

## МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ АС

**О.М. Гулина, Н.Л. Сальников**

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



Показано, что задача прогнозирования ресурса тепломеханического оборудования сводится к задаче достижения предельного уровня случайным наблюдаемым или расчетным параметром. Рассмотрены подходы к решению этой задачи в зависимости от типа процесса и качества информации. Приведены примеры расчетов.

### ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование ресурсных характеристик оборудования, подверженного процессам деградации, основано на вычислении момента нарушения критериев предельного состояния: это либо выход наблюдаемого параметра за границы поля допуска, либо выход процесса повреждения (необязательно наблюдаемого) за допустимую границу. Математически задача состоит в оценке момента первого выхода случайного процесса за предельно допустимый уровень. В зависимости от вида элемента и преобладающего процесса старения для решения такого рода задачи используются разные математические модели.

Целью данной работы является обзор основных математических задач, к которым приводит прогнозирование ресурса элементов и способов их решения.

К настоящему времени сформировались основные подходы к прогнозированию ресурсных характеристик элементов АС в зависимости от их важности с точки зрения безопасности или с экономической точки зрения. Одним из таких элементов является, в частности, парогенератор, а также другое оборудование конденсатно-питательного тракта АС. И основной задачей при прогнозировании ресурса становятся построение математических моделей процессов изменения параметров, определяющих работоспособное состояние элементов, и оценка оптимального периода профилактики.

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Эксплуатация теплообменного оборудования второго контура АС сопровождается процессом активного эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ). На всех АЭС в периоды останова блоков в течение всего времени эксплуатации ведется контроль толщины стенок трубопроводов методом ультразвуковой толщинометрии. Результаты этого контроля фиксируются в протоколах или заключениях об ультразвуковом замере толщин (табл. 1). Изменение толщины стенок (как в сторону увеличения, так и уменьшения) позволяет использовать результаты теории диффузион-

Таблица 1

**Результаты контроля**

Объект контроля	Полоса	Места контроля толщины по сечениям, мм*					
		А	Б	В	Г	Д	Е
Трубопровод питательной воды. Отвод. Ст20. Ø426×24	1	26,5	26,2	26,0	26,0	25,5	24,8
	2	22,6	22,9	23,1	23,4	23,0	22,9
	3	23,0	23,4	23,5	22,9	22,3	22,6

\* – разрешающая способность 0.1 мм

ных процессов для вычисления момента первого выхода за допустимый уровень, которым в данном случае является допустимая остаточная толщина стенки  $s$ , рассчитываемая по условиям прочности.

Представление параметра «толщина стенки»  $\xi(t)$  диффузионным процессом позволяет записать его дифференциал в виде

$$d\xi(t) = a(t, x) dt + b(t, x) dw(t).$$

Разработанные на основе этой теории модели можно результативно применять для исследования характера ЭКИ трубопроводов, степени их утонения, а также прогнозирования их ресурсных характеристик. На рис. 1 приведен средний тренд и верхняя и нижняя границы доверительного интервала для процесса изменения толщины стенки трубопровода 426×24 мм в зависимости от времени.



Рис. 1. Процесс изменения толщины стенки

Еще один пример использования диффузионных процессов – оценка периода проведения отмывок поверхности теплообменного оборудования от загрязнений для уменьшения интенсивности процессов местной коррозии.

Поступление продуктов коррозии конструкционных материалов и коррозионно-агрессивных примесей в парогенератор (ПГ) с последующим их осаждением на теплообменной поверхности трубного пучка является одной из наиболее актуальных проблем эксплуатации АС с ВВЭР. Работоспособность ПГ определяется целостностью теплообменных трубок (ТОТ). Опыт эксплуатации ПГ показывает, что большинство дефектов образуется под слоем шлама и коррозионных отложений на поверхности трубчатки. Рост средней удельной загрязненности на поверхности теплообменных трубок (ТОТ) ПГ показан на рис. 2.

