

Д. В. Билей, С. И. Косенко<sup>1</sup>, В. И. Скалозубов<sup>1</sup>, Хадж Фараджаллах Даббах А.<sup>2</sup>

*ГП НАЭК «Энергоатом», Киев*

<sup>1</sup> *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев*

<sup>2</sup> *Одесский национальный политехнический университет*

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОТРАСЛЕВОГО СТАНДАРТА ПО ОПТИМИЗАЦИИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС С ВВЭР**

Представлены предложения авторов по развитию известного метода ФГУП ОКБ «Гидропресс» оптимизации вихретокового контроля парогенераторов в части учета фактически проведенных измерений и их результатов.

*Ключевые слова:* водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), вихретоковый контроль (ВТК), парогенератор (ПГ), теплообменная труба (ТОТ), планово-предупредительный ремонт (ППР).

### **Актуальность вопроса**

Многочисленные исследования, проведенные в последние десятилетия, выявили основные причины возникновения разрушений и дефектов ТОТ ПГ, которые связаны как с изготовлением и конструкцией ПГ, так и со значительным влиянием условий эксплуатации (существенное влияние водно-химического режима, значительные термодинамические нагрузки, недостатки проведения технического обслуживания, ремонта, организации продувок и др.). К настоящему моменту внедрено и внедряется много эффективных технических и организационных мероприятий по повышению надежности ТОТ ПГ ВВЭР, среди которых важное место отводится контролю и диагностике состояния трубочатки.

С 1990-х годов на АЭС с ВВЭР для контроля состояния металла ТОТ ПГ применяется вихретоковый метод контроля, который к настоящему моменту является одним из основных методов контроля целостности ТОТ. Применение этого метода, сопровождаемое выявлением дефектов, привело к необходимости обоснования работоспособности ТОТ ПГ и разработке рекомендаций по превентивному глушению труб при наличии в них дефектов. Надежность ТОТ ПГ при эксплуатации зависит от достоверности результатов ВТК. Обоснование требований к достоверности ВТК сводится к анализу влияния характеристик достоверности (чувствительность, вероятность обнаружения, точность/погрешность определения размера дефектов) на надежность ТОТ ПГ. Анализ влияния характеристик достоверности ВТК на надежность ТОТ ПГ включает: оценку допускаемых размеров дефектов и установление взаимосвязи этих размеров с чувствительностью ВТК; построение распределений размеров обнаруженных дефектов с учетом достоверности результатов ВТК; оценку вероятности образования сквозных трещин и разрывов ТОТ для разных вариантов задания характеристик достоверности результатов ВТК; выбор критерия, обеспечивающего необходимый уровень надежности ТОТ ПГ; разработку рекомендаций к характеристикам достоверности ВТК с точки зрения обеспечения необходимого уровня надежности ТОТ ПГ.

Другая важная задача дальнейшего применения ВТК ТОТ ПГ вызвана необходимостью оптимизации интервалов и объемов ВТК. Целесообразность такого направления, на наш взгляд, вызвана следующими основными причинами:

1. Из опыта эксплуатации в некоторых случаях не удается по техническим условиям достичь качественного и достоверного 100 %-ного по объему ВТК ТОТ ПГ (например, [1]).
2. Внедрение в последнее время различных эффективных организационно-технических мероприятий позволяет судить о существенном повышении надежности ТОТ ПГ (например, [2]).
3. Избыточное проведение ВТК ТОТ ПГ в полном объеме требует значительных затрат и существенно влияет на общую продолжительность ППР.

© Д. В. Билей, С. И. Косенко, В. И. Скалозубов, Хадж Фараджаллах Даббах А., 2011

4. ВТК не обеспечивает 100 %-ную достоверность результатов контроля (например, [2], [3]), а в ряде случаев противоречит результатам гидроиспытаний.

5. Необходимо пересмотреть критерии глушения ТОТ ПГ по результатам ВТК, так как по опыту проведения контроля в отдельных случаях (см., например, [2]) определено, что обнаруженные дефекты, имеющие относительно небольшую протяженность и раскрытие, не являются критическими (не образуют течи). Необходимо использование более комплексного подхода, учитывающего фазу сигнала (глубина дефекта), амплитуду сигнала (объем дефекта), отношение сигнал/шум для сигнала; наличие близлежащих дефектов и т.п.

