

УДК 620.179.147

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТА ТИПА ТРЕЩИНА В ПАРОГЕНЕРАТОРНЫХ ТРУБАХ***В. П. ЛУНИН, М. С. ДОБРОКЛОНСКАЯ***

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

UDC 620.179.147

ESTIMATION OF PROBABILITY OF DETECTING A CRACK TYPE DEFECT IN STEAM GENERATOR TUBES***V. P. LUNIN, M. S. DOBROKLONSKAYA***

Аннотация. Одной из наиболее актуальных проблем атомной энергетики является задача обеспечения высокой эксплуатационной надежности и безопасности элементов ядерных энергетических установок, в частности, теплообменных труб парогенераторов атомных электростанций. Одним из важнейших параметров, который может повлиять на оценку риска аварий, является количественная оценка достоверности и надежности вихретокового контроля, которая выполняется путем определения кривых вероятности обнаружения (Probability of Detection, PoD) дефектов. Экспериментальное определение кривых PoD требует большого количества испытательных образцов с реальными и/или реалистичными дефектами для получения надежных результатов, что делает этот процесс сложной и трудоемкой задачей. В соответствии с ГОСТ Р 50.04.07–2018, в работе проведена оценка показателей достоверности контроля через расчет кривых PoD с помощью адекватной численной модели для наиболее типичного дефекта теплообменных труб – стресс-коррозионной трещины. На трехмерной конечно-элементной модели рассчитаны сигналы от 125 вариантов реализации геометрии трещины на трех частотах. Полученные данные использованы для построения кривых PoD на каждой из частот. Отмечается, что с точки зрения достоверности предпочтительнее использовать частоту 200 кГц.

Ключевые слова: вероятность обнаружения дефектов, многочастотный вихретоковый контроль, конечно-элементное моделирование, стресс-коррозионная трещина.

Abstract. One of the most urgent problems for nuclear power is the task of ensuring high operational reliability and safety of nuclear power plants elements, in particular, steam generator heat exchange tubes of nuclear power plants. One of the most important parameters that can affect the assessment of the risk of accidents is the quantitative assessment of the reliability of eddy current testing, which is performed by determining the curves of the probability of detection (Probability of Detection, PoD) of defects. Experimental determination of PoD curves requires a large number of test samples with real and/or realistic defects to obtain reliable results, which makes this process very difficult and time-consuming task. In accordance with GOST R 50.04.07–2018, the work assessed the reliability indicators of testing through the calculation of PoD curves using an adequate numerical model for the most typical defect in heat exchange pipes – a stress corrosion crack. On a three-dimensional finite element model, the signals from 125 variants of the implementation of the fracture geometry at three frequencies were calculated. The obtained data were used to plot PoD curves at each of the frequencies. It is noted that from the point of view on reliability, it is preferable to use a frequency of 200 kHz.

Keywords: probability of detecting defects, multifrequency eddy current testing, finite element modeling, stress-corrosion cracks.

Введение. Сегодня очень актуален вопрос безопасности и надежности атомной энергетики, т. к. развитие этой отрасли одно из основных условий обеспечения энергоне­зависимости государства. Увеличение числа атомных электростанций (АЭС) и размещение их в районах с высокой плотностью населения требует высокого уровня надежности оборудования. Парогенератор (ПГ) на АЭС является составной частью циркуляционной петли ядерной паропроизводящей установки и относится к изделиям первого класса безопасности.

Чтобы обеспечить экономическую эффективность, парогенераторы АЭС вынуждены работать в очень напряженных режимах, теплообменные трубы (ТОТ) эксплуатируются в условиях больших перепадов давления, высоких рабочих температур и значительных механических нагрузок. При эксплуатации парогенераторов на ТОТ образуются дефекты, которые могут стать причиной разгерметизации первого контура АЭС. Поэтому необходимо систематически контролировать ТОТ во время эксплуатации и вовремя принимать меры для предотвращения аварийных ситуаций.

В технических требованиях на методику [1] количественные требования к задаваемой достоверности неразрушающего контроля должны содержать, в частности, численную оценку вероятности выявления дефектов применительно к конкретным типам и размерам дефектов.

Многочастотный вихретоковый метод на сегодня практически безальтернативный способ диагностики ТОТ, который предполагает контроль изнутри трубы при сканировании дифференциальным аксиальным преобразователем внутренней поверхности трубы и считывание сигналов через каждые 0,2...1,0 мм [2].

