

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕСУРСОМ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС

**О.М. Гулина, М.Н. Павлова, В.П. Политюков, Н.Л. Сальников**

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



Задача индивидуального прогнозирования работоспособности ПГ решается на основе использования стохастического дискретного фильтра Калмана. Разработан подход к построению оптимального алгоритма для прогнозирования развития процесса старения при использовании данных о результатах контроля и проведенных профилактических работах, информации о местоположении трубки в сборке, а также эксплуатационной информации о режимах и проведенных глушениях теплообменных трубок. Применяя необходимые мероприятия по управлению ресурсом трубчатки, можно оценить оптимальный план последующего ППР, а также определить максимальный срок службы ТОТ ПГ.

Поиск закономерности накопления повреждений в материале с учетом статистических данных, получаемых во время проведения контроля, остается актуальной задачей при прогнозировании ресурсных характеристик теплоэнергетического оборудования. Принятый в настоящее время статистический прогноз обладает существенным недостатком – невозможностью прогнозирования в изменившихся условиях эксплуатации [1]. Для учета изменений и прогнозирования технического состояния оборудования необходима разработка соответствующих процедур, адекватно отражающих эти изменения и простых для машинной реализации.

Работоспособность оборудования, такого как парогенератор ВВЭР, определяется, в первую очередь, целостностью трубчатки. Металл теплообменных трубок контролируется вихретоковым методом (ВТК) с определенной погрешностью. Статистика о заглушенных трубках содержит данные не только о ТОТ со сквозными дефектами, но и о трубках с недопустимой нехваткой металла. На основе этой информации возможны вероятностная оценка ресурсных характеристик трубчатки, а также оптимальное планирование последующих профилактических работ. В работе [1] для решения этой задачи предлагается использовать метод стохастической фильтрации Калмана [2,3].

В настоящей работе на основе одношагового предиктора Калмана предложен принцип построения оптимального алгоритма управления ресурсом парогенератора АЭС. Предлагаемое решение учитывает как природу процесса старения, так и его случайный характер. Кроме того, важной дополнительной информацией являются данные контроля, осуществляемого в процессе эксплуатации.

**Постановка задачи.** Закономерность накопления статистических повреждений  $\omega_{\sigma}(t)$  тонкостенных конструкций может быть описана обобщенным кинетическим

уравнением [4]

$$\frac{d}{dt}\omega_{\sigma}(t) = f(\sigma_m, T) \cdot q^b \cdot \exp(a \cdot \omega_{\sigma}), \quad \omega_{\sigma}(0) = 0, \quad \omega_{\sigma}(t_B) = \omega_B, \quad (1)$$

где  $\omega_B$  – критическое значение функции повреждаемости, при котором наступает предельная повреждаемость  $\omega_B$  (обычно  $\omega_B = 1$ );  $\sigma$ ,  $T$ ,  $q_i$  – эквивалентное напряжение, температура, параметры эксплуатации, в общем случае являющиеся функциями времени;  $a$ ,  $b$  – коэффициенты, полученные по экспериментальным данным. Параметр  $a$  характеризует интенсивность процесса старения, причем мера повреждения может быть выражена через определяющий процесс старения, характерный для данного оборудования в рассматриваемых условиях. Многие параметры в задаче (1) зависят от условий эксплуатации парогенератора, например, от концентраций активаторов коррозии, температуры, средней удельной загрязненности [5] и др. Все параметры, определяющие процесс старения, объединим одним вектор-параметром  $\mathbf{U}$ , а область, в которой они могут меняться, обозначим через  $W$ .

В работе [1] задача (1) линеаризованна и с учетом сказанного имеет вид

$$\frac{d}{dt}\omega_{\sigma}(t) = f_1(\mathbf{U})\omega_{\sigma}(t) + f_2(\mathbf{U}), \quad (2)$$

$$\omega_{\sigma}(0) = 0. \quad (3)$$

**Одношаговый предиктор Калмана.** Пусть  $[\omega_m(t, x)]$  –  $m$ -компонентный вектор, где  $m$  – число трубок,  $t$  – дискретное время. Обозначим через  $\Delta_i$  интервал времени между наблюдениями, тогда время наблюдения  $t_n = \sum_{i=1}^n \Delta_i$ . Если интервалы между наблюдениями одинаковые, то  $t_n = n\Delta$ . Разностное уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению (2), с вектором управления  $\mathbf{U}$  можно представить в виде

$$\omega_{n+1} = \omega_n(1 + \Delta_n f_1(\mathbf{U})) + \Delta_n f_2(\mathbf{U}).$$

