

# РАСЧЕТ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ

**О.М. Гулина, Н.Л. Сальников**

*Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск*



Разработан метод нелинейного суммирования повреждений для расчета ресурсных характеристик оборудования, работающего в условиях коррозионной среды и смены режимов эксплуатации. Введен параметр, характеризующий процесс деградации материала в данных условиях, и получено уравнение для оценки этого параметра. При решении задачи используется статистика об отказах оборудования и зависимость времени до разрушения от параметров среды и характеристик материала.

Старение материала вследствие различных причин является основным фактором, вызывающим отказ тепломеханического оборудования. В зависимости от типа оборудования, материала и характеристик эксплуатации существуют различные механизмы деградации: рост трещин, коррозионное растрескивание, эрозивно-коррозионный износ и др. Как правило, процессы, приводящие к постепенному отказу оборудования, связаны с накоплением повреждений в его материале. Вследствие случайного характера действующих факторов: свойств материала, характеристик эксплуатации и среды, процесс накопления повреждений (ПНП) является вероятностным по своей сути. Однако характер самого процесса ПНП в значительной степени зависит от характеристик материала оборудования, геометрических параметров и условий эксплуатации, определяющих процесс деградации материала. Поскольку накопленное повреждение не является измеряемой величиной, остается актуальной задача прогнозирования ресурсных характеристик оборудования на основе измеряемых характеристик эксплуатации.

Известно, что квазистатические повреждения от длительного действия медленно меняющихся напряжений и температуры при стабильном поведении материала могут быть определены из хорошо проверенного экспериментально условия линейного суммирования

$$\omega(t) = \int_0^t \frac{ds}{\tau}, \quad (1)$$

где  $\tau$  - время до разрушения при нагружении постоянным напряжением  $\sigma$ . Или

$$\omega(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (2)$$

при работе на нескольких режимах, где  $n$  - число режимов к моменту времени  $t$ . Это соотношение следует считать справедливым для элементов, толщина которых достаточно велика. Для тонкостенных конструкций накопление повреждений оказывается нелинейным даже при медленно меняющихся напряжениях и температуре [1, 2].

Оценка работоспособности в случае нелинейного суммирования повреждений может быть проведена с позиций общего феноменологического подхода к проблеме разрушения конструкционных материалов.

Предположим, что скорость накопления повреждений в элементе однозначно определяется приложенным эквивалентным напряжением  $\sigma_3$ , температурой  $T$  и уровнем накопленных повреждений  $\omega$  при данном структурном состоянии материала. Тогда для функции повреждаемости можно записать обобщенное кинетическое уравнение [1]

$$d\omega/dt=f(\sigma_3, T) \cdot \exp(a\omega), \omega(0)=0, \omega(\tau)=1. \quad (3)$$

Разделяя переменные и интегрируя с использованием условий (3),

$$\omega(t) = -\frac{1}{a} \ln \left[ 1 - (1 - e^{-a}) \int_0^t \frac{ds}{\tau} \right], \quad (4)$$

где  $a$  - параметр, характерный для данного материала, определяющий процесс старения материала в данных условиях. При  $a=0$  имеем линейное суммирование повреждений, при  $a>0$  - нелинейное.

При работе на нескольких режимах (разные  $\tau_i$ , формула (2)) условие работоспособности будет выглядеть следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = -\frac{1}{a} \ln \prod_{i=1}^n \left[ 1 - (1 - e^{-a}) \frac{\Delta t_i}{\tau_i} \right] < 1, \text{ или } \prod_{i=1}^n \left[ 1 - (1 - e^{-a}) \frac{\Delta t_i}{\tau_i} \right] > e^{-a}. \quad (5)$$

Воспользуемся аналитическим методом оценки вероятности безотказной работы [4]:

$$P(\eta > t) = P(\omega(t) < 1) = P \left( \frac{\omega(t) - \sum_{i=1}^n \omega_i}{\sqrt{D_\Sigma}} < u \right) = 1 - \bar{\Phi}(u), \quad (6)$$

где  $u = \frac{1 - \sum_{i=1}^n M\omega_i}{\sqrt{D_\Sigma}}$ ,  $D_\Sigma = \sum_{i=1}^n D(\omega_i)$  - дисперсия ПНП,  $M$  - знак математического ожидания,

