

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ ДО НАГРЕТОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ КОНТРОЛЯ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТВС ВВЭР-1000 В БАССЕЙНЕ ВЫДЕРЖКИ АЭС

Воронина А.В., Павлов С.В.

ФГАОУ ВО «Дмитровградский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Ульяновская обл.

AVVoronina@mephi.ru

Аннотация. В работе представлены результаты численного моделирования измерения расстояния до нагретой поверхности ультразвуковым методом с использованием математической модели акустического тракта, разработанной в приближении геометрической акустики. Предполагается, что конвективный слой у нагретой поверхностью состоит из плоскопараллельных однородных слоев с монотонно убывающим от нагретой стенки профилем температуры. Оценка применимости модели для моделирования измерения расстояния проводилась путем сопоставления численных и экспериментальных данных, полученных авторами при исследовании факторов, влияющих на результаты измерений. Удовлетворительное совпадение полученных расчетных данных с экспериментами говорит и возможности применимости представленной модели. В качестве примера использования модели было проведено моделирование измерения формоизменения ТВС ВВЭР-1000 ультразвуковым методом.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, модель, естественная конвекция, ТВС, формоизменение

DISTANCE MEASUREMENT SIMULATION BY ULTRASONIC METHOD TO A HEATED VERTICAL SURFACE AS APPLIED TO THE PROBLEM OF CONTROLLING THE FORMING WWER-1000 FUEL ASSEMBLIES IN COOLING POND OF NUCLEAR POWER PLANT

Voronina A.V., Pavlov S.V.

*Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of National Research Nuclear University
MEPhI, Ulyanovsk region*

Abstract. The report presents the results of numerical simulation of measuring the distance to a heated surface by the ultrasonic method using a mathematical model of the acoustic path developed in the geometrical-acoustics approximation. It is assumed that the convective layer near the heated surface consists of plane-parallel homogeneous layers with a temperature profile monotonically decreasing from the heated wall. The assessment of the applicability of the model for modeling distance measurements was carried out by comparing the numerical and experimental data obtained by the authors in the study of factors affecting the measurement results. The satisfactory agreement of the calculated data obtained with the experiments indicates the possibility of the applicability of the presented model. As an example of using the model, was simulated the measurement of the forming of WWER-1000 fuel assemblies by the ultrasonic method.

Keywords: ultrasonic method, model, natural convection, fuel assemblies, forming

Контроль формоизменения ТВС в бассейне выдержки на атомной станции проводят на стендах инспекции ТВС, которые получили широкое применение в мире. Применительно к ТВС ВВЭР-1000 параметрами, характеризующими ее формоизменение, является прогиб, угол скручивания и размер под «ключ». Одним из возможных методов измерения линейных размеров ТВС рассматривается ультразвуковой метод (УЗ-метод). Данный метод является одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля благодаря простоте и удобству применения [1]. УЗ-метод измерения расстояния основан на измерении времени

распространения ультразвуковых волн (УЗ-волн) в среде до контролируемого объекта и обратно, с последующим вычислением расстояния от ультразвукового датчика до объекта [2].

Одной из особенностей контроля формоизменения ТВС является наличие остаточного тепловыделения, которое является причиной возникновения естественной конвекции у поверхности ТВС. Изменение условий распространения и отражения УЗ-волн вследствие естественной конвекции приводит к дополнительной методической погрешности метода.

Для разработки систем контроля формоизменения ТВС ВВЭР-1000, основанных на УЗ-методе, авторами разработана математическая модель акустического тракта [3]. Модель разработана в приближении геометрической акустики и учитывает влияние естественной конвекции на результаты измерений. В качестве приближения поверхность ТВС моделируется нагретой вертикальной поверхностью. Конвективный слой у поверхности рассматривается в виде системы плоскопараллельных однородных слоев с монотонно убывающим от нагретой стенки профилем температуры.

Время распространения УЗ-волн в модели определяется исходя из их траектории распространения [3]:

$$\tau = \frac{X - \frac{\delta_t}{\cos \alpha}}{c(T_\infty)} \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos 2\alpha}\right) + 2 \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{c(T(x)) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}} + \frac{2 \sin^2 \alpha}{c(T_\infty)^2 \cos 2\alpha} \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{c(T(x)) dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}} + \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k)$$

где X – расстояние от датчика до исследуемой поверхности; α – угол наклона поверхности ТВС; δ_t – толщина пограничного слоя; $c(T_\infty)$ – постоянное значение скорости звука при температуре воды T_∞ в бассейне выдержки вдали от ТВС; $T(x)$ – профиль температуры в пограничном слое; f – частота волны; k – отношение амплитуды порога A_0 и максимальной амплитуды сигнала A_{\max} .

Откуда измеренное расстояние датчиком $X_{\text{изм}}$ составит:

$$X_{\text{изм}} = \frac{c(T_\infty) \cdot \tau}{2}.$$

Таким образом, исходя из математической модели, на результаты измерений влияет профиль температуры в пограничном слое, наклонное падение УЗ-волн на поверхность пластины, а также связанная с этими двумя факторами рефракция: искривление направления движения УЗ-волны в среде с градиентом температур.

В работе представлены результаты численного моделирования измерения расстояния УЗ-методом с использованием математической модели акустического тракта. Расчетные данные были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в результате исследования влияния естественной конвекции и наклонного падения УЗ-волн на исследуемую поверхность на результаты измерения УЗ-методом. Отмечается хорошее согласие полученных результатов с экспериментами, что говорит о корректности математической модели акустического тракта и возможности ее применения для моделирования измерения расстояния УЗ-методом применительно к задаче контроля формоизменения ТВС.

