

# АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ТРУБЧАТКИ ПГ И ОЦЕНКА МЕЖПРОМЫВОЧНОГО ПЕРИОДА МЕТОДАМИ ДИФфуЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

**О.М. Гулина, К.А. Корниенко, М.Н. Павлова**

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



Одним из способов управления ресурсом теплообменных трубок ПГ является периодическое проведение отмывок, что существенно замедляет скорость местной коррозии. В работе аппроксимированы статистические зависимости числа заглушенных трубок от высоты трубной решетки и удельной загрязненности, получено уравнение нелинейного роста удельной загрязненности. Методами теории диффузионных процессов рассчитаны значения межпромывочного периода ПГ при различных уровнях загрязненности с использованием результатов аппроксимации.

## ВВЕДЕНИЕ

Надежная работа энергоблока АС определяется техническим состоянием составляющего его оборудования и поддерживается своевременным проведением профилактики, ремонта или замены. Одной из наиболее актуальных проблем эксплуатации АС с ВВЭР является поступление продуктов коррозии конструкционных материалов и коррозионно-агрессивных примесей в парогенератор (ПГ) с последующим их осаждением на теплообменной поверхности трубного пучка. Работоспособность ПГ определяется целостностью теплообменных трубок (ТОТ). В настоящее время критерием глушения трубки является наличие сквозного дефекта или дефекта с глубиной, превышающей 70% от толщины стенки.

Опыт эксплуатации ПГ показывает, что большинство дефектов образуются под слоем шлама и коррозионных отложений на поверхности трубчатки [1]. Управление ресурсом ТОТ заключается в том числе и в проведении профилактических отмывок, освобождающих поверхность ТОТ от отложений и снижающих тем самым интенсивность процессов местной коррозии.

Задачей данной работы является разработка на основе анализа эксплуатационных данных по загрязненности поверхности ТОТ ПГ методики прогнозирования работоспособности ТОТ и оценки периода профилактики.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве показателя загрязненности используется средняя удельная загрязненность  $K_{уд}$  с размерностью  $[г/м^2]$ .

© О.М. Гулина, К.А. Корниенко, М.Н. Павлова, 2006

Зависимость средней удельной загрязненности теплообменных труб от длительности эксплуатации ПГВ-1000М используется, как правило, в виде линейной зависимости [2]:

$$K_{уд} = 0.005t \text{ (г/м}^2\text{)}, \quad (1)$$

которая эта зависимость относится к средней загрязненности трубки по группе ПГ. Чтобы получить зависимости роста загрязненности от времени для дальнейшего использования их в задаче индивидуального прогнозирования работоспособности ТОТ, необходимо проанализировать данные по загрязненности парогенераторов АС, полученные в результате промывок.

## АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Отложения на поверхности трубки ПГ в местах, удобных для их отбора (верхние ряды пучка), часто оказываются непредставительными для оценки общей загрязненности пучка, особенно в его глубине и в нижних рядах. Так, например, толщина отложений на ТОТ, вырезанной из 60-го по высоте ряда на одном из ПГВ-1000 во время ППР, составляла от 0,1 до 1,5 мм, что соответствует загрязненности порядка 350 – 5000 г/м<sup>2</sup>, при том, что загрязненность верхних рядов не превышала нормы [2].

Поскольку большая загрязненность нижних рядов обусловлена еще и физическими причинами, то, вероятно, можно аппроксимировать загрязненность по высоте экспоненциальной зависимостью с параметром  $\lambda$

$$Z(h) = A \exp(-\lambda h), \quad (2)$$

и с учетом роста загрязненности со временем

$$K_{уд} Z(t, h) = K_{уд} A \exp(-\lambda h),$$

где  $h$  изменяется от 0 до  $H$  (высота трубки ПГ) (рис. 1).

В пользу этого предположения говорит и опыт эксплуатации ПГ, например, Бал-АЭС. На рис. 2 приведено распределение заглушенных ТОТ на 2 и 3 энергоблоках Балаковской АЭС по высоте трубных решеток. Можно показать, что это распределение удовлетворительно описывается экспоненциальным законом. Здесь же приведен график аппроксимирующей функции.

Вид аппроксимирующей функции  $f(h) = C_1 \exp(C_2 h) + C_3$ ,

где  $C_1 = 852$ ,  $C_2 = -0,024$ ,  $C_3 = -7,09$ .