### Основные положения

Перспективным подходом в задаче оптимизации периодичности ВТК ТОТ ПГ является метод, разработанный в ФГУП ОКБ «Гидропресс», который положен в основу руководящего документа «Росэнергоатом» к методическим рекомендациям по оптимизации объемов и периодичности ВТК ТОТ ПГ.

Обобщенная оценка допустимой периодичности ВТК металла ТОТ ПГ на основе этого метода включает следующие основные этапы: анализ исходной информации; установление зависимости количества дефектов от длительности периода между ВТК; оценка средней величины вероятности образования течи и крупномасштабного разрушения на основе выполненных анализов работоспособности ТОТ для соответствующего критерия глушения; выбор критерия надежности для оценки построенных зависимостей; оценка допустимого количества дефектов в ТОТ одного ПГ для соответствующего критерия глушения; оценка допустимых объемов контроля и периодов между ВТК металла ТОТ для каждого ПГ.

Анализ результатов ВТК в разные ППР показал, что зависимость количества дефектов от периода между ВТК можно аппроксимировать в виде кусочно-линейной функции

$$k(t + \Delta t) = k(t) + \Delta k_{cp}(t)\Delta t,$$

где  $k(t + \Delta t)$ ,  $k(t)$  – количество дефектов в ТОТ в разные моменты времени, шт.;  $\Delta k_{cp}(t)$  – прирост количества дефектов за один год, шт./год;  $\Delta t$  – интервал времени между ВТК, год.

Прирост количества дефектов за один год  $\Delta k_{cp}(t)$  может быть определен двумя способами:

- на основе аналитических моделей зарождения новых дефектов в металле ТОТ;
- на основе экстраполяции результатов ВТК к моменту времени  $t$ .

Однако при таких подходах, на наш взгляд, не вполне корректно учитывается влияние технического обслуживания, ремонтов и модернизаций на параметр прироста количества дефектов. Поэтому рассмотренный подход оценки  $\Delta k_{cp}$  следует признать избыточно консервативным.

В основу выбора критерия, обеспечивающего необходимый уровень надежности ТОТ, положены три основных принципа:

надежная работа ТОТ должна обеспечивать безопасную работу активной зоны и АЭС в целом;

надежная работа ТОТ должна обеспечивать выполнение парогенератором своих теплотехнических функций;

надежная работа ТОТ должна обеспечивать необходимое значение коэффициента готовности ПГ и, соответственно, реакторной установки.

На основе первого принципа по данным из ВАБ (вероятностного анализа безопасности) рассматриваемого энергоблока определяется допускаемый уровень вероятности «разрыва теплообменной трубы». Для современных АЭС при этой вероятности рассматриваемого исходного события обеспечивается безопасность реакторной установки, т.е. в соответствии с отечественными и зарубежными требованиями по безопасности вероятность повреждения активной зоны не превышает  $10^{-5}$  на реактор в год, а вероятность предельного аварийного выброса не превышает  $10^{-7}$  на реактор в год: вероятность «разрыва теплообменной трубы», характеризующая надежность ПГ, соответствуют такому (допускаемому) уровню надежно-

сти, при котором происходит безопасная работа реакторных установок и АЭС в целом.

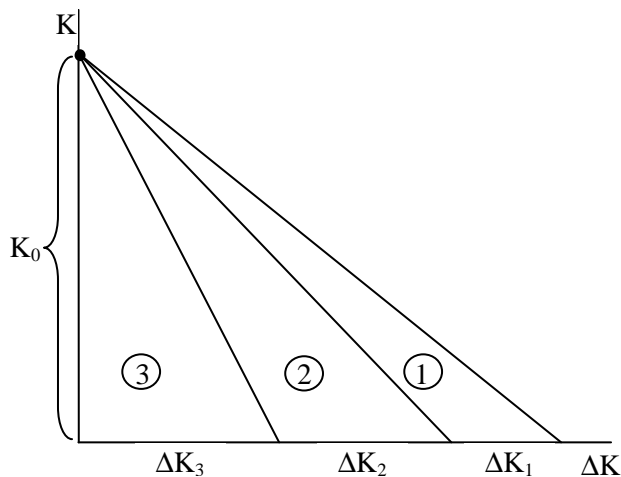
На основе второго принципа по конструкторской и нормативной документации определяется допустимый уровень вероятностей образования сквозных трещин, эквивалентных течи не менее 5 кг/ч, исходя из обеспечения для ПГ выполнения своих теплотехнических функций.