В работе [1] предлагаемая модель наблюдений представлена в виде следующего рекуррентного случайного процесса  $\eta_n = \{\omega_m(\Delta_n, x)\}$ :

$$\eta_{n+1} = A_n(\mathbf{U})\eta_n + B_n(\mathbf{U}) + F_n(\mathbf{U})N_n, \quad (4)$$

$$v_n = \xi_n + G_n(\mathbf{U})N_n, \quad (5)$$

$$\xi_n = C_n(\mathbf{U})\eta_n, \quad (6)$$

где  $\eta_0$  – гауссовская величина;  $N_n$  – белый шум; матрицы  $A_n(\mathbf{U})$ ,  $B_n(\mathbf{U})$ ,  $F_n(\mathbf{U})$ ,  $G_n(\mathbf{U})$ ,  $C_n(\mathbf{U})$  описаны в работе [1], причем  $B_n(\mathbf{U})$  – детерминированная; вектор  $v_n$ , в соответствии с условиями эксплуатации, – наблюдение (результат ППР). Процесс деградации необратим; более того, можно показать, что он является субмартингалом. Последовательность  $(\eta_n, \xi_n)$  в силу условий эксплуатации парогенератора является частично наблюдаемой гауссовской последовательностью. К системе (4)–(6) применим одношаговый предиктор Калмана [3, 6]. Обозначим оценку состояния как  $\hat{x}_{n+1} = M[\eta_{n+1} / v_n, \dots, v_1]$ ,  $n \geq 1$  (предсказание на один шаг вперед по данным всех предыдущих ППР), где  $M[*/*]$  – условное математическое ожидание,  $\hat{x}_0$  – гауссовская величина,  $M[*]$  – математическое ожидание. Одношаговый предиктор имеет вид

$$\bar{x}_n = A_{n-1}(I - K_{n-1} \cdot C_{n-1})\bar{x}_{n-1} + B_{n-1} + A_{n-1} \cdot K_{n-1} v_{n-1}, \quad (7)$$

$$\hat{x}_n = \bar{x}_n + K_n(v_n - C_n \bar{x}_n), \quad \bar{x}_0 = M[\eta_0], \quad (8)$$

где матрицы  $K_n = P_n C_n^* (G_n G_n^*)^{-1}$ ;  $P_n = \left[ 1 + H_{n-1} C_n^* (G_n G_n^*)^{-1} C_n \right]^{-1} H_{n-1}$ ;

$H_{n-1} = A_{n-1}P_{n-1}A_{n-1}^* + F_{n-1}F_{n-1}^*$ ;  $P_0 = M[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^*]$ ;  $I$  – единичная матрица, а матрица  $K_n$  называется коэффициентом усиления и является решением уравнения Винера-Хопфа.

Фильтр (7)–(8) – рекуррентный. В работе [1] показано, что модель (4)–(6) дает хорошую аппроксимацию плотного множества траекторий (количество траекторий  $m=11000$ ), т.е. вероятность отказа пропорциональна деградации с 95-процентным доверительным интервалом. Из плотного множества траекторий отрываются отдельные траектории, и задача заключается в том, чтобы их идентифицировать.

Разработанный метод применим к процессу роста коррозионной трещины в материале теплообменных трубок ПГ, описываемому уравнением Пэриса

$$\frac{dl}{dt} = C \cdot K_I^m, \quad (9)$$

где  $l$  – глубина трещины, м;  $K_I$  – коэффициент интенсивности напряжений (КИН), МПа(м) $^{1/2}$ ;  $t$  – время;  $C, m$  – константы материала; для полуэллиптической трещины глубиной  $l$   $K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot l}$ ;  $\sigma$  – механическое напряжение, МПа. После подстановки  $K_I$  в формулу (9), получим

$$\frac{dl}{dt} = C \cdot \sigma^m \cdot \pi^{m/2} \cdot l^{m/2}. \quad (10)$$

Кроме этого в модель заложены зависимости, полученные из обработки экспериментальных данных о поврежденности ТОТ в зависимости от местоположения в трубной решетке [5]. Учитывая, что число повреждений ТОТ зависит от высоты

трубной решетки (рис. 1), введем безразмерный коэффициент  $K_h = \frac{f(h)}{\max f(h)}$ . Дан-