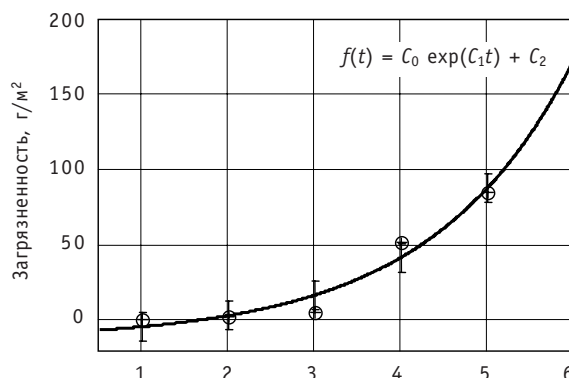


Рис. 2. Аппроксимация загрязненности для одного из ПГ КЛНАЭС

Для новых ПГ допустимый уровень загрязненности трубного пучка принят  $150 \text{ г/м}^2$ , а для ПГ со сроком службы более 30 лет –  $100 \text{ г/м}^2$ . Это значение можно использовать как уровень недопустимой загрязненности при индивидуальном прогнозировании роста загрязненности ТОТ в ПГ.

В качестве времени до очередной отмывки следует принять момент первого достижения предельного уровня  $d$  процессом роста загрязненности [1]. Фрагмент расчетных данных при различных уровнях остаточной загрязненности  $\eta$  для ПГ приведен в табл. 2, рис. 2.

Таблица 2

**Значения межпромывочного периода  
при различных значениях остаточной  
загрязненности**

Начальное значение $\eta$ , $\text{г/м}^2$	Допустимый уровень $d$ , $\text{г/м}^2$	Межпромывочный период, тыс. ч
10	150	26,3
20	150	22,4
50	150	13,3
70	150	9,4

## МЕТОДЫ СУММИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Прогнозирование ресурсных характеристик элементов в условиях линейных и нелинейных эффектов деградации, особенно в условиях коррозионной среды и смены режимов эксплуатации, является весьма актуальным. Использование методов суммирования повреждений для оценки технического состояния и прогнозирования ресурса, в отличие от статистического подхода, позволяет учитывать изменяющиеся условия эксплуатации и в этом плане управлять ресурсом рассматриваемого элемента. Для теплообменных трубок ПГ основным процессом деградации является процесс коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), причем интенсивность этого процесса очень сильно зависит от концентрации примесей в продувочной воде, особенно от концентраций хлор-иона и кислорода.

Зависимость времени до разрушения от концентраций хлор-иона и кислорода в среде приближенно можно оценить по формуле

$$\lg \tau = K - 0.5 \lg C_{\text{O}_2} - 1.5 \lg C_{\text{Cl}^-}, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от толщины стенки, напряжения, свойств металла;  $C_{\text{O}_2}$ ,  $C_{\text{Cl}^-}$  – концентрации кислорода и хлор-иона соответственно.

В разные периоды эксплуатации эти концентрации изменяются в достаточно широких пределах. Каждый  $i$ -й режим нагружения вносит некоторое повреждение  $\omega_i$  в материал объекта. Обычно принимается, что этот ненаблюдаемый параметр повреждения находится в пределах  $0 < \omega < 1$ . В качестве вероятностной меры повреждения  $\omega$  можно взять относительное время работы на каждом режиме  $\omega_i = \Delta t_i / \tau_i$  и использовать модель линейного суммирования повреждений. Для тонкостенных конструкций, какими являются ТОТ, накопление повреждений нелинейно. Тогда для функции повреждаемости можно записать обобщенное кинетическое уравнение [2]

$$\frac{d\omega}{dt} = f(\sigma_3, T) \cdot \exp(a\omega), \quad \omega(0) = 0, \quad \omega(t) = 1, \quad (2)$$

где  $\tau$  – время до разрушения (1). Окончательный вид выражения для накопленного за  $n$  режимов повреждения

$$\omega_n = -\frac{1}{a} \ln \left( \frac{1}{\tau_n} (\exp(-a) - 1) \Delta t + \exp(-a\omega_{n-1}) \right).$$

Относительный остаточный ресурс оборудования можно оценить как  $(1 - \omega(t))$ , а наработку до отказа как  $t^{res} = (1 - \omega(t))\tau$ , где  $\tau$  – максимальное время наработки для ожидаемых значений эксплуатационных параметров.