Третий принцип рассматривается исходя из коэффициента готовности ПГ. В общем случае в эксплуатации применяется принцип минимизации количества остановов энергоблока. При этом коэффициент готовности оборудования в соответствии с нормативно-технической документацией для современных АЭС должен быть не менее 0,972. Критерий надежности обеспечен, если одновременно обеспечены три принципа надежности оборудования и трубопровода. Дополнительно к трем принципам надежности рассматривается четвертый принцип, который устанавливает взаимосвязь между допустимыми показателями надежности и необходимым коэффициентом экономической эффективности ремонта ПГ.

Допускаемый период между ВТК определяется на основе критерия надежности, заключающегося в сравнении вероятностей течей и разрыва ТОГ для соответствующего критерия их глушения с допустимыми вероятностями, определенными на основе трех вышеуказанных принципов надежности. При оценке допустимых объемов и периодов контроля предполагается, что 100 %-ный объем ВТК должен быть проведен за допускаемый период контроля. При этом объем ВТК может быть распределен пропорционально по годам за допустимый период контроля. На основе равенства допускаемого количества дефектов и количества дефектов, которое может существовать в данный момент в ТОГ, для соответствующего критерия глушения определяются допускаемые зависимости количества дефектов и прироста дефектов для разного периода времени между ВТК: 1 год, 4 года, 8 лет, 12 лет и др.:

$$k(t) = [k] - \Delta k_{cp}(t)\Delta t.$$

На основе построенных диаграмм «количество индикаций – прирост количества индикаций в год» разрабатываются рекомендации по допустимым объемам и периодам ВТК. В результате разработаны обобщенные диаграммы «количество индикаций»,  $k$  – прирост количества индикаций в год  $\Delta k$  для различных ПГ (ПГ-440, ПГ-1000) и критериев глушения ТОГ ПГ (60 и 70 %). Пример таких диаграмм по методу ФГУП ОКБ «Гидропресс» приведен на рисунке.



Обобщенные диаграммы по изменению периодичности ВТК ТОГ ПГ:

1 – 1 раз в год; 2 – 1 раз в 4 года; 3 – 1 раз в 8 лет.

Одним из основных ограничений подхода по оценке допустимых объемов и периодов ВТК ТОГ ПГ, на наш взгляд, является допущение о том, что 100 %-ный объем ВТК проведен для всех труб за период контроля. По опыту проведения ВТК ПГ с 90-х годов прошлого столетия известно, что не всегда 100 %-ный объем ВТК проводился/проводится для всех ТОГ ПГ. Кроме того, в случае, если ВТК проводился крайне мало или вообще не проводился, суммарное количество обнаруженных дефектов и их прирост может быть также малым и не отражать реальное количество возникающих дефектов ТОГ ПГ, и согласно представленному

подходу может быть рекомендовано дальнейшее снижение периодичности ВТК.

Метод оптимизации ВТК ТОТ ПГ должен учитывать достоверность и качество результатов контроля как в отношении «пропускаемых» дефектов, так и в отношении критичности обнаруженных дефектов. Под оптимизацией контроля в данном случае подразумевается минимизация объемов и периодичности ВТК при сохранении принципов надежности ТОТ ПГ.

С учетом вышеизложенного, в рамках метода оптимизации ВТК ТОТ ПГ целесообразно рассмотрение двух основных вариантов:

- 1) 100 %-ный по объему текущий контроль;
- 2) частичный по объему текущий контроль.