ный коэффициент вводится в модель для учета местоположения повреждения и должен определяться для каждой установки индивидуально. Поскольку число заглушенных труб определяется глубиной дефекта и пропорционально ему, то введенный коэффициент следует использовать в той же степени, что и глубину дефекта, тогда уравнение (10) примет вид

$$\frac{dl}{dt} = C \cdot \sigma^m \cdot \pi^{m/2} \cdot l^{m/2} \cdot K_h^{m/2}.$$

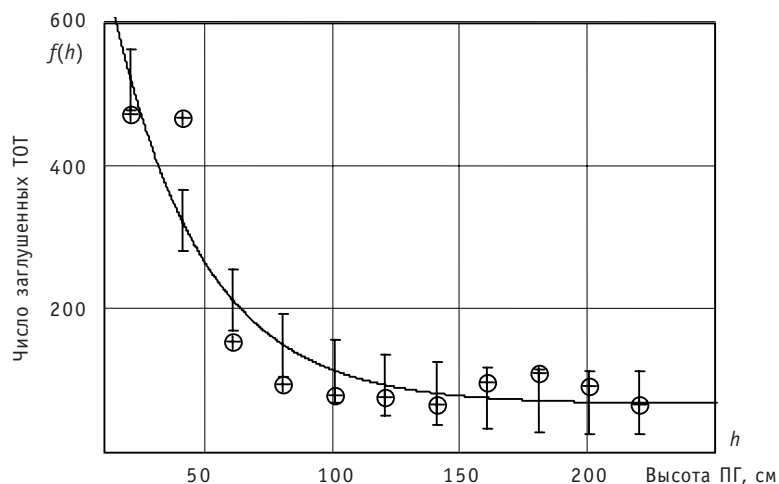


Рис. 1. Эмпирическая зависимость числа заглушенных ТОТ от высоты ПГ

Зависимость (рис. 1) имеет индивидуальный характер для каждого ПГ, но однотипный вид: как правило, число заглушенных трубок в нижней части сборки существенно выше. Для применения метода Калмана [3] необходимо выполнить линеаризацию полученного уравнения. Сделаем замену переменных  $\frac{dl}{l^{m/2}} = dz$ , тог-

да  $z = \frac{l^{1-\frac{m}{2}}}{1-\frac{m}{2}}$ ,  $m < 2$ . Получим зависимость

$$\frac{d}{dt} z(t) = C \cdot \sigma^m \cdot \pi^{m/2} \cdot K_h^{m/2}, \quad (11)$$

$$z(0) = 0, z(\tau) = z_{кр}, \quad (12)$$

где  $z_{кр}$  – критическое значение функции, при котором «нехватка материала» (глубина коррозионной трещины  $l$ ) достигает предельного значения [6].

В общем случае функция  $z(t)$  является случайным процессом, т.к. зависит от случайных условий эксплуатации. Поскольку алгоритм реализуется в дискретном времени, то необходимо дифференциальное уравнение заменить разностной схемой. Разностное уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению (11), (12), можно записать в виде

$$z_{n+1} = z_n + \Delta_n \cdot C \cdot \sigma^m \cdot \pi^{m/2} \cdot K_h^{m/2}.$$

На рис. 2 показана приведенная поврежденность трубок для выборки объемом  $m=10$ .

Фильтр Калмана учитывает взаимодействие повреждений соседних трубок, характеризуемое некоторым корреляционным показателем  $\delta$ , причем чувствительность модели к этому показателю достаточно высокая. На рис. 2 приведены расчетные кривые приведенной поврежденности для 10 трубок, имеющих различную начальную дефектность, для  $\delta=0,9$  (сильное взаимодействие).

Пусть  $d$  – величина, характеризующая деградацию материала трубок (величина нехватки материала в трубке),  $0 < d < 1$ . Обозначим через  $t_{n+1,k}(d)$   $k$ -ю траекторию, принадлежащую жгуту (группе траекторий), достигшую уровня деградации  $d$  в момент времени  $(n+1)$ . Поскольку последовательность  $\eta_n$  монотонна, то последовательность  $t_{n+1,k}(d)$ , полученная в результате решения задачи (4)–(6), в силу линейности и положительности обратного оператора также монотонна и гауссовская:  $t_{n,k}(d) \leq t_{n+1,k}(d)$ . Рассмотрим функционал  $T(U) = M(t_n(d, x), t_n^*(d, x))$ , где  $M(t_n, t_n^*)$  – математическое ожидание от скалярного произведения, а сумма берется по трубкам, достигшим уровня деградации  $d$ .

Определим управление  $U_n^0$  ресурсом парогенератора как оптимальное, если

$$T(U_n^0) = \sup_{U \in W} T(U). \quad (13)$$

К условию (13) необходимо добавить требования экономического характера  $E \leq E_{lim}$ , т.к. любое воздействие на параметры, определяющие ресурс парогенератора, сопряжено с соответствующими затратами.