Значения остаточного ресурса для одного из энергоблоков АС при различных возможных значениях концентраций хлор-иона и кислорода и разных критериях предельного состояния трубчатки ( $d$ ) приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты расчетов остаточного ресурса  
трубки ПГ методом нелинейного суммирования  
(в тыс. ч\*)**

$C$ , мг/кг	$d=16\%^*$	$d=18\%$	$d=20\%$	$d=25\%$
$O_2 = 10$ $Cl^- = 50$	147	271	351	537
$O_2 = 10$ $Cl^- = 100$	87	101	131	234
$O_2 = 50$ $Cl^- = 50$	98	146	175	309
$O_2 = 50$ $Cl^- = 100$	17	21	29	41

\* – в таблице приведены значения нижней границы 95-процентного доверительного интервала

Современное состояние теории прогнозирования и оценивания характеристик надежности элементов АС требует индивидуального подхода к конкретному оборудованию, максимального использования имеющейся информации по объекту и аналогам, системного подхода к проблеме. При этом актуальными остаются новые разработки в области моделирования, объединения разнородной информации, а также построение оптимальных алгоритмов. Одним из эффективных алгоритмов является метод стохастической фильтрации Калмана.

### ФИЛЬТР КАЛМАНА

Работоспособность такого оборудования как парогенератор ВВЭР определяется, в первую очередь, целостностью трубчатки. Повреждения теплообменных

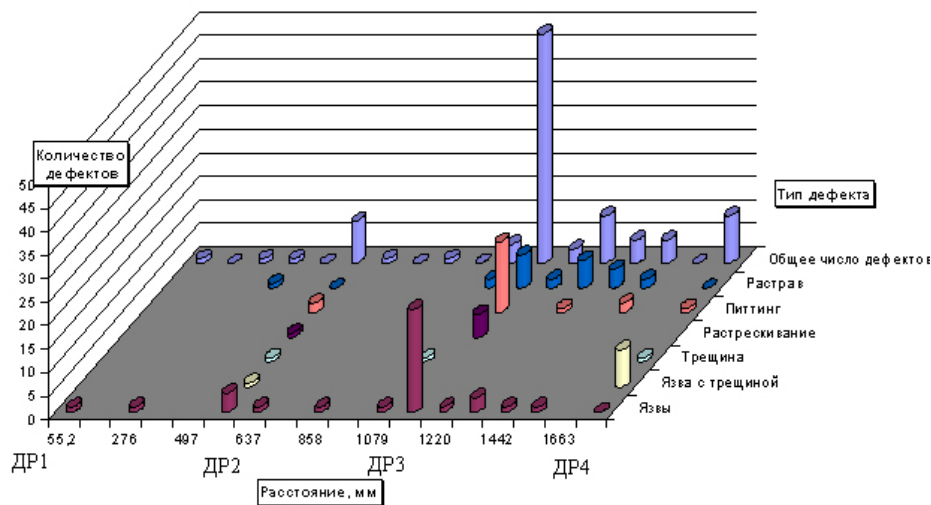


Рис. 3. Распределение выявленных повреждений по длине образцов

трубок неравномерно распределены не только по высоте трубной решетки, но и по длине трубок, что связано с повышенными концентрациями активаторов коррозии под дистанционирующими решетками, а также в отложениях на теплообменной поверхности. По результатам металлографических исследований видно (рис. 3), что и язвы, и питтинги, и трещины расположены в основном под 2 и 3-ей дистанционирующими решетками.

Причин повреждений теплообменных трубок несколько, но основным процессом, приводящим к развитию дефектов, является коррозионное растрескивание под напряжением и связанные с ним питтинг и язвенная коррозия.