Аналогичная зависимость описывает распределение заглушенных ТОТ ПГ 2 блока БалАЭС.

Следует ожидать, что число поврежденных трубок зависит от показателей водно-химического режима (ВХР) (скорость образования отложений) и от качества отмывок (остаточная загрязненность).

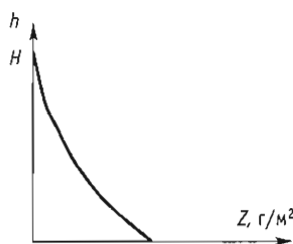


Рис. 1. Предполагаемая зависимость загрязненности от высоты

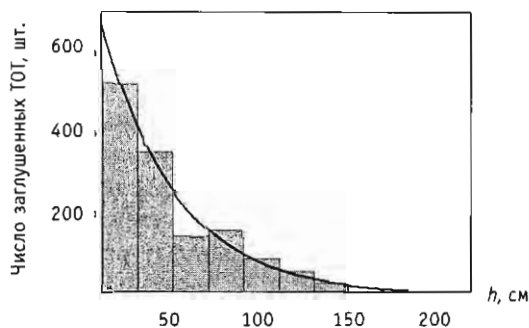


Рис. 2. Распределение заглушенных ТОТ по высоте входных коллекторов ПГ 3 блока БалАЭС

Для оценки качества отмывки можно ввести коэффициент

$$\delta = 1 - (\eta^-/\eta^+), \quad (3)$$

где  $\eta^-$  – загрязненность после отмывки (остаточная);  $\eta^+$  – загрязненность до отмывки. Смысл этого коэффициента состоит в *относительной доле отмытых отложений*.

Анализ качества отмывок, проведенных в ППР-96 на КалАЭС, показал, что, например, для ПГ-2  $\delta = 1$ , для ПГ-4  $\delta = 0,63$ .

Массу загрязнений на поверхности трубчатки можно оценить как среднюю загрязненность, проинтегрировав зависимость (2) с учетом того, что площадь поверхности ТОТ равна  $S$ :

$$m = \frac{S}{H} \int_0^H KZ(t, h) dh. \quad (4)$$

Масса вымытого вещества  $\mu$  равна

$$\mu = S \frac{\delta}{H} \int_0^H KZ(t, h) dh,$$

где коэффициент  $\delta$  определяет качество промывки, т.е. относительную долю вымытого вещества;  $S$  – площадь трубчатки,  $\text{м}^2$ , для ПГ ВВЭР-1000  $S = 6115 \text{ м}^2$  (для 5 блока НВАЭС  $S = 5200 \text{ м}^2$ , для ВВЭР-440  $S = 2500 \text{ м}^2$ ),  $K = K_{\text{уд}}$  – удельная загрязненность,  $\text{г}/\text{м}^2$ ;  $H$  – высота трубчатки ПГ,  $\text{м}$ ;  $t$  – время, тыс. ч.

После интегрирования получим, что масса вымытых веществ равна

$$\mu = S \frac{\delta}{H} K \int_0^H A \exp(-\lambda h) dh = S \frac{\delta K A}{H \lambda} (1 - \exp(-\lambda H)), \quad (5)$$

параметры зависимости (2) можно оценить по массе вымытого вещества

$A = \frac{\mu \lambda H}{S \delta K (1 - \exp(-\lambda H))}$  – по данным в верхней части ПГ;  $\lambda = \frac{1}{h_0} \ln \frac{Z(h_0)}{A}$  – по данным о загрязненности на высоте  $h_0$ .

Для новых ПГ *допустимый уровень загрязненности* трубного пучка принят  $150 \text{ г}/\text{м}^2$  [5], а для ПГ со сроком службы более 30 лет –  $100 \text{ г}/\text{м}^2$ . Это значение можно использовать как уровень недопустимой загрязненности при индивидуальном прогнозировании роста загрязненности ТОТ в ПГ.

## РАСЧЕТ МЕЖПРОМЫВОЧНОГО ПЕРИОДА

Из анализа результатов промывок, проводимых в ППР на КалАЭС, коэффициент  $K$  из уравнения (1) изменялся от 0,002 (при  $\delta = 1$  в предыдущем ППР) до  $0,006 \text{ г}/(\text{м}^2 \text{ тыс. ч})$ .