Тогда смысл предложенного определения заключается в следующем: среди всех воздействий на ресурс парогенератора (параметры ВХР, режим эксплуатации, средняя удельная загрязненность и др.) необходимо найти такое, которое максимально увеличивает время до пересечения траекториями уровня деградации  $d$  при условии, что экономические затраты не превышают некоторой предельной величины.

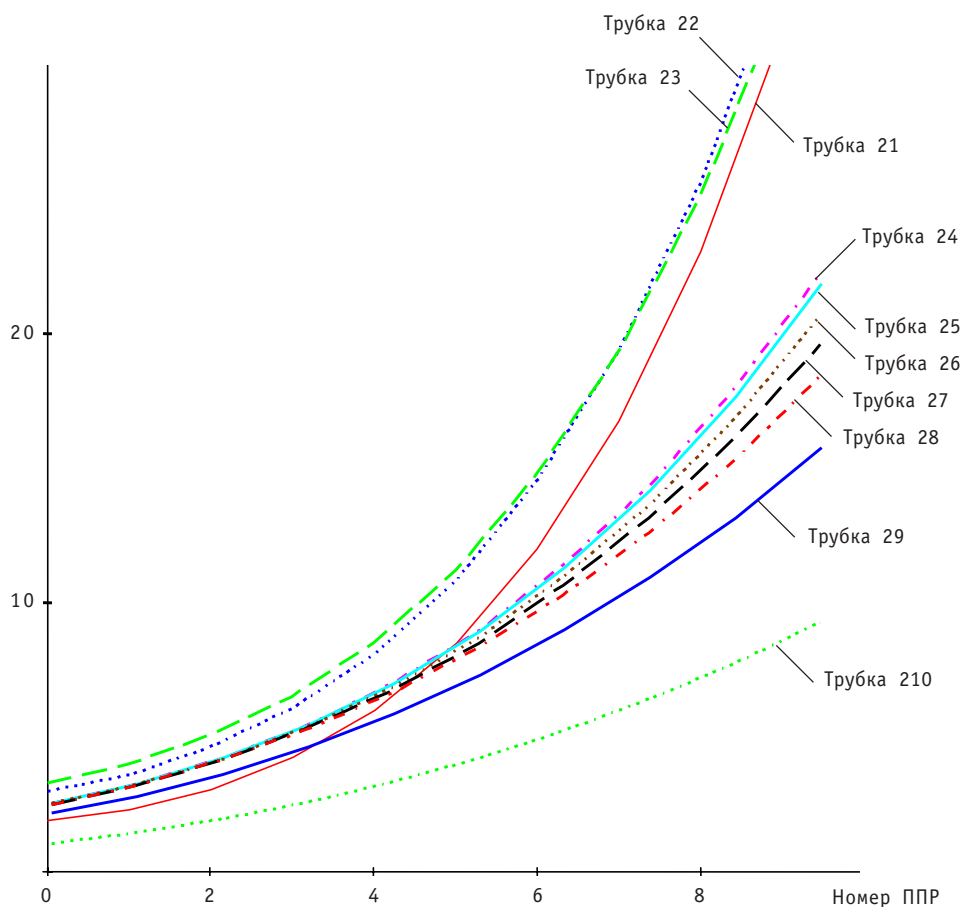


Рис. 2. Рост повреждений в ТОТ со временем при  $\delta = 0,9$  для выборки объемом 10 ТОТ

В табл. 1 приведены возможные мероприятия, реализация которых позволит увеличить срок службы теплообменных трубок ПГ.

Разработанный оптимальный алгоритм представляет собой задачу на условный стохастический экстремум. Он может быть решен, например, методом градиентного спуска. Однако, т.к. приемлемых функциональных зависимостей нет, оценку производных необходимо проводить по экспериментальным данным. Задача предложенного алгоритма — максимально уменьшить число заглушенных трубок между ППР, удлинить интервалы между профилактическими ремонтами и тем самым увеличить ресурс установки.

Таблица 1

### Мероприятия по управлению ресурсом

Конструкционные	Технологические
1. Модернизация системы водопитания и продувки 2. Модификация конструкции 3. Замена материалов 4. Изменение компоновочных решений и т.д.	1. Нормирование показателей качества питательной и продувочной воды 2. Проведение отмывок (качество, периодичность) 3. Применение альтернативных средств контроля 4. Планово-профилактические работы 5. Изменение технологии подготовки теплоносителя и т.д.