Металл теплообменных трубок периодически контролируется вихретоковым методом с определенной погрешностью. Статистика о заглушенных трубках включает данные не только о ТОТ со сквозными дефектами, но и о трубках с нехваткой металла свыше некоторого уровня. На основе этой информации возможна вероятностная оценка ресурсных характеристик трубчатки, а также оптимальное планирование последующих профилактических работ. В этой ситуации для решения задачи прогнозирования логично использовать метод стохастической фильтрации Калмана [3]. Для его применения необходимо описать определяющий процесс старения  $\omega$  с помощью подходящего дифференциального уравнения, например:

$$\frac{d}{dt}\omega_{\sigma}(t) = f(\sigma, T)q^b + \omega_{\sigma}af(\sigma, T)q^b,$$

затем линеаризовать его и перейти к соответствующей разностной схеме

$$\omega_{n+1} = \omega_n(1 + \Delta_n af(\sigma, T)q^b) + \Delta_n f(\sigma, T)q^b.$$

После введения дополнительной информации, связанной с особенностями контроля, можно построить оптимальный фильтр [3]:

$$\hat{x}_n = E[\eta_n / v_n, \dots, v_1], \quad n \geq 1,$$

где  $E[*/*]$  – условное математическое ожидание,  $x_0$  – гауссовская величина,  $\eta_n$  – рекуррентный случайный процесс – модель наблюдений,  $\{v_i(x)\}$  – результаты измерений.

### АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Как правило, все рассмотренные задачи требуют применения вычислительных процедур для статистического моделирования случайных параметров и процессов. Причем часто для достижения приемлемой точности требуется огромное количество независимых случайных величин.

Известно, что точность моделирования можно значительно повысить, если часть задачи решить аналитически. Таким образом удалось, например, значительно уменьшить размерность задачи стохастической фильтрации Калмана, введя зависимость числа глушений теплообменных трубок (ТОТ) ПГ от высоты трубной решетки (рис. 4).

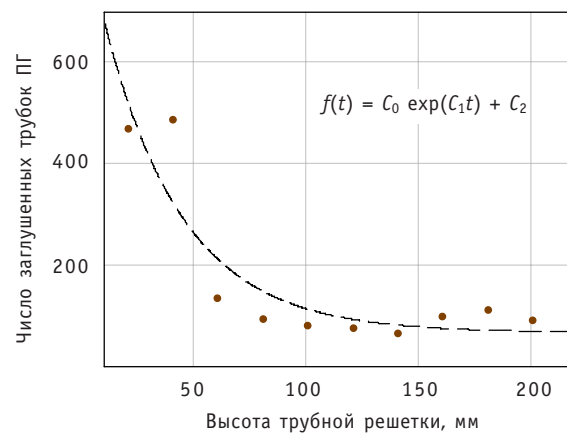


Рис. 4. Эмпирическая зависимость числа заглушенных ТОТ от высоты ПГ: • —  $y$ ; — — —  $f(t)$

Часто можно получить красивое решение, используя асимптотику центральной предельной теоремы (ЦПТ). Это, как правило, задачи, связанные с накоплением повреждений в материалах.

Критерием предельного состояния является достижение накопленным повреждением уровня 1. Если повреждения достаточно малы (капельная эрозия, многоцикловая усталость, рост коррозионных трещин,...), то для имитации процесса накопления повреждений требуется порядка  $10^6$ – $10^8$  независимых случайных чисел. Использование ЦПТ существенно упрощает алгоритм при хорошей сходимости [4]:

$$P\left(\sum_{i=1}^n \omega_i < 1\right) = P\left(\sum_{i=1}^n \omega_i - \sum M\omega_i < 1 - \sum M\omega_i\right) = P\left(\frac{\sum_{i=1}^n \omega_i - \sum M\omega_i}{\sqrt{\sum D\omega_i}} < u\right) = \Phi(u),$$

$$\text{где } u = \frac{1 - \sum M\omega_i}{\sqrt{\sum D\omega_i}}.$$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все рассмотренные ситуации относятся к индивидуальному вероятностному прогнозированию остаточного ресурса. Решение поставленных задач позволяет

сформулировать требования к входному контролю, к условиям эксплуатации, к характеристикам материала, исходя из требований к безотказности элемента. Это дает возможность управлять его ресурсом, обеспечивая соответствующий режим эксплуатации. Осуществляя таким образом мониторинг остаточного ресурса, мы решаем проблему обеспечения исходной информацией задачи принятия решения по продлению срока службы энергоблока в целом.