Это говорит о том, что *чем меньше остаточная загрязненность* (чем выше качество отмывки), *тем меньше скорость накопления отложений* в следующем периоде. Возможно, скорость накопления отложений не является постоянной, а зависит от уже накопленной загрязненности.

В пользу предположения о нелинейности процесса роста загрязненности говорит и статистика измерений загрязненности.

Для данных, приведенных в [3] для ПГ КалАЭС (табл. 1), можно аппроксимировать накопленную загрязненность ( $\text{г}/\text{м}^2$ ).

С помощью экспоненциальной регрессии построена аппроксимация для ПГ-1 по результатам 1990–1995 гг. включительно (рис. 3):

$$f(t) = C_0 \exp(C_1 t) + C_2,$$

где  $C_0 = 0,091$ ,  $C_1 = 1,403$ ,  $C_2 = 0,188$ ,  $t$  – время, год.

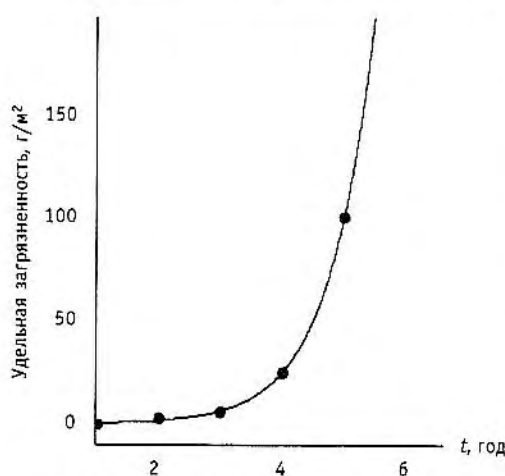


Рис. 3. Аппроксимация загрязненности для ПГ-1

Аппроксимации для остальных ПГ описываются аналогичными функциями, но с другими численными коэффициентами. Подобрав соответствующие коэффициенты по первым нескольким измерениям, можно оценить межпромысловый период приблизительно в 4,5–5 лет, однако уже приблизительно через 3 года происходит переход к высокой скорости роста загрязненности.

Уравнение для скорости роста имеет вид:

$$\frac{dK(t)}{dt} = C_1 K(t) - C_1 C_2,$$

т.е. скорость роста зависит от уже накопленной загрязненности.

Таким образом, появляется возможность прогнозирования времени до очередной промывки. Для этого необходимо задать допустимый уровень загрязненности ТОГ для данного ПГ (*критерий предельного состояния*) и воспользовавшись результатами теории надежности, оценить время до первого выхода процесса роста загрязненности за допустимый предел.

Эта задача может быть решена путем описания случайного процесса накопления отложений  $\xi(t)$  одномерным диффузионным процессом с дифференциалом

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

и оценки времени первого выхода за допустимый уровень.

Расчет удельной загрязненности с помощью диффузионной модели по данным табл.1 с различными начальными значениями удельной загрязненности приводит к следующим значениям времени до выхода за допустимый предел (табл. 2)

**Удельная загрязненность поверхности ТОГ**

Таблица 1

Год, месяц	Удельная загрязненность, г/м <sup>2</sup>			
	ПГ-1	ПГ-2	ПГ-3	ПГ-4
1989	93/73	149/41	142/77	75/30
1990	82/0	100/7	154/0	0/0
1991, декабрь	2,5	0	2,5	0
1993, январь	6	7	5	3
1994	25	3	52	73
1995	101	77	85	74

37/26 г/м<sup>2</sup> – загрязненность до/после промывки.

**Значения межпромыслового периода при различных значениях остаточной загрязненности для ПГ-1**

Таблица 2

Начальное значение, г/м <sup>2</sup>	Допустимый уровень $d$ , г/м <sup>2</sup>	Межпромысловый период, год
20	150	5,5
70	150	3.2

Эти значения времени пересечения допустимого уровня можно использовать в качестве значения *межпромывочного периода*.

## ВЫВОДЫ

Проведенный анализ роста загрязненности на поверхности трубчатки позволил построить соответствующие зависимости и разработать алгоритмы индивидуального прогнозирования этого процесса в конкретном ПГ с использованием методов теории диффузионных процессов. На основании прогноза оценивается момент первого выхода процесса за предельный уровень, что позволяет оценить время до очередной отмычки. Следует отметить, что результаты, полученные этим методом, показывают хорошее согласие с экспериментальными данными. Это дает возможность расширить постановку задачи и учитывать в диффузионной модели не только данные по загрязненности, но и возможный в этих условиях процесс подшламовой коррозии.

