

РАЗВИТИЕ ПОДХОДА ПО ОБОСНОВАНИЮ ОПТИМАЛЬНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС С ВВЭР

Д. В. Билей¹, В. М. Пышный¹, В. И. Скалзубов², В. В. Урбанский¹

¹НАЭК «Энергоатом», Киев

²Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев

Развивается разработанный ранее подход ФГУП ОКБ «Гидропресс» по оценке оптимальной периодичности вихретокового контроля теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР. Сформулированы дополнительные условия обоснованного изменения периодичности контроля с учетом неполного объема проведенных работ по диагностике состояния теплообменных труб парогенератора и динамики образования критических дефектов.

Актуальность проблемы

Обеспечение безопасности и надежной эксплуатации парогенераторов (ПГ) АЭС с ВВЭР является известной общепромышленной проблемой, связанной в первую очередь с целостностью теплообменных труб (ТОТ) [1 - 4]. Целостность трубчатки ПГ значительно влияет как на безопасность ядерно-энергетических установок, так и на надежность и эффективность работы АЭС.

Многочисленные исследования 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 трубчатки.

С 1990-х годов на АЭС с ВВЭР для контроля состояния металла ТОТ ПГ применяется вихретоковый метод контроля (ВТК), 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 [2]:

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 периодичности и объемов ВТК. ТОТ ПГ ВВЭР имеет большую поверхность (для ПГВ-1000, например, это порядка 11000 трубок общей протяженностью

около 16 км) и сложную пространственную конфигурацию. Этот факт существенно затрудняет качественное проведение в полном объеме ВТК. Кроме того, проведение ВТК ТОТ ПГ в полном объеме в процессе планово-предупредительных ремонтов (ППР) энергоблоков зачастую находится на критических путях ремонта, что ограничивает возможности повышения коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) АЭС. Поэтому в последнее время в России начаты работы по оптимизации периодичности ВТК ТОТ ПГ, целью которых является обоснованное снижение периодичности контроля при выполнении критериев безопасности и надежной эксплуатации ПГ.

Целесообразность такого направления, на наш взгляд, вызвана следующими основными причинами:

из опыта эксплуатации во многих случаях не удается по техническим условиям достичь качественного и достоверного 100 %-ного по объему ВТК ТОТ ПГ;

внедрение в последнее время различных эффективных организационно-технических мероприятий позволяет судить о существенном повышении надежности ТОТ ПГ;

частое проведение ВТК ТОТ ПГ в полном объеме требует значительных затрат и существенно влияет на общую продолжительность ППР, а значит, и на КИУМ АЭС.

Перспективным подходом в задаче оптимизации периодичности ВТК ТОТ ПГ является метод, разработанный в ФГУП ОКБ «Гидропресс» [1], который положен в основу руководящего документа «Росэнергоатом» к методическим рекомендациям по оптимизации объемов и периодичности вихретокового контроля ТОТ ПГ.

Настоящая работа посвящена развитию и дополнению этого подхода.

Основные положения

Обобщенная оценка допустимой периодичности ВТК металла ТОТ ПГВ на основе вероятностного подхода [1] включает следующие основные этапы:

анализ исходной информации;

установление зависимости количества дефектов от длительности периода между ВТК;

оценку 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;

оценку допустимого количества дефектов в ТОТ одного ПГ для соответствующего критерия глушения;

оценку допустимых объемов контроля и периодов между ВТК металла ТОТ для каждого ПГ.

Анализ исходной информации по ТОТ ПГВ-440 и ПГВ-1000 включает:

анализ результатов ВТК;

анализ механических свойств;

анализ характеристик разрушения;

анализ режимов эксплуатации и соответствующего им напряженного состояния.

Анализ результатов ВТК в разные ППР [1] показал, что зависимость количества дефектов от периода между ВТК можно аппроксимировать в виде кусочно-линейной функции

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

где $k(t + \Delta t)$, $k(t)$ - количество дефектов в ТОТ в разные моменты времени, шт.; $\Delta k_{cp}(t)$ - прирост количества дефектов за 1 год, шт./год; Δt - интервал времени между ВТК, год.