ния,  $\bar{\Phi}(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_u^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$  - необходимо оценить характеристики распределения  $\omega_i$ . Здесь следует отметить, что микроповреждение  $\omega_i$  определяется процессом деградации в материале объекта и зависит от условий эксплуатации и свойств материала. Эта зависимость входит в  $\omega_i$  через  $\tau_i$ , которая является функцией таких измеряемых параметров среды как, например, концентрации хлор-иона и кислорода, температуры и т.д. Чтобы найти математическое ожидание микроповреждения  $\omega_i$ , разложим (4) в ряд, тогда

$$M\omega_i = k/a(M1/\tau_i + k/2 * M1/\tau_i^2 + k^2/3 * M1/\tau_i^3), \quad (7)$$

где  $k=(1-e^{-a})\Delta t$ ,  $M$ - знак математического ожидания, остальные члены ряда отброшены ввиду порядка малости  $\sim 10^{-8}$

$$M\omega_i^2 = (k/a)^2 (M1/\tau_i^2 + kM1/\tau_i^3), D\omega_i = M\omega_i^2 - (M\omega_i)^2.$$

$M1/\tau_i$ ,  $M1/\tau_i^2$ ,  $M1/\tau_i^3$  определяются через распределения входящих в  $\tau_i$  параметров. Тогда теоретическая вероятность безотказной работы 1-  $\Phi(u)$  является функцией параметра  $a$ . Чтобы оценить этот параметр, необходимо иметь хотя бы одну экспериментальную оценку вероятности безотказной работы или вероятности отказа  $\beta$ .

Тогда из  $1-\Phi(u)=1-\beta$  следует  $\Phi(u)=\beta$ , или

$$u(a)=u_\beta, \quad (8)$$

где  $u_\beta$  - квантиль нормального распределения. Из решения этого трансцендентного уравнения найдем значение  $a$ .

Рассмотрим применение данного метода на примере оценки надежности трубок парогенератора, работоспособное состояние которых определяется таким процессом деградации как коррозионное растрескивание под напряжением. Время до разрушения  $t$  зависит от характеристик материала, концентраций хлор-иона и кислорода, а также действующего эквивалентного напряжения.

Например, для трубок ПГ ВВЭР-1000 информация о заглушенных трубках представляется в виде статистики о заглушенных трубках, например, [4] (табл.1).

Таблица 1

**Данные по эксплуатации ПГ на начальном этапе [5]**

Номер месяца эксплуатации	Количество заглушенных труб в месяце, шт.	Границы ДИ (95%) для оценки вероятности отказа
20	4	$(1.93 \cdot 10^{-4}, 6.71 \cdot 10^{-4})$
25	45	$(0.0038, 0.0054)$
32	42	$(0.00725, 0.00945)$
42	1	$(0.0074, 0.0096)$

Поскольку число трубок очень большое, то частоту отказов можно принять в качестве оценки вероятности отказа в некоторый момент времени с  $\gamma$ -процентным доверительным интервалом (ДИ) этой оценки. Тогда можно подобрать такое " $a$ ", чтобы теоретический прогноз проходил внутри этого интервала, т.е. для любого момента времени имеем интервал значений параметра  $a$  ( $a_{jL}$ ,  $a_{jU}$ ), обусловленный границами доверительного интервала. Здесь  $a_{jL}$  - нижняя граница интервала для  $a$ ,  $a_{jU}$  - верхняя граница. Если известна статистика по отказам, относящаяся к различным моментам времени  $t_j$ , то прогноз должен пройти через ДИ всех оценок. Другими словами, параметр  $a$  должен принадлежать пересечению возможных интервалов значений  $a \in \bigcap_j (a_{jL}, a_{jU})$  для

всех моментов времени  $t_j$ , для которых известна оценка вероятности отказа. На рис.1 показана эта ситуация.