Разработано программное обеспечение расчетов.

## Литература

1. Трунов Н.Б., Денисов В.В., Драгунов Ю.Г., Банюк Г.Ф., Харитонов Ю.В. Работоспособность теплообменных труб ПГ АЭС с ВВЭР/Материалы регионального семинара МАГАТЭ «Целостность труб ПГ» (Удомля, 27-30 ноября 2000 г.). – С. 12-18.
2. Харитонов Ю.В., Брыков С.И., Трунов Н.Б. Прогнозирование накопления отложений продуктов коррозии на теплообменных поверхностях парогенератора ПГВ-1000М//Теплоэнергетика. – 2001. – № 8. – С. 20-22.
3. Отченашев Г.Д. Водно-химические режимы второго контура Калининской АЭС/Материалы регионального семинара «Целостность труб ПГ» (Удомля, 27-30 ноября 2000 г.). – С. 55-63.
4. Морозова И. К., Громова А. И., Герасимов В. В., Кучеряев В. А., Демидова В. В. Вынос и отложение продуктов коррозии реакторных материалов. – М.: Атомиздат, 1975.
5. Гетман А. Ф., Козин Ю. Н. Неразрушающий контроль и безопасность эксплуатации сосудов и трубопроводов давления. – М.: Энергоатомиздат. – 290 с.

Поступила в редакцию 23.01.2006

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.58

*On the Problem of System Investigation of Nuclear Plant Safety using Probabilistic Methods* \A.M. Bakhmetiev, I.A. Bylov; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 9 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 13 titles.

Approaches to methodical support, program complexes, organizational procedures for system safety investigation of different type and purpose plants with the help of probabilistic methods are stated.

### УДК 621.039.58

*On the System of BN-600 Power Unit Safety and Reliability Monitoring* \A. Bakhmetiev, J. Kamanin, J. Makeev, L. Popov; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 8 pages, 7 illustrations, 1 table. – References, 5 titles.

Status of BN-600 plant reliability and safety monitoring system development is presented. Goals of system creation, contents of its main elements, characteristics of developed computer database are stated. Some results of statistic analysis of plant operating experience are given.

### УДК 621.039.58

*Steam Generator Heat-Exchange Tubes Contamination Analysis and Inter-Washing Period Estimation using Diffusion Process Method* \O.M. Gulina, K.A. Kornienko, M.N. Pavlova; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 5 pages, 2 illustrations, 2 tables. – References, 5 titles.

Periodical washing of SG heat-exchange tubes delays the rate of local corrosion processes and is one of the ways of lifetime management. Was approximated statistical dependence of number of muffled tubes from the height of tubes lattice and from specific contamination. Was developed an equation of non-linear up growth for specific contamination. Values of SG inter-washing period for different levels of contamination with approximation results were calculated using diffusion processes theory methods.

### УДК 621.039.534

*The Investigation of the Acoustic Level Limit Switch of Water Boiling Coolant* \V.I. Melnikov, V.V. Ivanov, V.N. Chocklov, A.V. Dunzev, E.A. Semenov, Y.A. Kiselev, A.N. Sinicin, I.N. Kiselev, A.V. Belin; Editorial board of journal «Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 8 pages, 7 illustrations. – References, 4 titles.

The acoustic probe system for a level and amount of liquid phase analysis into control volume on examination of a vapor distribution along the height has been studied.

The principle of function of the probe is based on the determination of an amplitude of ultrasound signals. Vapor phase is indicated according to significant reduction of the amplitude of ultrasound impulses, if vapor bubbles put into control volume.

The waveguides probes operating in frequency band near 600kHz are placed in the transducer; the pulse recurrence frequency is 800Hz.

The measuring system by computer PC controls the service of electronic bloc and it makes possible the experimental data processing.

The acoustic probe system allows to determinate the state of phase into 8 local volumes by probes placed along the height of vessel and to study dispersing properties of the vapor liquid water mixture.

The testing of the level gage has carried out by air-lift system at normal temperature and pressure and by special stand high pressure conditions, where the boiling process of coolant is initiated by depressurization of stand.