### **Литература**

1. Гулина О.М., Корниенко К.А., Павлова М.Н. Анализ загрязненности трубчатки ПГ и оценка межпромывочного периода методами диффузионных процессов// Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 1. – С.20-24.
2. Корниенко К.А., Гулина О.М., Сальников Н.Л., Фролов С.А. Прогнозирование ресурсных характеристик тепломеханического оборудования при нелинейных эффектах деградации/IV Международная научно-техническая конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». Пленарные и секционные доклады (Москва, 16-17 июня 2004 г.). – М.: ВНИИАЭС, 2004. – С. 134-139.
3. Гулина О.М., Корниенко К.А., Политюков В.П., Фролов С.А. Применение метода стохастической фильтрации Калмана для расчета ресурсных характеристик оборудования парогенераторов// Атомная энергия. – 2006. – Т. 101. – Вып. 4. – С. 313-316.
4. Егишянц С.А., Гулина О.М., Коновалов Э.Н. Оценка распределения ресурса при суммировании повреждений// Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – № 1. – С. 18-21.

Поступила в редакцию 2.05.2007

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

---

### **УДК 621.039.546**

*Example of Application Markovs Process with Incomes at Acceptance of Engineering Decisions Concerning Objects of Nuclear Technologies in Conditions of Uncertainty on an Example of Object «Shelter» Chernobyl NPP\ Yu. V. Volkov, A. V. Sobolev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 3 tables, 1 illustration. – References – 4 titles.*

Application of markovs process with incomes for search of optimum strategy of «behavior» in conditions of uncertainty is considered. The technique of construction adequate markov is offered to model of process for objects of nuclear technologies, on an example of object «Shelter» Chernobyl NPP.

### **УДК 621.039.58**

*NPP Equipment Life Time Prediction Methods\ O.M. Gulina, N.L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 7 pages, 3 tables, 4 illustrations. – References – 4 titles.*

Its shown that problem of NPP equipment life time prediction is based on the estimation of moment the parameter observed or calculated achieves limited level. There are considered some mathematical models for different kinds of degradation processes and information obtained. Some results are presented.

### **УДК 621.039.58**

*Method for Processing of Statistical Data on Equipment Reliability During NPP Operation\ S.P. Saakian, V.A. Ostreikovskiy, V.A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 8 pages, 6 illustrations. – References – 3 titles.*

The records of failures during NPP operation are one of the highest importance for determination of NPP equipment reliability performance. These records however due to objective and subjective reasons are no more than the homogeneous stream of events, the fact that brings difficulties into the process of calculating the equipment reliability characteristics. The given paper proposes the new methods of data handling for heterogeneous stream of statistical data on equipment failures which gives the possibility of getting more truthful information about NPP equipment and systems reliability performance.

### **УДК 621.039.58**

*The Residual Life Time Estimation for the Nonrestorable Elements of the RBMK-1000 PCS Electrical Equipment of the Smolensk NPP's First Power Unit\ S.V. Sokolov, A.V. Antonov, V.A. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 6 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References – 3 titles.*

In the paper the statistical methods of residual life time estimation for nuclear power plants' (NPP) electrical equipment are considered. The mathematical model of the reliability characteristics calculation for the nonrestorable elements is given. The results of the residual life time calculations for elements of the protection control system's electrical equipment are represented in the paper. As a basis for calculation the statistical data about failures of the RBMK-1000 protection control system equipment of the Smolensk NPP's first power unit were used.

### **УДК 621.039.5**

*Application of PSA for NPPs with VVER-type Reactors of New Generation under Design\ G.V. Tokmachev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages. – References – 20 titles.*

The paper discusses the use of probabilistic safety assessments (PSA) to support design evaluation for a new generation of advanced nuclear power plants with VVER-type reactors. The concept of the new VVER plants is briefly described. The design solutions to improve safety, which are based on in-depth principles and results of PSAs performed for operating VVER plants, are characterized. The evaluation whether the advanced VVER plant design meets deterministic principles is performed at a qualitative level using the PSA results. The approach to quantitative assessment of safety of the NPPs in design is described that is based on the PSA results.

### **УДК 621.039.524**

*Technical and Numerical Substantiation of Procedures Preventing Accident at VVER-1000 Based NPP\ A.N. Shkarovskiy, V.I. Aksenov, A.P. Kolevatykh, N.P. Serdun, A.A. Roslyakov; Editorial board of journal «Izvestia*