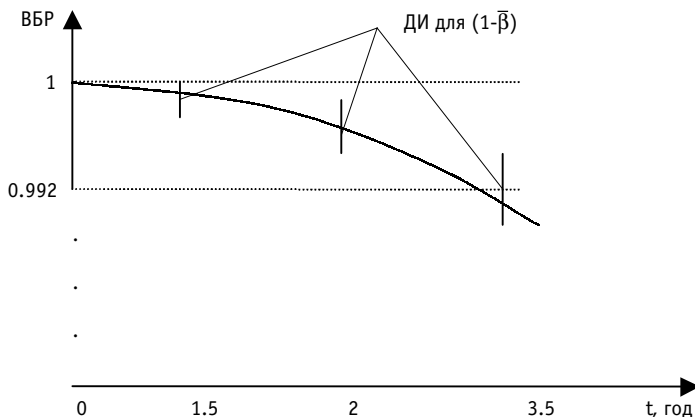


Рис.1. Доверительные интервалы для  $(1-\beta)$  и ВБР с параметром  $a$

Обозначим через  $n$  общее число трубок в ПГ. Тогда оценку вероятности отказа можно выразить через функцию числа заглушенных трубок  $\mu = \sum p_j$  к моменту времени  $t$  и общее число трубок  $n$  как  $\bar{\beta} = \mu / n$  - это среднее значение.

ДИ для оценки вероятности отказа можно построить следующим образом. Известно, что

$$\frac{\frac{\mu}{n} - \beta}{\sqrt{\frac{\beta(1-\beta)}{n}}} \approx N(0,1), \quad P\left(\left|\frac{\mu/n - \beta}{\sqrt{\beta(1-\beta)/n}}\right| \leq u_{\alpha/2}\right) \approx 1 - \alpha,$$

$$P\left(\frac{(\mu/n - \beta)^2}{\beta(1-\beta)/n} \leq u_{\alpha/2}^2\right) \approx 1 - \alpha.$$

Обозначим  $u_{\alpha/2}^2 = b^2$ , тогда  $\left(\beta - \frac{\mu}{n}\right)^2 \leq \frac{\beta(1-\beta)}{n} b^2$ , решение квадратного уравнения дает следующие границы для оценки  $\beta$

$$\beta_L = \frac{2\mu/n + b^2/n - b\sqrt{(b^2/n + 4\mu/n(1-\mu/n))/n}}{2(1+b^2/n)}, \quad (9)$$

$$\beta_U = \frac{2\mu/n + b^2/n + b\sqrt{(b^2/n + 4\mu/n(1-\mu/n))/n}}{2(1+b^2/n)},$$

Принимая во внимание нижнюю и верхнюю оценки  $\beta_L$  и  $\beta_U$  вероятности отказа  $\beta$ , получим (после решения уравнения (8)) границы интервала для  $\beta$ . На рис.2 показана вероятность безотказной работы (ВБР), соответствующая рассмотренному примеру. Границы 95-процентного доверительного интервала для  $\beta$  приведены в табл.1.

Таким образом, предложенный в данной работе метод нелинейного суммирования повреждений (NDA) позволяет оценить ресурсные характеристики оборудования в условиях, когда применение линейного суммирования дает завышенные значения ресурса.

Предложенный метод адаптации модели NDA к конкретному оборудованию и условиям эксплуатации основан на использовании имеющихся эксперименталь-

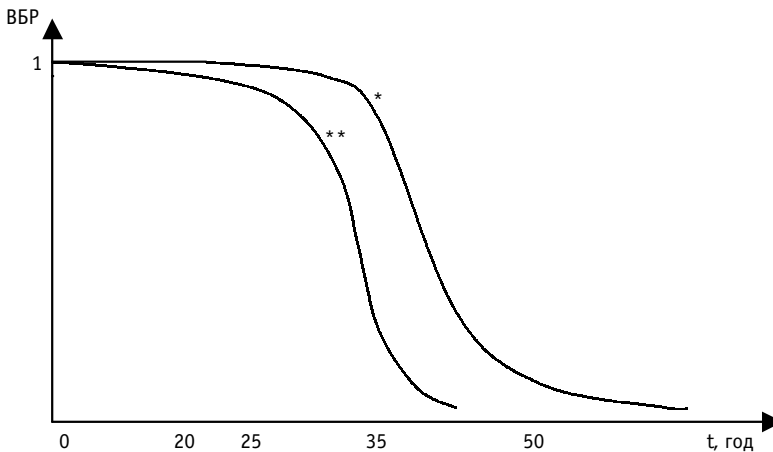


Рис.2. Зависимость ВБР от времени: \* - линейное суммирование повреждений; \*\* - нелинейное суммирование повреждений

ных данных по отказам, а также зависимости времени до разрушения от параметров среды и характеристик материала для оценки параметра уравнения накопления повреждений.