Прирост количества дефектов за 1 год $\Delta k_{cp}(t)$ может быть определен двумя способами [1]:

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 в [1] подход оценки Δk_{cp} следует признать избыточно консервативным.

Вероятностный анализ разрушения участка ТОТ ПГ выполняется в [1] с использованием вычислительной программы МАВР-1.1. В использованной методике предполагается, что:

распределение вероятности нахождения k дефектов ($k = 1, 2, 3, \dots$) по длине ТОТ описывается распределением Пуассона

$$P(k) = \mu_0^k \exp[-\mu_0]/k!,$$

где μ_0 - математическое ожидание количества дефектов в эталонной области (например, длина участка трубы);

повреждения группы ТОТ могут быть описаны биномиальным распределением при условии, если ТОТ находятся в одинаковых условиях воздействия режимов эксплуатации и среды второго контура и разрушение одной трубы не влияет на разрушения других труб:

$$P_0^i(t) = C_0^i (P(t))^i [1 - P(t)]^{n-i},$$

где $P(t)$ - вероятность разрушения одной ТОТ за промежуток времени t , принимаемой одинаковой для группы ТОТ; C_0^i - биномиальный коэффициент.

В результате проведенных расчетов оцениваются вероятности образования сквозных трещин и, соответственно, возникновения течей, а также вероятности крупномасштабного разрушения для каждого рассмотренного периода между ВТК: 1 год, 2 года, 4 года, 6 лет, 8 лет, 10 лет.

В основу выбора критерия, обеспечивающего необходимый уровень надежности ТОТ, положены три основных принципа [1]:

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

надежная работа ТОТ должна обеспечивать выполнение ПГ своих теплотехнических функций,

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

На основе первого принципа по данным из вероятностного анализа безопасности (ВАБ) рассматриваемого энергоблока определяется допустимый 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. Т.е. эта вероятность «разрыва теплообменной трубы», характеризующая надежность ПГ, соответствуют такому (допускаемому) уровню надежности, 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 ПГВ. 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.

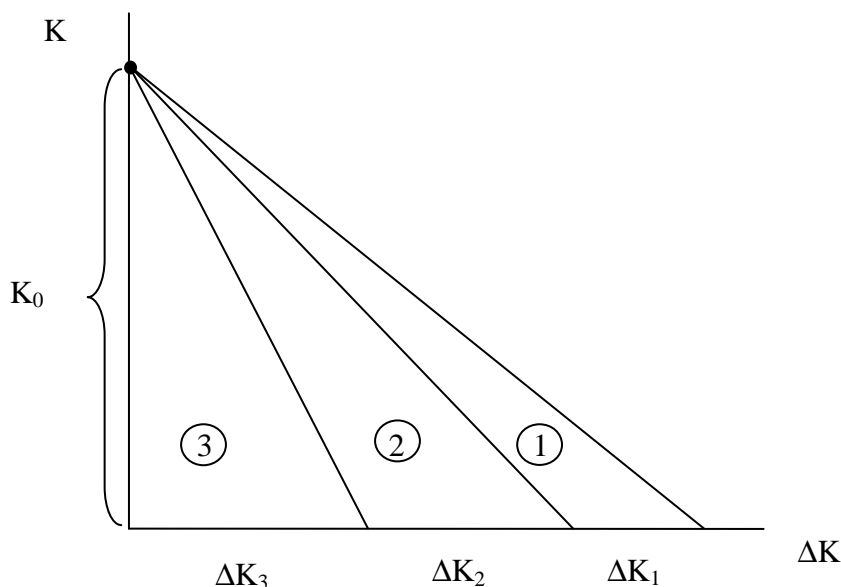
Если полученный уровень показателей надежности ТОТ не удовлетворяет критерию надежности, то выполнение этого критерия можно обеспечить, например, за счет изменения периодичности контроля металла, разработки требований к дефектоскопическому контролю в части допускаемых размеров дефектов.