Для моделирования измерения формоизменения ТВС УЗ-методом использовались результаты послереакторных исследований ТВС ВВЭР-1000. Моделирование происходило при следующих условиях и допущениях. Поверхность ТВС, расположенной в бассейне выдержки с температурой воды, равной 25 °С, моделировалась в виде плоской пластины с постоянной плотностью теплового потока, равной 5 кВт/м². Радиус датчика с резонансной частотой $f = 5$ МГц принимался равным 9 мм. Расстояние между датчиком и поверхностью в

начале пластины, где деформация отсутствует, предполагается исходным и принималось равным половине ближней зоны этого датчика. По высоте пластины расстояние между датчиком и поверхностью грани варьировалось в соответствии с ее прогибом. В качестве угла наклона поверхности использовались значения угла скручивания ТВС.

Результаты моделирования, полученные с помощью математической модели акустического тракта, представлены на рис. 1 в виде графиков погрешностей измерения проекций вектора прогиба УЗ-методом, обозначенных пунктирными линиями. Сплошными линиями на рис. 1 показаны проекции вектора прогиба ТВСА. В работе также рассмотрены причины, влияющие на характер изменения данной погрешности.

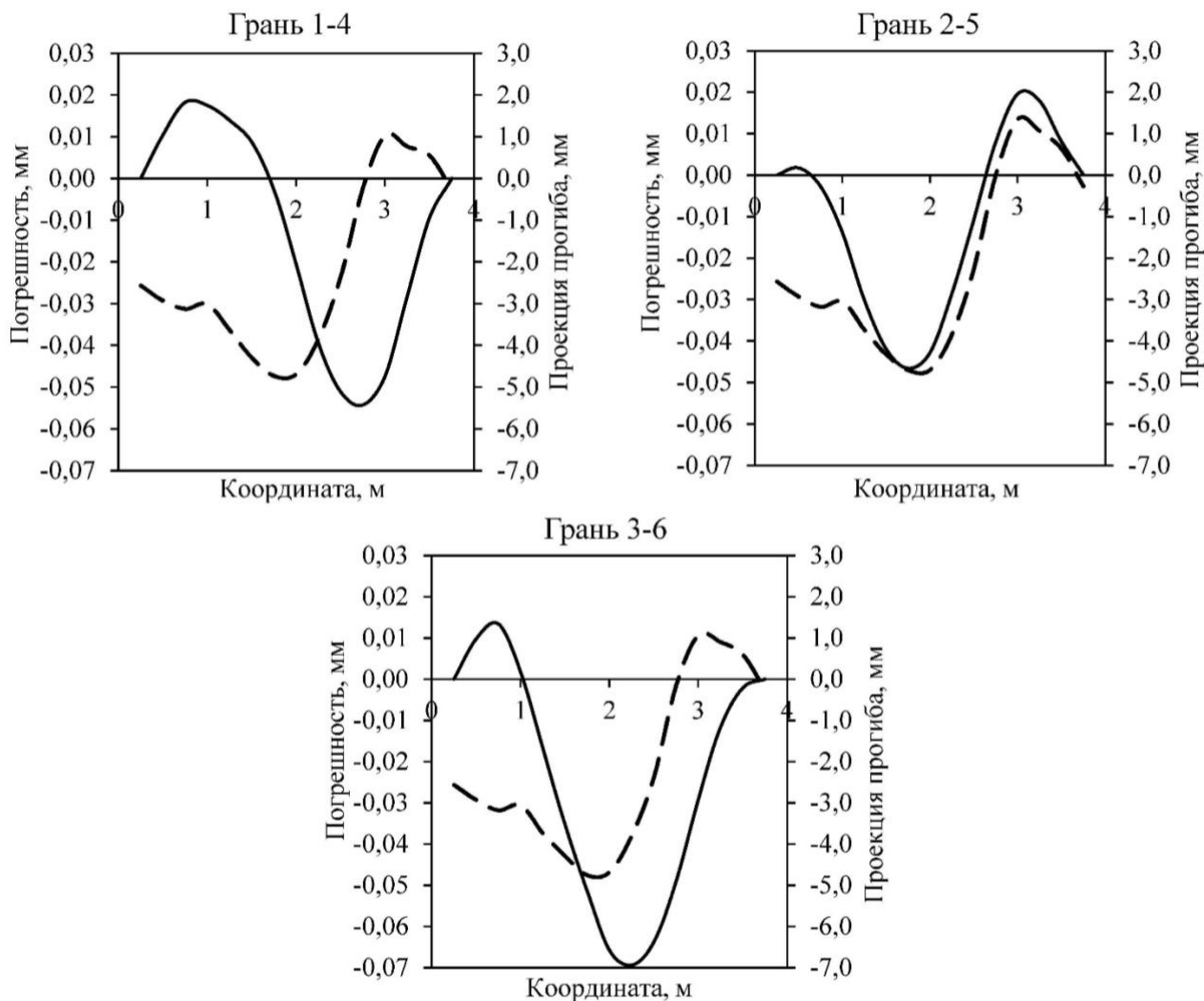


Рис. 1. Погрешность измерения проекций вектора прогиба ТВСА УЗ-методом:
 — — проекции вектора прогиба; — — — погрешность измерения

Использованные источники:

1. Ермолов, И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля / И. Н. Ермолов. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
2. Горбатов, А. А. Акустические методы измерения расстояний и управления / А. А. Горбатов, Г. Е. Рудашевский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 207 с.
3. Воронина, А. В. Математическая модель акустического тракта эхо-импульсного метода измерения геометрических параметров тепловыделяющей сборки ядерного реактора в приближении геометрической акустики / А. В. Воронина, С. В. Павлов // Вестник НИЯУ «МИФИ». – 2020. – Т.9. № 3. – С. 217–225. DOI: 10.1134/S2304487X20030104.