

УДК 620.193.198: 621.039.566:621.039.58

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-70-74

Разработка методики прогнозирования глушения теплообменных трубок парогенератора атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором

Чжоу Пэнчао, С.О. Иванов

Главная особенность парогенератора (ПГ) заключается в том, что помимо выработки пара он должен постоянно и надежно охлаждать активную зону реактора атомной электростанции (АЭС). Кроме того, к нему предъявляют высокие требования по межконтурной плотности, т. е. по исключению повреждения теплопередающих и иных элементов, разуплотнение которых приводит к попаданию радиоактивной воды первого контура в пароводяной контур АЭС с последующей возможностью выхода радиоактивных продуктов в окружающую среду. Обеспечение надежной эксплуатации и проектного ресурса теплообменных трубок (ТОТ) парогенераторов — первоочередная задача для различного типа АЭС как в отечественной атомной энергетике, так и за рубежом. Тонкостенные теплообменные трубы парогенератора являются важной частью границы первого контура и для выполнения функции эффективного барьера они не должны иметь сквозных дефектов или дефектов, требующих глушения ТОТ.

Изложены методы прогнозирования глушения теплообменных трубок и остаточного технического ресурса трубного пучка парогенератора АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР), представлены результаты расчета допустимого среднего значения концентрации хлорид-иона в период эксплуатации. Для оценки наработки парогенератора до отказа написана программа на MathCad, позволяющая провести указанную оценку в приемлемые сроки и с достаточной точностью.

Сделан вывод о принятии решения по ужесточению требований к концентрации хлорид-иона в воде продувки для предотвращения глушения негерметичных трубок по причине коррозионного растрескивания под напряжением.

Ключевые слова: концентрация хлорид-иона, остаточная продолжительность, теплообменная трубка, парогенератор, глушение, повреждение.

Для цитирования: Чжоу Пэнчао, Иванов С.О. Разработка методики прогнозирования глушения теплообменных трубок парогенератора атомных электростанций с водо-водяным энергетическим реактором // Вестник МЭИ. 2017. № 6. С. 70—74. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-70-74.

Development of a Procedure for Predicting the Blanking-off of Steam Generator Heat-Transfer Tubes at VVER-Based Nuclear Power Plants

Zhou Pengchao, S.O. Ivanov

The main feature of an NPP steam generator (SG) is that in addition to steam generation, it shall reliably and constantly cool the NPP reactor's core. The SG shall also comply with a stringent requirement of ensuring tightness of the primary and secondary circuits with respect to each other; i.e., its design shall exclude the possibility of damage to the heat-transfer and other elements loss of tightness of which entails ingress of radioactive primary coolant into the NPP steam-water circuit with the subsequent possibility of radioactive products releasing into the environment. Thus, ensuring reliable operation and design life of SG heat-transfer tubes (HTTs) is among top-priority objectives for different types of NPPs used both in the domestic nuclear power industry and abroad. Thin-walled SG HTTs constitute an important part of the primary circuit boundary, and in order to perform the function of an efficient barrier, HTTs shall not have through defects or defects generating the need to blank off them.

The article describes methods used to predict blanking off heat-transfer tubes and the residual technical life of the SG tube bundle used at an NPP equipped with a water-cooled water-moderated power-generating reactor (VVER) and presents the results from calculating the permissible average value of chloride ion concentration during the operation. To assess the SG operation time to failure, a computer program has been written in the MathCad environment, using which the above-mentioned assessment can be performed within an acceptable timeframe and with sufficient accuracy.

A conclusion has been drawn about the need to adopt more stringent requirements for the chloride ion concentration in the SG blowdown water to avoid the need of blanking off leaky tubes damaged as a result of stress corrosion cracking.

Key words: chloride ion concentration, residual life, heat-transfer tube, steam generator, blanking off, damage.

For citation: Zhou Pengchao, Ivanov S O. Development of a Procedure for Predicting the Blanking-off of Steam Generator Heat-Transfer Tubes at VVER-Based Nuclear Power Plants. MPEI Vestnik. 2017; 6:70—74. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-6-70-74.

