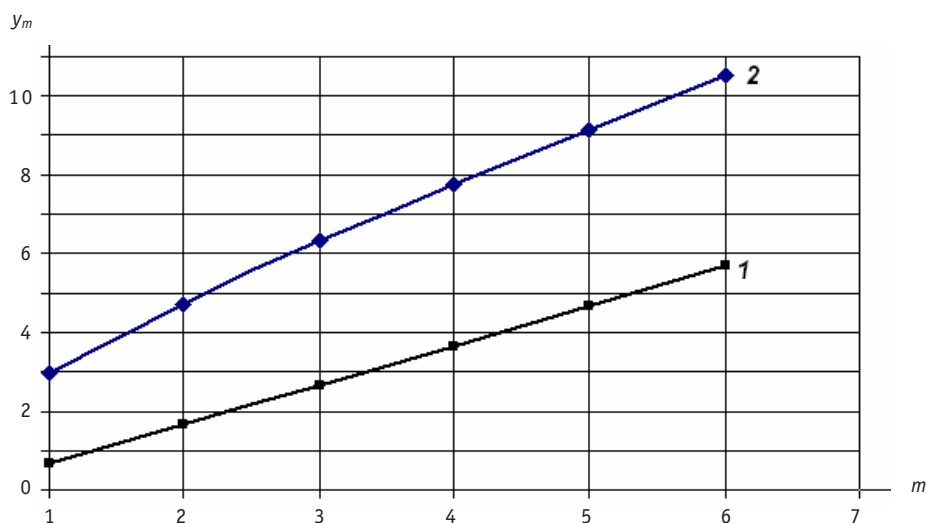


Рис.4. Зависимости корней  $y_m$  уравнения (16) от фактического числа  $m$  наблюдаемых отказов: 1 – при  $u=0.5$ , 2 – при  $u=0.05$

Согласно работе [2], за время  $t=14331$  сут эксплуатации реактора ВВР-ц произошло  $m=139$  аварийных остановов. В соответствии с формулой (17), в этом случае  $\tilde{p} \approx 0.0097$  1/сут.

Допустим, для какого-то объекта имеется оценка  $\tilde{p}$ . Обозначим  $\vartheta = \tilde{p} \cdot t$ . Тогда формула (2) может быть переписана в виде

$$P(\vartheta) = \exp\{-\vartheta^\alpha\}. \quad (19)$$

На рис. 5 приведены зависимости  $P(\vartheta)$  при различных значениях  $\alpha$ . Видим, что при  $\vartheta < 1$  оценки для  $\alpha < 1$  более консервативны, а для  $\alpha > 1$  более оптимистичны, чем для  $\alpha = 1$ . При  $\vartheta > 1$  все наоборот.

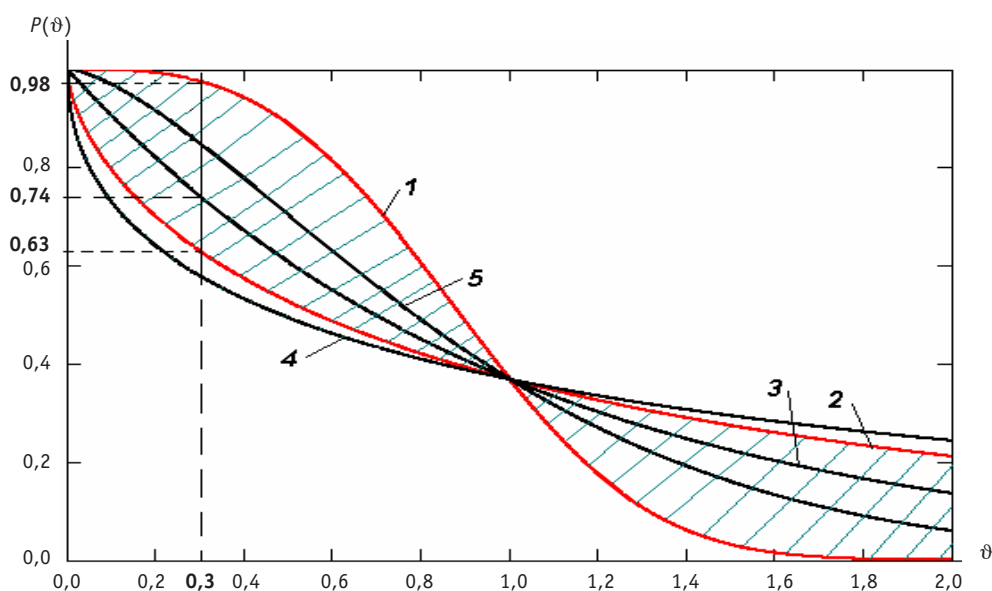


Рис. 5. Зависимость  $P(\vartheta)$ : 1 – при  $\alpha = 3.07$ , 2 – при  $\alpha = 0.638$ , 3 – при  $\alpha = 1$ , 4 – при  $\alpha = 0.5$ , 5 – при  $\alpha = 1.5$

Выше определено, что  $\alpha$  может быть случайной величиной с законом распределения вида (12). Тогда можно оценить интервал значений, в который попадает

$\alpha$  с заданной вероятностью  $u_\alpha = \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} f_\alpha(\alpha) d\alpha$ . Таким образом можно определить ин-

тервал значений, внутри которого с вероятностью  $u_\alpha$  будет лежать вероятность безотказной работы объекта, в случае, если есть сомнения в «чистой» экспоненциальности распределения времени до отказа, т.е. есть основания полагать многоканальную природу повреждения объекта. Например, на рис. 5 заштрихована область, где с вероятностью  $u_\alpha = 0.5$  лежат значения вероятности того, что аварийного останова реактора ВВР-ц не будет к моменту времени  $t = \vartheta/\tilde{\rho}$ . В частности, можно прогнозировать (см. вертикальную линию на рис. 5), что ближайший останов произойдет не раньше, чем через месяц с вероятностью 0.74, которая лежит между «оптимистичной» величиной 0.98 и «пессимистичной» величиной 0.63.