Характеристическим параметром дефекта, подлежащего выявлению с использованием стандартной методики вихретокового контроля ТОТ, является его глубина, выражаемая в процентах от толщины стенки трубки (1,5 мм). По глубине трещины определяется степень ее опасности и принимается решение о глушении трубки. Согласно стандартной методике, основным информативным параметром для определения глубины дефекта является угол наклона годографа соответствующего сигнала, для чего предварительно строится калибровочная характеристика для всех рабочих частот на основе сигналов, полученных на специальном калибровочном образце (рис. 1).

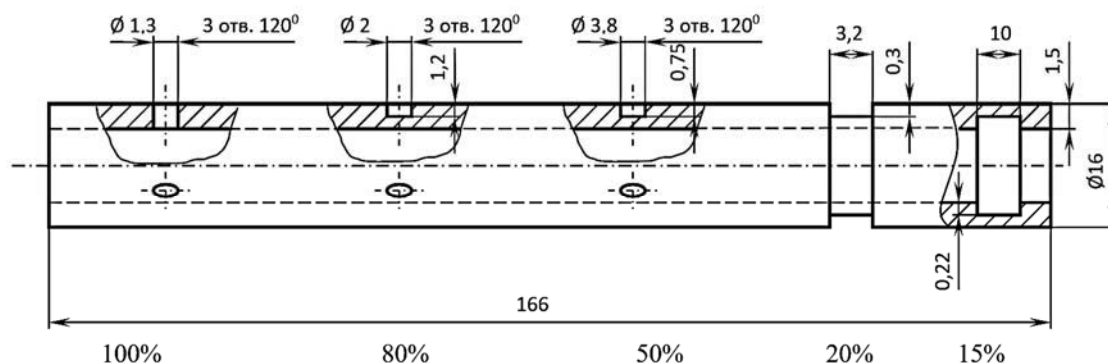


Рис. 1. Схема расположения дефектов на калибровочной трубке

Калибровочный образец – это трубка из такой же аустенитной стали, что и реальные теплообменные трубки. На нее нанесены пять калибровочных отверстий (по три в каждом сечении, расположенных под углом 120° по отношению друг к другу): три внешних сверления глубиной 50 %, 80 % и 100 % от толщины стенки трубки, одна внешняя проточка глубиной 20 % и одна внутренняя проточка глубиной 10 %.

Нормировка и калибровка выполняется в соответствии с методикой для многочастотного метода на частотах 25, 100 и 200 кГц, при этом угол наклона годографа от сквозного дефекта на каждой частоте принимается равным 40° , а амплитуда сигнала – 10 В. В соответствии с этими опорными параметрами проводят аффинную коррекцию амплитуд и углов наклона годографов сигналов остальных калибровочных дефектов.

Постановка задачи. До 95 % всех выявляемых дефектов располагаются на внешних стенках ТОТ, а преобладающим типом дефекта является стресс-коррозионная трещина. Чтобы построить качественную кривую вероятности обнаружения [3], нужно провести большое количество экспериментов с реальными дефектами, с искусственными (выполненными в лабораторных условиях) дефектами, а также, по возможности, проанализировать многолетние архивные данные.

В работе реализован подход, опирающийся на использование при расчетах сигналов адекватной математической модели на базе метода конечных элементов. Это позволяет в процессе имитационного моделирования использовать расчеты для решения задачи определения наиболее сложных для выявления дефектов из числа приведенных в технических требованиях, в частности, трещин со сложным геометрическим профилем, а также выявить их влияние в наихудших дефектных ситуациях. Наиболее интересны случаи, когда контролируемые дефекты с одинаковой глубиной имеют разброс по другим параметрам (по длине, раскрытию, по форме).

Выбор параметров моделей. В рамках работы для создания конечно-элементных трехмерных моделей использовался пакет COMSOL Multiphysics. Поскольку задачи трехмерные, расчет каждого из вариантов занимал порядка 5...8 ч. Предварительно была смоделирована ситуация с контролем калибровочной трубки и сопоставлены прогнозируемые (расчетные) сигналы от всех дефектов на трех разных частотах с экспериментальными сигналами, полученными на реальной вихретоковой установке. После операций нормировки и калибровки максимальная разница в угле наклона годографов сигналов составила 4° .

Моделирование каждого дефекта типа трещина проводилось для трех частот, пяти глубин (20 %, 40 %, 60 %, 80 % и 100 % от толщины стенки) и пяти длин (протяженности вдоль оси – 2, 4, 6, 8 и 10 мм). Были выбраны три геометрические формы профиля трещины для моделирования – прямоугольная, треугольная и равнобедренная трапеция с тремя вариантами наклона ребер – 30° , 45° и 60° (рис. 2).