Существенным условием для разработки методики прогноза является предположение, что распределение отказов однотипных элементов, находящихся в эксплуатации с одинаковыми характеристиками режимов, подчиняется закону нормального распределения (первому следствию из центральной предельной теоремы). Это следует из закономерностей статистической динамики (по известному числу заглушенных суммарно в ходе планово-предупредительных ремонтов (ППР) или неплановых остановов для глушения поврежденных коррозией под напряжением ТОТ) [1] и результатов экспериментов [2]. Следовательно, текущему значению относительного суммарного числа заглушенных теплообменных трубок $\sum N_m$ в парогенераторе будет соответствовать интеграл вероятности Φ_m на момент наработки τ_m , рассчитываемый по формуле из [3]:

$$\Phi_m = \frac{\sum N_m}{N_0} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^X e^{-t^2} dt, \quad (1)$$

где N_0 — число труб в парогенераторе; $\sum N_m$ — суммарное число заглушенных труб на момент времени эксплуатации τ_m ; t — случайная величина, значение которой принадлежит промежутку $(-\infty, X)$.

В [3] изложена методика расчета динамики отказов однотипных элементов из стали марки 08X18H10T применительно к трубным пучкам кипящих теплообменников. В указанном случае вводится критерий предельного состояния уже не для металла, а в целом для теплообменника: его работоспособное состояние продолжается только до исчерпания технологического запаса теплообменных трубок, т. е. критерий предельного состояния трубного пучка — это состояние трубного пучка при достижении аргументом X значения X^{lim} , тогда величине Φ_m будет соответствовать аргумент X_m (см. рис.), определяемый по таблицам интеграла вероятности [4]. В свою очередь, значение аргумента X_m зависит от продолжительности контакта металла ТОТ с коррозионной средой. Полагаем в первом приближении, что уравнение связи аргумента интеграла веро-

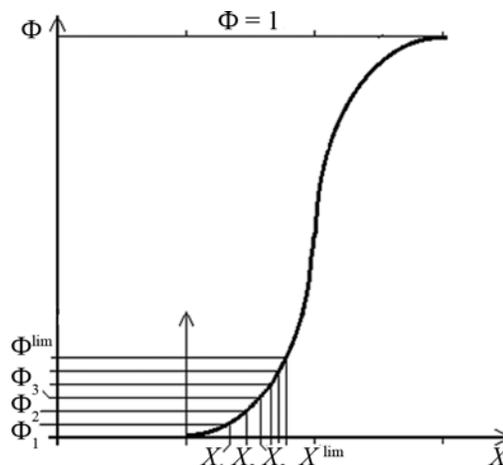


Схема динамики отказов теплообменных труб парогенератора

ятности с продолжительностью эксплуатации и концентрацией хлорид-ионов будет иметь вид уравнения, указанного в [5]:

$$X_m = a_m + b_m \tau_m [\bar{C}_{Cl^-}]_m^{1,56}, \quad (2)$$

где $[\bar{C}_{Cl^-}]_m$ — средняя концентрация хлорид-иона в воде продувки в пределах интервала наблюдений τ_m ; a_m, b_m — константы.

При $m = 1, 2, 3$ и т. д. составляются уравнения вида (2) с использованием фактических данных эксплуатации. Они образуют систему, в которых константы a и b неизвестны и определяются индивидуальными особенностями [1], присущими парогенератору (строением, составом металла, способом монтажа, особенностями изготовления, физико-химическими характеристиками процессов, в том числе концентрированием примесей в отложениях в зазорах дистанционирующих элементов, изменением нагрузки и т. д.). В нашем случае, используя метод наименьших квадратов, можно вычислить их средние значения.

Представим исходные данные в пределах интервала времени наблюдений τ_m , предоставленные специалистами Нововоронежской АЭС в процессе эксплуатации ПГ-1 блока № 4 с 2000 по 2010 гг. (табл. 1—3).