Допускаемый период между ВТК определяется на основе критерия надежности, заключающегося в сравнении вероятностей течей и разрыва ТОТ 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 ТОТ, 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.:

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

На основе построенных диаграмм «количество индикаций – прирост количества индикаций в год» разрабатываются рекомендации по допустимым объемам и периодам ВТК.

В результате в [1] разработаны обобщенные диаграммы количества индикаций (k) от прироста количества индикаций в год (Δk) для различных ПГ (ПГ-440, ПГ-1000) при разных критериях глушения ТОТ ПГ (60 и 70 %), которые представлены на рисунке.



Обобщенные диаграммы [1] по изменению ВТК ТОТ ПГ:

- 1 – периодичность ВТК один раз в год; 2 – периодичность ВТК один раз в 4 года;
3 – периодичность ВТК один раз в 8 лет.

Важно отметить, что представленные обобщенные диаграммы применимы и для критических зон (M , % от общего количества труб). При условии, что плотность дефектности для остальной зоны $(100 - M)$ % не превышает

$$P_{ост} < \frac{1}{100} \times \frac{(100 - M)}{M} \times P_{кр},$$

где $p_{ост}$ – плотность распределения дефектов в некритической (остаточной) зоне; $p_{кр}$ – плотность распределения дефектов в критической зоне; M – количество ТОТ в критической зоне от общего количества ТОТ, %.

Одним из основных ограничений подхода [1] по оценке допустимых объемов и периодов ВТК ТОТ 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 известно, что не всегда 100 %-ный объем ВТК проводился/проводится для всех ТОТ 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 ТОТ ПГ, и согласно подходу [1] может быть рекомендовано дальнейшее снижение периодичности ВТК.

С учетом этих фактов, критерии обобщенной диаграммы изменения допускаемой периодичности ВТК (см. рисунок) корректнее представить в следующем виде:

по общему числу дефектов

$$K = \sum_{j=1}^{n_{ТОТ}} \sum_{i=1}^{n_{ВТКj}} K_{ij}(\Delta t_{ij}) + n_H \cdot P(t), \quad (1)$$

по приросту дефектов

$$K = \sum_{j=1}^{n_{ТОТ}} (\Delta k_{nj}) + n_{НП} \cdot P(\Delta t), \quad (2)$$

где k_{ij} – количество критических дефектов, обнаруженных за период Δt_{ij} 100 % ВТК; $i = 1, \dots, n_{ВТКj}$ – количество проведенных 100 % ВТК для j -й ТОТ ПГ; j – количество ТОТ ПГ; $n_H, n_{НП}$ – количество ТОТ ПГ, не прошедших ВТК соответственно за период эксплуатации и в текущий период; $P(T), P(\Delta t)$ – вероятность возникновения критических дефектов соответственно за весь период эксплуатации T и за период после ближайшего ВТК.

В случае отсутствия ТОТ ПГ, не прошедших ВТК, критерии (1) и (2) фактически соответствуют критериям обобщенной диаграммы [1].

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

С позиций консервативности можно полагать, что $P(T), P(\Delta t) = 1$.

Условиями принятия решений о переходе на периодичность ВТК являются: один раз в год

$$K_0 \left(1 - \frac{\Delta K}{\Delta K_2} \right) < K \leq K_0 \left(1 - \frac{\Delta K}{\Delta K_1} \right), \quad (3)$$

один раз в 4 года

$$K_0 \left(1 - \frac{\Delta K}{\Delta K_3} \right) < K \leq K_0 \left(1 - \frac{\Delta K}{\Delta K_2} \right), \quad (4)$$

один раз в 8 лет

$$K \leq K_0 \left(1 - \frac{\Delta K}{\Delta K_3} \right), \quad (5)$$

где значения $K, \Delta K$ определяются соответственно по зависимостям (1), (2) с учетом фактической эксплуатационной статистики по критическим дефектам ТОТ ПГ.