Таким образом, основными результатами данной работы являются следующие:

- разработана методика линейной фильтрации Калмана для процесса роста коррозионной трещины в материале трубки с учетом местоположения трубки в сборке;
- сформулирован подход к построению алгоритма увеличения срока службы теплообменных трубок ПГ путем организации оптимального управления.

### **Литература**

1. Гулина О.М., Корниенко К.А., Политюков В.П., Фролов С.А. Применение метода стохастической фильтрации Калмана для прогнозирования ресурсных характеристик парогенератора АЭС // Атомная энергия. – 2006. – Т.101 (4). – С. 313-316.
2. Острейковский В.А., Сальников Н.Л. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
3. Балакришнан А.В. Теория фильтрации Калмана. – М.: Мир, 1988. – 168 с.
4. Лихачев Ю.И., Пупко В.Я. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1975.
5. 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. 12-18.
6. Политюков В.П., Гулина О.М., Павлова М.Н. Стохастическое прогнозирование ресурса теплообменного оборудования АЭС в условиях трещинообразования // Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем: Сборник научных трудов № 17 каф. АСУ/ Под ред. д.т.н. проф. А.В. Антонова. – Обнинск: ИАТЭ, 2007. – С.22-28.

Поступила в редакцию 7.11.2008

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.51

*Using ASTEC Code to Model Fission Products and other Elements Releases through Reactor Cooling System during the LWR Severe Accident* \A.A. Bryzgalov, A.A. Natalenko, F. De Rosa, S. Tirini, N. Voukelatou; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 12 pages, 3 tables, 5 illustrations. – References, 3 titles.

Verification and validation study of ASTEC code on the PHEBUS FPT1 experiment have been performed. The previous investigations showed the deficiency in ASTEC coupled calculations for the aerosols behavior, while CPA stand-alone calculation results have a good agreement with experimental data. Looking for the reasons of wrong prediction of aerosols behavior in the containment was made. The research of fission products and other materials flow rates and evolution of inventory composition that is reaching the containment had been performed with ASTEC V1.3rev2 code. We obtained a rather good prediction for fission products release. There is underestimation of uranium release, but the dominate weaknesses lied in the model of SIC release. The so-called «silver problem» was determined. Silver is very important element from the point of view the significance this element in iodine

### УДК 621.039.58

*The Development of the Methods and Estimation of the Staff Reliability Indications Find on the Statistics of the NPP Incidents at Russia* \Yu.V. Volkov, D.S. Samokchin, A.V. Sobolev, A.N. Shkarovsky; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 10 pages, 1 table, 5 illustrations. – References, 16 titles.

The paper deals with the techniques for estimation the staff reliability parameters based on the statistical data. Four types of staff errors have been chosen and the techniques to calculate the time-sharing law parameters for the indicated errors are considered. The results of the incident statistics processing for the NPP of the Russia Federation made by two different methods are presented and the analysis on the coincidence of these results is made. The practical results obtained let us affirm that it is Weibull time-sharing law that makes the random time description for the NPP incidents more appropriate and justifiable. The recommendations how to use the drawn conclusions to perform PRA are given.

### УДК 621.039.58

*Optimal NPP Steam Generator Lifetime Management using Stochastic Kalman Filter* \O.M. Gulina, M.N. Pavlova, V.P. Politukov, N.L. Salnikov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 6 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 6 titles.

The problem of individual prediction of SG HET lifetime is decided by means of stochastic linear Kalman filter. There is suggested the approach to develop optimal algorithm for prediction of ageing process evolution taking into account control data, preventive measures, HET location in tube lattice and also operating information and the number of plugged-off tubes. From this its possible to evaluate the optimal content of the next control and necessary measures for lifetime management. That allows to achieve the maximum of HET lifetime and extremely arise time between preventive works.

### УДК 621.039.58

*Approach to Common Cause Failure Modeling in Probabilistic Safety Assessments for New Designs of NPPs with VVER-1000 Reactors* \V.B. Morozov, G.V. Tokmachev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 11 pages, 2 tables, 2 illustrations. – References, 5 titles.

The paper discusses problems of modeling and quantification of common cause failures in performing probabilistic safety assessments (PSA) for a new generation of advanced nuclear power plants with VVER-type reactors. The causes of such failures are briefly characterized. The approach to evaluation of defensive measures against common cause failures implemented in the design of new plants is considered. The methodology of common cause failure probability quantification for standard and large redundancy groups of components susceptible to common cause failures as well as for cases