Таблица 1

Характеристики эксплуатации парогенератора

Порядковый номер ремонта	Интервал времени наблюдения τ_m , мес.	Число труб N_m , заглушенных во время наблюдения	Средняя концентрация хлорид-иона во время наблюдения $[\bar{C}_{Cl^-}]_m$, мкг/кг
1	7	3	811
2	9	8	561
3	9	8	868
4	5	4	698
5	6	15	437
6	13	15	312
7	9	5	468
8	14	27	220

Количество заглушенных труб парогенератора

Порядковый номер ремонта	Полное число заглушенных труб $\sum N_m$	Относительное число заглушенных труб
1	3	3
2	11	8
3	19*	8
4	23	4
5	38	15
6	53	15
7	58	5
8	85	27

Таблица 3

Значения параметров X_m, \mathcal{E}_m

Порядковый номер ремонта	Величина аргумента X_m	Эксплуатационный параметр \mathcal{E}_m
1	-3,28	6655
2	-2,88	11470
3	-2,69	20980
4	-2,63	24750
5	-2,45	26920
6	-2,33	29700
7	-2,30	33330
8	-2,15	35070

Вычислить суммарное число труб, заглушенных за все время эксплуатации, по табл. 1 и определить относительную величину труб, заглушенных во время очередного ремонта, можно по (1).

По таблице интеграла вероятности [4], проведя обратную операцию, определим аргумент интеграла вероятности X_m . Затем вычислим эксплуатационный параметр \mathcal{E}_m :

$$\mathcal{E}_m = \sum \tau_m [\bar{C}_{Cl^-}]_m^{1,56}. \quad (3)$$

По (2) с помощью метода наименьших квадратов получены средние значения $a = -3,423$ и $b = 3,535 \cdot 10^{-5}$ и использованы для построения нового уравнения [1]

$$X_{m+1} = a + b \{ \sum \tau_m [\bar{C}_{Cl^-}]_m^{1,56} + \tau_{m+1} [\bar{C}_{Cl^-}]_{m+1}^{1,56} \}, \quad (4)$$

где τ_{m+1} , $[\bar{C}_{Cl^-}]_{m+1}$ — интервал времени от даты, когда делается прогноз, до даты, на которую желательно знать полное число теплообменных трубок со сквозными дефектами и предполагаемую среднюю концентрацию хлорид-иона в воде парогенератора в пределах этого интервала времени.

Далее, используя таблицу интеграла вероятности, найденное значение аргумента интеграла вероятности

X_{m+1} , вычислим соответствующее значение интеграла вероятности Φ_{m+1} . Эта относительная суммарная ожидаемая величина поврежденных теплообменных трубок умножается на полное число трубок в парогенераторе. Следовательно, можно прогнозировать суммарное число негерметичных труб

$$\sum N_{m+1} = N_0 \Phi_{m+1}. \quad (5)$$

Например, при заданных параметрах $\tau_{m+1} = 8$ мес., $[\bar{C}_{Cl^-}]_{m+1} = 33,3$ мкг/кг ($m = 8$) аргумент интеграла вероятности $X_{m+1} = -2,12$, а $\sum N_{m+1}/N_0 = 0,017$ (по таблице [4]).

В итоге получим суммарное число поврежденных теплообменных трубок на дату прогноза $N_{m+1} = \sum N_{m+1} - \sum N_m = 7$ по наперед заданным наработке и средней концентрации хлорид-иона в воде продувки парогенератора.

Критерием выработки ресурса системы однотипных элементов [6—8] служит условие исчерпания своего функционального назначения группой элементов, число которых равно их технологическому запасу в системе $N_{зап}$. В соответствии с этим остаточную продолжительность срока эксплуатации трубного пучка ПГ можно вычислить на основе (2) — (5):

$$\tau_{ост} = \frac{A - \bar{a}}{b [\bar{C}_{Cl^-}]_m^{1,56}} - \Delta \tau_m, \quad (6)$$

где $[\bar{C}_{Cl^-}]_m$ — средняя концентрация хлорид-иона за весь период эксплуатации; $\Delta \tau_m$ — продолжительность эксплуатации ПГ на момент оценки остаточного ресурса; A — константа, численно равная аргументу интеграла вероятности при условии

$$\Phi(A) = N_{зап}/N_0. \quad (7)$$

Если вычисление по (6) показывает, что $\Delta \tau_m$ в сумме с остаточным сроком эксплуатации $\tau_{ост}$ меньше проектного ресурса $\tau_{пр}$, т. е.

$$\Delta \tau_m + \tau_{ост} < \tau_{пр}, \quad (8)$$

то необходимо вносить коррективы в введение режима

эксплуатации в части уменьшения допустимого среднего значения концентрации хлорид-иона.