Дополнительные условия принятия решений для изменения периодичности контроля по количеству ТОТ, не прошедших ВТК, следует из формул (3) – (5):

для области один раз в год

$$n_H + K_0 \frac{\Delta K}{\Delta K_1} n_{НП} \leq K_0 - \sum_{j=1}^{n_{ТОТ}} \sum_{i=1}^{n_{ВТК_j}} K_{ij} (\Delta t_{ij}), \quad (6)$$

для области один раз в 4 года

$$n_H + K_0 \frac{\Delta K}{\Delta K_2} n_{НП} \leq K_0 - \sum_{j=1}^{n_{ТОТ}} \sum_{i=1}^{n_{ВТК_j}} K_{ij} (\Delta t_{ij}), \quad (7)$$

для области один раз в 8 лет

$$n_H + K_0 \frac{\Delta K}{\Delta K_3} n_{НП} \leq K_0 - \sum_{j=1}^{n_{ТОТ}} \sum_{i=1}^{n_{ВТК_j}} K_{ij} (\Delta t_{ij}). \quad (8)$$

Таким образом, полученные условия перехода на допустимую периодичность проведения ВТК (3) – (8) являются более корректными и консервативными по отношению к рекомендациям ФГУП ОКБ «Гидропресс» [1], так как учитывают ТОТ ПГ, не прошедшие ВТК. Использование оценок вероятности возникновения критических дефектов в течение времени позволяют сделать более реалистическими дополнительные условия принятия решений по ограничению количества ТОТ ПГ, не прошедших ВТК.

Другим ограничением подхода ФГУП ОКБ «Гидропресс» по оптимизации периодичности ВТК ТОТ ПГ является, на наш взгляд, отсутствие учета динамики накопления отказов, вызванных появлением критических дефектов. Фактически в [1] заложены (и вполне обоснованно) критерии надежности, отражающие безопасность реакторных установок и выполнение проектных функций. Именно на основе анализа этих критериев и обосновывается решение о возможности изменения периодичности ВТК ТОТ ПГ, которое должно учитывать тенденции накопления критических дефектов. Если критерии безопасности и надежности эксплуатации ПГ даже выполняются со значительным запасом, но при этом имеет 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.

Поскольку по опыту эксплуатации ПГ АЭС С ВВЭР накоплена значительная статистика повреждений ТОТ ПГ, то наиболее целесообразно для получения дополнительного критерия, учитывающего динамику появления критических дефектов, использование известных теоретических положений по *анализу трендов потока отказов* (см. например, [5, 6]). Согласно этому подходу, оценка тенденции изменения надежности ТОТ ПГ во времени t может ставиться как задача анализа тренда параметра потоков отказов (появления критических дефектов) $\lambda(t)$. Для проверки тренда параметров потока отказов эффективна методика, основанная на применении критерия инверсий. Этот критерий обладает достаточной чувствительностью для выявления монотонной составляющей тренда и позволяет естественно формализовать задачу анализа тренда применительно к реальным статистическим данным об отказах. Исходными данными являются данные об отказах однотипных элементов АЭС в условиях эксплуатации в период наблюдения, на котором анализируется тренд. Элементы могут принадлежать одной совокупности либо разным совокупностям, но на всем периоде наблюдения число N наблюдаемых элементов должно быть одинаковым. Период наблюдения, который может быть непрерывным либо кусочно-непрерывным, разбивается на m равных непрерывных интервалов $(t_i, t_i + \Delta t)$, $i = \overline{0, m}$ и определяется число отказов n_i в каждом таком интервале.

Из принятия гипотезы $\lambda(t) = \text{const}$ следует, что при указанных условиях статистические оценки $\bar{\lambda}_i$ параметра потока отказов в интервалах наблюдения, определяемые по формуле

$$\overline{\lambda}_i = \frac{n_i}{N \Delta t}, \quad (\text{П 4.1})$$

а значит, и числа отказов n_i , являются одинаково распределенными случайными величинами. В этом случае проверка тренда параметра потока отказов сводится к проверке тренда последовательности $\{n_i\}, i = 0, m$, в которой значения n_i упорядочены по времени.