В обоих случаях количество фактически заглушенных трубок в обследуемом ПГ до текущего ВТК будем обозначать  $N_{заг}$ ; среднегодовой прирост дефектных (фактически заглушенных) ТОТ за весь период эксплуатации ПГ –  $\Delta N_{cp}$ ; максимальный среднегодовой прирост дефектных (фактически заглушенных) ТОТ за периоды между последовательными ВТК –  $\Delta N_{max}$ ; количество всех ТОТ в ПГ –  $N$ ; допускаемое количество дефектных ТОТ в ПГ –  $N_{дон}$ ; коэффициент погрешности измерительного метода ВТК, определяющий вероятность не обнаружения критических дефектов, –  $K_{погр}$ ; коэффициент, определяющий критичность обнаруженных дефектов (0-1), –  $K_{кл}$ ; допускаемый период до следующего ВТК –  $T$  (измеряется в годах); число проверяемых ТОТ –  $N_{пров}$ .

### 1-й вариант (100 %-ный текущий ВТК ТОТ ПГ)

Пусть в результате текущего ВТК среди  $N_{пров} = N - N_{заг}$  ТОТ обнаружено  $N_{деф}$  дефектных ТОТ. Тогда,

- 1) если  $N_{заг} + N_{деф} > N_{дон}$ , то данный ПГ, безусловно, должен быть выведен из эксплуатации;
- 2) если  $N_{заг} + N_{деф} \leq N_{дон}$ , то следует определить теоретическое значение дефектных ТОТ  $N_{мд}$  с учетом погрешности и критичности измерений при ВТК:

$$N_{мд} = N_{деф} + K_{погр}(N_{пров} - N_{деф}) - K_{кл}N_{деф}.$$

В случае  $N_{заг} + N_{мд} > N_{дон}$  должен быть выведен из эксплуатации. В противном случае, допускаемый период  $T_{дон}$  до следующего ВТК определится из соотношения

$$N_{заг} + N_{мд} + T_{дон}^* \Delta N \leq N_{дон},$$

где  $\Delta N$  – прогнозная оценка прироста дефектов с момента последнего контроля:

$$\Delta N = \begin{cases} \Delta N_{cp} & \text{– для среднестатистического прогноза;} \\ \Delta N_{max} & \text{– для консервативного прогноза;} \end{cases}$$

$$\Delta N_{cp} = \frac{\sum_i \Delta N_{мдi} \Delta t_i}{T_{эксн}}; \Delta N_{мдi} \text{ – определенный по опыту эксплуатации прирост дефектов за интервалы проведения контроля } \Delta t_i; T_{эксн} \text{ – общий период эксплуатации ПГ.}$$

### 2-й вариант (частичный текущий ВТК ТОТ ПГ)

В этом варианте целесообразно условно разбить ПГ на несколько зон в соответствии с неравномерным распределением дефектных ТОТ в сечении ПГ. Число зон обозначим через  $K_{зон}$ .

Пусть в результате текущего ВТК среди всех  $N_{пров} < N - N_{заг}$  ТОТ обнаружено  $N_{деф}$  дефектных ТОТ. Если  $N_{заг} + N_{деф} \geq N_{дон}$ , то ПГ должен быть выведен из эксплуатации.

Если  $N_{заг} + N_{деф} < N_{дон}$ , то следует определить теоретическое значение дефектных ТОТ  $N_{мд}$  с учетом погрешности и критичности измерений при ВТК. Если  $N_{заг} + N_{мд} > N_{дон}$ , то ПГ должен быть выведен из эксплуатации. В противном случае следует оценить фактическое количество дефектных ТОТ с учетом того, что ВТК был проведен частично.

Пусть в  $k$ -й зоне всего незаглушенных ТОТ до текущего ВТК было  $N_{кнз}$ , число проверяемых ТОТ  $N_{кпров}$ , среди них выявлено число дефектных  $N_{кдеф}$ . С учетом погрешности и критичности измерений ВТК для  $k$ -й зоны теоретическое количество дефектных ТОТ

$$N_{кТД} = \frac{[N_{кдеф} + K_{погр} (N_{кдеф}) - K_{гл} N_{кдеф}] N_{кнз}}{N_{кпров}}$$

Тогда для каждой зоны допустимый интервал последующего ВТК  $\Delta T_{кдоп}$  определится из соотношения

$$(1 - N_{кнз}) + N_{кТД} + \Delta T_{кдоп} \Delta N < N_{доп}$$

Также известно, что используемые в настоящее время средства ВТК ТОТ ПГ недостаточно чувствительны и обладают существенной погрешностью измерений. С учетом этих фактов критерии обобщенной диаграммы изменения допускаемой периодичности ВТК (см. рисунок) корректнее представить в следующем виде:

по общему числу дефектов

$$K = K_0 + \Delta P;$$

по приросту дефектов

$$\Delta K = \Delta K_0 + \Delta P,$$

где  $\Delta P = \sum_{i=1}^n K_{ni} P_0(\Delta t_i) + K_y P_1$ ;  $K_0$  – суммарное количество обнаруженных ВТК дефектов;  $\Delta K_0$  – прирост дефектов за последний период между ВТК;  $K_{ni}$  – количество ТОТ ПГ, не прошедших контроль за период  $\Delta t_i$ ;  $K_y$  – количество ТОТ ПГ, успешно прошедших ВТК (без дефектов);  $P_0(\Delta t_i)$  – вероятность возникновения критического дефекта ТОТ ПГ;  $P_1$  – вероятность необнаружения критического дефекта, связанная с чувствительностью и погрешностью метода ВТК ТОТ ПГ.

Под критическими дефектами в данном случае подразумеваются только те дефекты, которые нарушают целостность трубки ПГ.

Тогда условия принятия решений о переходе на периодичность ВТК

раз в год:

$$\Delta K_2 - \Delta P < \Delta K_0 \leq \Delta K_1 - \Delta P; \quad K_0 \leq \Delta K_{np} - \Delta P;$$

раз в 4 года:

$$\Delta K_3 - \Delta P < \Delta K_0 \leq \Delta K_2 - \Delta P; \quad K_0 \leq \Delta K_{np} - \Delta P;$$

раз в 8 лет:

$$\Delta K_0 \leq \Delta K_3 - \Delta P; \quad K_0 \leq \Delta K_{np} - \Delta P.$$

Кроме того, должны учитываться тенденции (динамика) накопления критических дефектов. Если даже выполняются со значительным запасом критерии безопасности и надежности эксплуатации ПГ, но при этом имеет место тенденция увеличения появления критических дефектов ТОТ, то вряд ли будет достаточно обоснованным принятие решений о возможности сокращения периодичности ВТК. Поэтому в данном случае необходимо привлечение дополнительных критериев оптимизации или тенденции накопления критических дефектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кадников А.А., Никонов А.В. Опыт проведения вихретокового контроля теплообменных трубок ПГ // 7-й Междунар. семинар по горизонтальным парогенераторам: Сб. тр. ФГУП ОКБ «Гидропресс». – 2006.
2. Гетман А.Ф., Конев Ю.Н., Тутнов А.А. и др. Опыт применения на АЭС РД ЭО-0552-2004 «Методические рекомендации по применению системной методологии для обеспечения целостности т/о труб парогенераторов АЭС с ВВЭР // Там же.
3. Беляков В.А., Смирнов С.В. Анализ и оценка данных ВТК теплообменных труб парогенераторов Кольской АЭС // Там же.

**Д. В. Білей, С. І. Косенко, В. І. Скалозубов, Хадж Фараджаллах Даббах А**

**МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ГАЛУЗЕВОГО СТАНДАРТУ З ОПТИМІЗАЦІЇ  
ВИХРОСТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ АЕС ІЗ ВВЕР**

Представлено пропозиції авторів щодо розвитку відомого методу ФДУП ДКБ «Гідропрес» оптимізації вихрострумового контролю парогенераторів у частині обліку фактично проведених вимірювань та їхніх результатів.

*Ключові слова:* водо-водяний енергетичний реактор, вихрострумований контроль, парогенератор, теплообмінна труба, планово-запобіжний ремонт.

**D. V. Biley, S. I. Kosenko, V. I. Skalozubov, Haj Farajallah Dabbach A.**

**METHOD BASES OF BRANCH STANDARD ON OPTIMIZATION OF VORTEX-CURRENT  
CONTROL OF STEAM GENERATORS OF NPP WITH WWER**

Authors of the article present suggestions on development of the known FGUP OKB «Gidropress» method for optimization of vortex-current control of steam generators as regards accounting the actual measurements and their results.

*Keywords:* water-water power reactor, vortex-current control, steam generator, heat-exchange pipe, preventative maintenance.

Поступила в редакцію 04.04.11