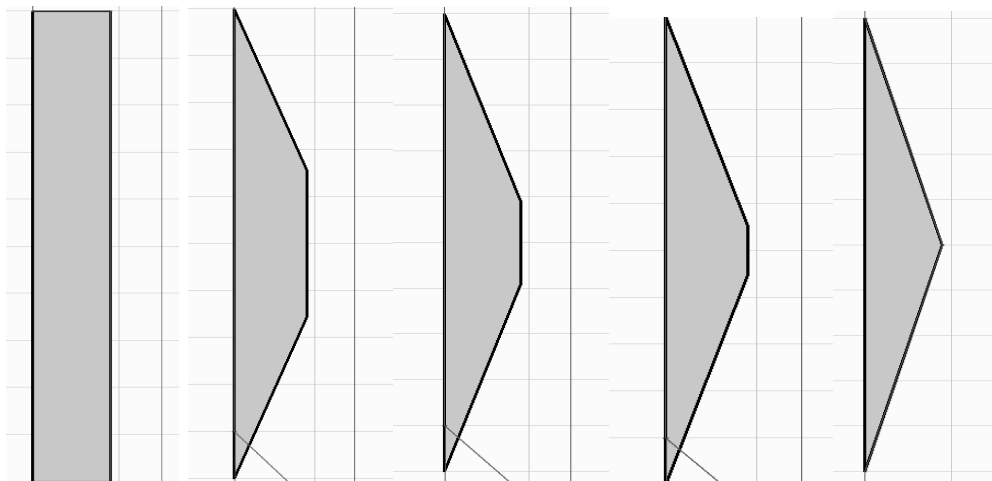


Рис. 2. Различные профили модельных трещин одинаковой глубины

Построение кривых вероятности обнаружения. Для расчета графиков вероятности обнаружения дефектов была использована программа mh1823, использующая так называемый метод a-vs-ahat (алгоритм численного отклика) [4] и уже опробована нами в решении подобных задач для ультразвукового контроля [5]. На основании полученных модельных данных для групп дефектов типа трещина с фиксированной глубиной, но имеющих разброс по длине и по форме профиля, программой были построены кривые вероятности обнаружения этих дефектов отдельно для каждой из частот 25, 100 и 200 кГц. На каждом из фрагментов (рис. 3) слева приведены исходные данные для получения коэффициентов линейной регрессии, а справа – рассчитанные кривые PoD. Анализ полученных кривых вероятности PoD для разных частот указывает на то, что с точки зрения достоверности обнаружения трещин некоторое предпочтение следует отдать контролю на частоте 200 кГц. По стандартной методике основной частотой является 100 кГц.

Закключение. Трещины могут образовываться как на открытых участках труб, так и располагаться в окружении других металлических объектов, которые искажают сигнал преобразователя. В первую очередь, это конструктивные элементы (дистанционирующие и антивибрационные решетки), дающие сигналы, которые маскируют сигналы от дефектов, а также эксплуатационные факторы, которые сопровождают процесс получения данных, при этом эти факторы нередко трудно контролируем (например, отложения с содержанием меди и/или магнетита). Поэтому следующим этапом в исследованиях, направленных на количественную оценку достоверности вихретокового контроля ТОТ парогенераторов АЭС, станет этап получения кривых PoD для случаев наихудших дефектных ситуаций, когда дефект (трещина) находится, например, под дистанционирующей решеткой в окружении магнетитного отложения. Подобные задачи невозможно решать без эффективных цифровых моделей [6].