Для каждого значения n_i определяется число инверсий – случаев A_i , когда $n_i > n_j$, при $i < j$:

$$A_i = \sum_{j=i+1}^m h_{ij}.$$

При принятом для проверки гипотезы уровне значимости α область принятия гипотезы об отсутствии тренда (возрастающего либо убывающего) определяется неравенством

$$A_H < A \leq A_B,$$

где нижняя A_H и верхняя A_B границы области зависят от числа m членов последовательности, уровня значимости α и являются квантилями распределения случайной величины A , соответствующими вероятностям $P\{A > A_H\} = 1 - \alpha/2$ и $P\{A > A_B\} = \alpha/2$.

Значения $A < A_H$ соответствуют возрастающему характеру тренда, определяемому относительно малым числом инверсий. Значения $A > A_B$ соответствуют убывающему характеру тренда, определяемому относительно большим числом инверсий.

С точки зрения возможности сокращения периодичности ВТК ТОТ ПГ дополнительным условием, характеризующим тенденцию невозрастания потоков критических дефектов, является

$$A > A_B. \quad (9)$$

Основные выводы

В настоящей работе в рамках развития подхода ФГУП ОКБ «Гидропресс» по оптимизации периодичности вихретокового контроля ТОТ ПГ ВВЭР предложены дополнительные условия (6) – (9) по обоснованию возможности сокращения периодичности контроля, консервативно учитывающие влияние неполноты объемов контроля и динамику накопления критических дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев В.А., Шубин А.А., Трунов Н.Б. и др. Разработка подхода к оценке оптимальной периодичности вихретокового контроля теплообменных труб горизонтальных парогенераторов // Тр. ФГУП ОКБ «Гидропресс». – 2006.
2. Григорьев В.А., Уланов В.В., Шубин А.А. и др. Обоснование требований к вихретоковому контролю теплообменных труб горизонтальных парогенераторов // 7-я Междунар. конф. по парогенераторам. – Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс». – 2006.
3. Григорьев В.А. Прикладное значение критерия надежности при оценке ресурса элементов реакторных установок // Тр. 7-й Междунар. конф. "Материаловедческие проблемы при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС", Санкт-Петербург, 17 - 21 июня 2002 г. - Санкт-Петербург, 2002. - Т. 3. - С. 150 - 162.
4. Трунов Н.Б., Денисов В.В., Бергункер В.Д. и др. Обеспечение безопасности, надежности и ресурса работы трубчатки ПГ АЭС с ВВЭР-1000 // Сб. тр. третьей науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 26 – 30 мая 2003 г.
5. Острейковский В.А. Эксплуатации АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928 с.
6. Ястребенецкий М.А., Васильченко В.Н., Виноградская С.В. и др. Безопасность АС. Информационные и управляющие системы. - К.: Техника, 2004.

Поступила в редакцию 10.04.07

РОЗВИТОК ПІДХОДУ З ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ПЕРІОДИЧНОСТІ ВИХРОВОГО СТРУМОВОГО КОНТРОЛЮ ТЕПЛООБМІННИХ ТРУБ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ АЕС ІЗ ВВЕР**Д. В. Білей, В. М. Пишний, В. І. Скалозубов, В. В. Урбанський**

Розвивається розроблений раніше підхід ФГУП ОКБ "Гідропрес" по оцінці оптимальної періодичності вихрового струмового контролю теплообмінних труб парогенераторів АЕС із ВВЕР. Сформульовано додаткові умови обґрунтованої зміни періодичності контролю з урахуванням неповного обсягу проведених робіт із діагностики стану теплообмінних труб парогенератора та динаміки утворення критичних дефектів.

DEVELOPMENT OF APPROACH IN SUPPORT OF OPTIMAL PERIODICITY OF EDDY CURRENT INSPECTION OF HEAT-EXCHANGE PIPES OF STEAM GENERATORS OF NPPs WITH VVER**D. V. Biley, V. M. Pyshniy, V. I. Skalozubov, V. V. Urbanskiy**

The paper develops an approach for assessment of optimal periodicity of eddy current inspection of heat-exchange pipes of steam generators of VVER, WHICH worked out by ОКБ "Hydropress". The additional conditions for a founded change of inspection periodicity are formulated taking into account an incompleteness of works on diagnostics of status of heat-exchange pipes of steam generator and the dynamics of critical defects.