Оптимизму оценок по формуле (19) при  $\vartheta < 1$  и  $\alpha > 1$  можно дать такую интерпретацию. Если отказ объекта произошел в момент времени  $\tau$ , т.е. в интервале времени  $[0, \tau)$  он отработал безотказно, то оценки вероятности безотказной работы объекта после восстановления работоспособности, на предстоящий период времени  $t < \tau$  при  $\alpha > 1$  отражают надежду, что и в следующий раз, скорее всего, отказ произойдет не ранее времени  $\tau$  после ремонта.

Пессимизм оценок по формуле (19) при  $\vartheta < 1$  и  $\alpha < 1$  также может быть проинтерпретирован: если отказ все же произошел, то даже при полном его устранении «ничего хорошего ждать не приходится» и его снова надо ждать в ближайшее время.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены метод статистического анализа данных по отказам оборудования объектов ядерных технологий, а также метод оценки и обеспечения консервативности результатов расчета параметра потока отказов при малой статистике по отказам. Они позволяют оценивать интервалы значений для вероятностных характеристик надежности оборудования, в которые эти характеристики могут попадать, если предположение об экспоненциальной надежности оборудования подвергается сомнению.

## Литература

1. Волков Ю.В., Макаренков Ю.Д., Пупко В.Я. Вероятностный анализ перевозок космических ЯЭУ по железным дорогам // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1993. – №2.
2. Волков Ю.В., Самохин Д.С. Методы определения вида и параметров распределений случайных величин или процессов по эксплуатационным данным ЯЭУ // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №4.
3. Волков Ю.В. Теоретико-расчетные модели для оценок и обеспечения надежности и безопасности реакторных установок // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1995. – №6.
4. Волков Ю.В. Надежность и безопасность ЯЭУ: Учебное пособие. – Обнинск: ИАТЭ, 1997.
5. Волков Ю.В., Кочнов О.Ю. Анализ данных по срабатыванию АЗ реактора ВВР-ц // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2002. – №2.
6. Розанов Ю.А. Случайные процессы: краткий курс. – М.: Наука, 1971.

Поступила в редакцию 3.10.2007



## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.58

*Methodology of Erosion-Corrosion Wear Prediction by Neuron Net Modeling* \ V.I. Baranenko, O.M. Gulina, D.A. Dokukin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 6 pages, 1 table, 3 illustrations. – References – 5 titles.

There is discussed the problem of ECW in NPP equipment, also the classification of prediction models is performed. The methodology of NPP equipment ECW prediction by using of neuron net models is observed.

### УДК 621.039.5

*The Conservatism Estimations Providing of Reliability of Nuclear Technologies Objects Including Low Statistics of Failures* \ Y.V. Volkov, D.S. Samohin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 1 table, 5 illustrations. – References – 7 titles.

The method of the analysis of a degree of the conservatism estimations of reliability and safety parameters of nuclear technologies objects is developed and shown on data of reactor VVR-C emergency shutdowns. Opportunities of the offered approach are shown by the analysis of statistical data on failures of the equipment, including low statistics of failures.

### УДК 621.039.564

*Automatic Complex Control System of Condition of Technological Channels of the RBMK-1000 Reactor* \ A.I. Trofimov, A.V. Nahabov, M.G. Kalenishin, S.I. Minin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 6 pages, 5 illustrations. – References – 2 titles.

The results of development the algorithm and software for the complex control system have been shown in the article. The system allows to control diameter, linearity and thickness of technological channels. Also defects of a channel's metal are detected by the system.

### УДК 519.7:574

*Analyze of the Distribution Functions Soils Biological Activity in Technogenic Contaminated Areas* \ N. Pavlova, V. Romancov, E. Sarapul'seva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 3 illustrations. – References – 13 titles.

In this work a lot of biological activity parameters have been analyzed. The results were processed statistically. This work demonstrates that CO<sub>2</sub> flux, metanogenic and denitrified activities of soil microorganisms are statistically significant for biological analysis of technogenic contaminated areas.

### УДК 621.039.5

*Georeactor in Bowels of the Earth* \ A.A. Bezborodov, N.V. Gusev, I.R. Suslov, V.I. Folomeev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 11 pages, 4 illustrations, 3 tables. – References – 40 titles.

The possibility of long proceeding of nuclear fission chain reactions in Earth's bowels during 4 gygarears up to date is researched. Natural fast breeder in state of "lakes" may have been formed in settling down of uranium oxides or uranium carbides from liquid layer onto a solid Earth's core. Mechanism of uranium concentration at the Earth's core have been given. Corresponding experiments have carried out. In this layer chain nuclear reaction could occurred with new fissile nuclides breeding. Neutron physics performance data of the georeactor have been calculated. It is possible that it takes place pulse mode operation haw it was in case of natural nuclear reactor in Oklo (Gaboon). International set neutrino detectors are available to detect georeactor characteristics.