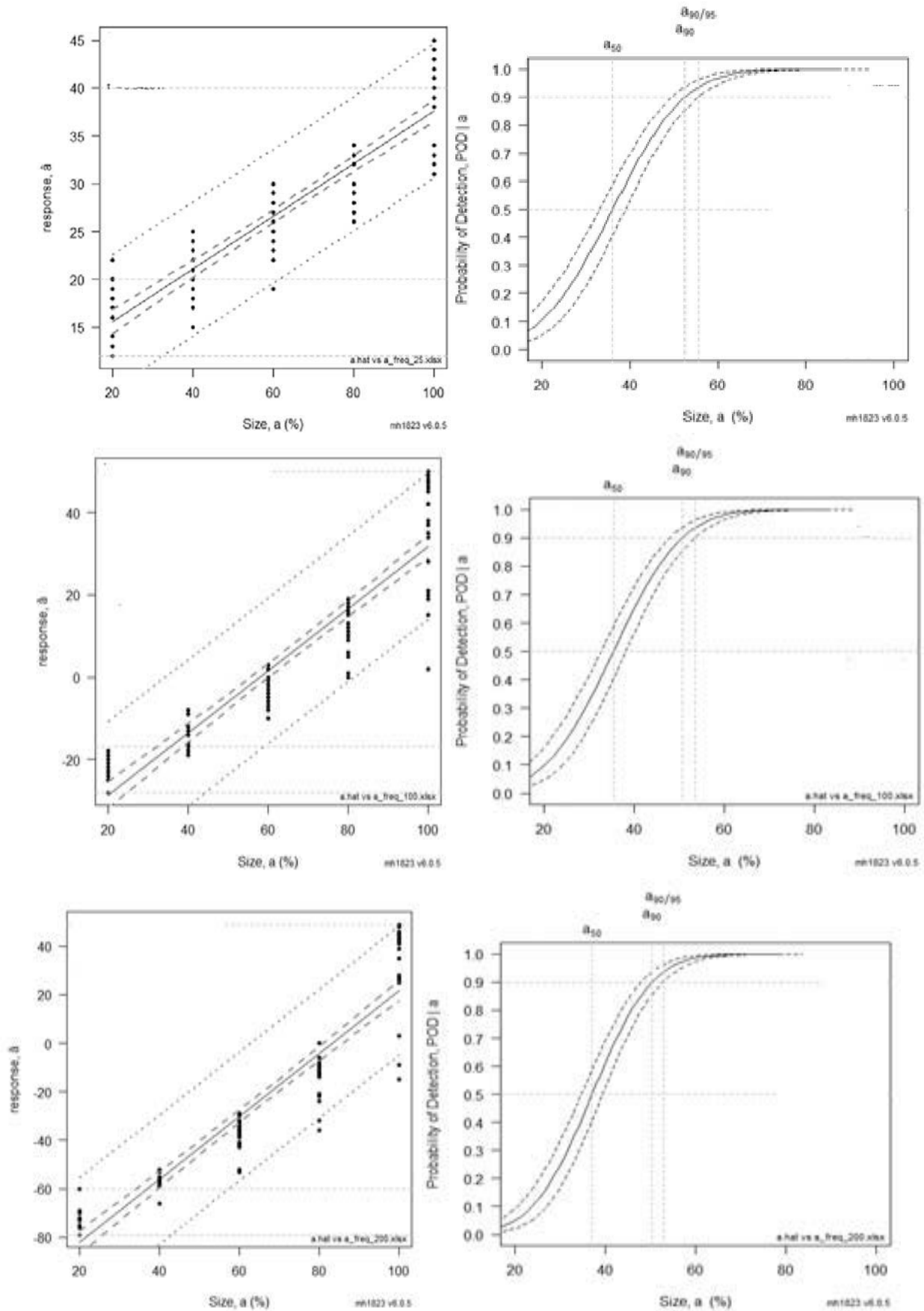


Рис. 3. Данные для расчета коэффициентов регрессии (слева) и кривые PoD (справа) для 25 кГц (вверху), 100 кГц (посередине) и 200 кГц (внизу)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р 50.04.07–2018.** Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме испытаний. Аттестационные испытания систем неразрушающего контроля. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 35 с.
2. **Лунин, В. П.** Проектирование программно-алгоритмических средств для систем электромагнитного контроля энергетического оборудования / В. П. Лунин. – Москва: МЭИ, 2016. – 196 с.
3. Detection of ODS-CC in SG tubes depending on the size of the crack and on the presence of sludge deposits / Hansub Chung [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 46, iss. 6. – P. 869–874.
4. Режим доступа: <http://StatisticalEngineering.com/mh1823>.
5. **Пилюгин, С. О.** Определение вероятности обнаружения дефектов в сварных швах при ультразвуковом контроле фазированной решеткой / С. О. Пилюгин, В. П. Лунин // Дефектоскопия. – 2016. – № 6. – С. 35–41.
6. **Лунин, В. П.** Перспективы использования цифровых моделей для решения актуальных задач в атомной энергетике / В. П. Лунин, А. Г. Жданов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы 7 Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 сент. 2020 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 106–113.

E-mail: LuninVP@mpei.ru, m.dobro42@gmail.com.