Пусть проектный ресурс парогенератора $\tau_{\text{пр}} = 30$ лет = 360 мес., тогда, исходя из данных табл. 1, $\Delta\tau_m = 72$ мес. и остаточный период эксплуатации трубного пучка ПГ, определенный по (6), $\tau_{\text{ост}} = 78$ мес., что в сумме с $\Delta\tau_m$ меньше, чем проектный ресурс $\tau_{\text{пр}}$. Это означает, что следует разработать и внедрить дополнительные мероприятия по снижению концентрации хлорид-иона в воде продувки [9].

Путем преобразования и подстановки (6) в (8) получена формула, определяющая среднее значение концентрации хлорид-иона за весь период эксплуатации,

$$\overline{(C_{\text{Cl}^-})}_{\text{пр}} \leq 1,56 \sqrt{\frac{A - \bar{a}}{\tau_{\text{пр}} b}}. \quad (9)$$

Она накладывает условие на величину среднего значения концентрации хлорид-иона за весь период эксплуатации ПГ для обеспечения его проектного ресурса. Таким образом, в рассмотренном случае величина средней концентрации хлорид-иона $(\overline{C_{\text{Cl}^-}})_{\text{пр}}$ в течение проектного ресурса не должна превышать 30,1 мкг/кг.

На остаточный заданный ресурс предельное среднее значение вычисляется с учетом воздействия хлорид-иона за период наработки:

$$\overline{(C_{\text{Cl}^-})}_{\text{ост}} = 1,56 \sqrt{\frac{\tau_{\text{пр}} (\overline{C_{\text{Cl}^-}})_{\text{пр}}^{1,56} - \Delta\tau_m (\overline{C_{\text{Cl}^-}})_m^{1,56}}{\tau_{\text{пр}} - \Delta\tau_m}}. \quad (10)$$

Вычисленная концентрация хлорид-иона в оставшийся период эксплуатации не должна превышать 22,8 мкг/кг, в обратном случае последует уменьшение остаточного ресурса ПГ.

Количество поврежденных теплообменных трубок зависит от следующих эксплуатационных характеристик [10], влияющих на ресурс парогенератора АЭС с ВВЭР:

- от средней концентрации хлорид-иона;
- продолжительности работы между планово-предупредительными ремонтами или до внепланового останова на глушение трубок, поврежденных коррозией под напряжением;
- числа трубок в каждом останове, заглушенных по причине повреждения их коррозией под напряжением (КПН) и за счет процесса коррозионного растрескивания под напряжением (КРПН).

Поскольку предложенная методика основана на учете только концентраций хлор-иона, то очевидно, что результаты расчета, проведенные по ней, имеют определенную погрешность, которая может быть оценена при сопоставлении результатов прогнозных расчетов и реального числа заглушенных трубок. Парогенератор — это кипящий теплообменник, и во время работы в нем поддерживаются постоянными давление насыщения

по второму контуру и, соответственно, температура рабочего тела. Перепады значений давления на стенке и температуры, формирующих механические растягивающие напряжения на стенках трубки, можно в пределах стационарных режимов работы принять постоянными. Кроме того, учитывая, что влияние хлорид-иона на 6 порядков сильнее влияния кислорода, можно утверждать, что концентрация хлорид-иона во время эксплуатации ПГ должна быть принята во внимание в первую очередь по отношению к другим эксплуатационным характеристикам.