В случае, когда число режимов нагружения достаточно велико (хотя бы >20), для метода NDA разработан аналитический метод расчета ВБР оборудования, использующий асимптотику ЦПТ.

### **Список литературы**

1. Лихачев Ю.И., Пупко В.Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. - М.: Атомиздат, 1975.
2. Шубенко – Шубин Л.А., Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Кинетическая модель процесса и оценка инкубационного периода разрушения материалов, подвергаемых воздействию капельных потоков // Теплоэнергетика. – 1987. – № 2. – С. 46 – 50.
3. Егишянц С.А., Гулина О.М., Коновалов Э.Н. Оценка распределения ресурса при суммировании повреждений // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1997. - № 1. - С. 18-21.
4. Рассохин Н.Г., Горбатов В.П., Середа Е.В., Баканов А.А. Прогнозирование ресурса теплоэнергетического оборудования по условиям коррозионного растрескивания // Теплоэнергетика. - 1992. - № 5. - С. 53-58.

Поступила в редакцию 13.11.99.

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.566

*Calculation of the Resource Performances of Equipment under Nonlinear Effects of Degradation Processes* \ O.M. Gulina, N.L. Sal'nikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 5 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 4 titles.

The method of nonlinear summation of damages for calculation of the resource performances of equipment working under corrosion and the change of modes of operation conditions is developed. Parameter describing the process of degradation of a material under these conditions is introduced, and the equation for estimation of this parameter is obtained. For the solution of the problem the statistics on failures of equipment and the dependence of time before failure from parameters of medium and performances of a material is utilized.

### УДК 620.179.16

*Ultrasonic Method of Control of Stressed State of a Metal for Technological Channels of RBMK-type Nuclear Reactors on the Basis of Acousto-elasticity Effect* \ M.A. Trofimov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 6 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 9 titles.

The analysis of theoretical investigations devoted to the acoustic elasticity effect is carried out. Modules of the second and the third order and their quantitative assessments are considered. On the basis of the analysis results the theoretical basing of the control method of stressed state for the metal of technological channels of RBMK-type nuclear reactors is proposed.

### УДК 62-762.6: 62-13.621.318

*Magnetic End Sealing* \ Jan Fidler; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 4 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, titles.

End sealing of rotated heat installations, such as steam turbines, used both for classical heat power stations and for NPPs are very important from the point of view of providing the tight and reliability of equipment. To secure the sealing between the rotors are usually used the labyrinth noncontact sealings. Besides the classical noncontact and contact sealings tested by long-lived operational experience, the magnetic end sealings with the powder seal have been developed. However, the field of their applicability is restricted. The opportunities of usage this sealings are discussed in the paper.

### УДК 620.179.1: 621.039.004.58

*Calculation of Optimal Travel Velocity of a Transducer during Nondestructive Control of NPP's Lengthy Objects* \ V.V. Chegodaev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 3 pages, 1 illustration. – References, 3 titles.

The calculation of optimum velocity based on the main criteria of optimization of travel velocity of a transducer (in particular minimization of the control time and parameters of minimal defects) are given. The basing of the calculation using the V.A. Kotelnikov theorem is given. The expression for evaluation of the maximal travel velocity of the transducer is obtained and the example of calculation is given.

### УДК 621.039.526

*Optimization of the Characteristics of Inherent Self-Protection of Fast Reactors Cooled Potassium-Heavy Metal Alloys* \ A.M. Kuzmin, V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 9 pages, 5 tables. – References, 5 titles.

Some optimal inherent safety characteristics of LMFRs cores cooled with K-Pb and K-Bi alloys are analysed and presented in this paper. The core concept is based on the BN-800