Наиболее обоснованным способом борьбы с КР ТОТ ПГ является предотвращение возможности концентрирования хлорид-иона в порах отложений на теплообменных поверхностях, в частности, применяют комплексоны, предотвращающие образование отложений, так как они образуют с примесями воды растворимые комплексы, удаляемые с продувкой. По мнению авторов, внедрение с начала эксплуатации прогрессивных технологий ведения водных режимов второго контура АЭС с ВВЭР на основе комплексонов увеличит как наработку на первый отказ трубного пучка, так и его остаточный ресурс.

Литература

1. **Серафинович Л.П.** Статистическая обработка опытных данных. Томск: В-Спектр, 2007.
2. **Давиденко С.Е. и др.** Работоспособность теплообменных труб и управление ресурсом парогенераторов АЭС с ВВЭР // Сб. трудов 7 Междунар. семинара по горизонтальным парогенераторам. Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2006.
3. **Горбрых В.П.** Локальная коррозия металла теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоатомиздат, 1992.
4. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. С. 578.
5. **Горбрых В.П., Морозов А.В.** Прогнозирование ресурса трубных пучков парогенераторов АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2003. № 5. С. 35—40.
6. **Болотин В.В.** Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990.
7. **Острейковский В.А.** Физико-статистические модели надежности элементов ЯЭУ. М.: Энергоиздат, 1985.
8. **Волков Ю.В., Дугинов О.Б., Клинов Д.А.** Надежность и безопасность ЯЭУ. Обнинск: ИАТЭ, 2005.
9. **Петрова Т.И., Воронов В.Н., Ларин Б.М.** Технология организации водно-химического режима атомных электростанций. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
10. **Воронов В.Н., Ларин Б.М., Сенина В.А.** Химико-технологические режимы АЭС с ВВЭР. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

References

1. **Serafinovich L.P.** Statisticheskaya Obrabotka Opytnyh Danyh. Tomsk: V-Spektr, 2007. (in Russian).
2. **Davidenko S.E. i dr.** Rabotosposobnost' Teploobmennyh Trub i Upravlenie Resursom Parogeneratorov AES s VVER. Sb. Trudov 7 Mezhdunar. Seminara po Gorizonta'nym Parogeneratoram. Podol'sk: OKB «GIDROPRESS», 2006. (in Russian).
3. **Gorbatyh V.P.** Lokal'naya Korroziya Metalla Teploenergeticheskogo Oborudovaniya. M.: Energoatomizdat. 1992. (in Russian).
4. **Korn G., Korn T.** Spravochnik po Matematike dlya Nauchnyh Rabotnikov i Inzhenerov. M.: Nauka, 1973:578. (in Russian).
5. **Gorbatyh V.P., Morozov A.V.** Prognozirovanie Resursa Trubnyh Puchkov Parogeneratorov AES s VVER. Teploenergetika. 2003;5:35—40. (in Russian).
6. **Bolotin V.V.** Resurs Mashin i Konstruktsiy. M.: Mashinostroenie, 1990. (in Russian).
7. **Ostreykovskiy V.A.** Fiziko-statisticheskie Modeli Nadezhnosti Elementov YAEU. M.: Energoizdat, 1985. (in Russian).
8. **Volkov Yu.V., Duginov O.B., Klinov D.A.** Nadezhnost' i Bezopasnost' YAEU. Obninsk: IATE, 2005. (in Russian).

9. **Petrova T.I., Voronov V.N., Larin B.M.** Tekhnologiya Organizatsii Vodno-himicheskogo Rezhima Atomnyh Elektrostantsiy. M.: Izdatel'skiy Dom MPEI, 2012. (in Russian).

10. **Voronov V.N., Larin B.M., Senina V.A.** Himiko-tekhnologicheskie Rezhimy AES s VVER. M.: Izdatel'skiy Dom MPEI, 2006. (in Russian).

Сведения об авторах

Чжоу Пэнчжоу — аспирант кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: dtzhoupengchao@mail.ru

Иванов Сергей Олегович — кандидат технических наук, доцент кафедры атомных электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: IvanovSO@mpei.ru

Information about authors

Zhou Pengchao — Ph.D.-student of Nuclear Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: dtzhoupengchao@mail.ru

Ivanov Sergey O. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Nuclear Power Plants Dept., e-mail: IvanovSO@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 25.07.2017