

## КОНТРОЛЬ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ТВС ВВЭР-1000 УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ НА АЭС

**А.В. Воронина\*, \*\*, С.В. Павлов\*, \*\*, С.В. Амосов\***

\* ООО НПФ «Сосны»

433507, Ульяновская обл., г. Димитровград, пр. Димитрова, 4а

\*\* ДИТИ НИЯУ МИФИ

433511, Ульяновская обл., г. Димитровград, ул. Куйбышева, 294



Разработана процедура определения геометрических параметров ТВС ультразвуковым эхо-импульсным методом, применимым для всех типов ТВС легководных реакторов. Проведение измерений геометрических параметров достигается расположением ультразвуковых датчиков попарно напротив граней дистанционирующей решетки ТВС на расстоянии не более половины протяженности ближней зоны акустического поля этих датчиков таким образом, чтобы акустические оси парных датчиков были параллельны друг другу. Достоинством представленного способа является возможность проводить контроль любых модификаций ТВС, в том числе и сборок реактора ВВЭР, с различным количеством дистанционирующих решеток.

Представлены математическая модель акустического тракта, разработанная в приближении геометрической акустики, и результаты ее верификации. С использованием модели выполнены расчетно-экспериментальные исследования ультразвукового метода и разработаны инженерные формулы для вычисления погрешности измерения датчиком расстояния до поверхности ТВС. Разработан программный комплекс, который позволяет моделировать контроль формоизменения ТВС и может быть использован при проектировании новых систем контроля. Разработанный метод определения геометрических параметров ТВС ВВЭР-1000 внедрен на первом и втором блоках АЭС «Темелин» (Чехия) для контроля формоизменения тепловыделяющих сборок конструкции ТВСА-Т. Успешное использование предлагаемого метода позволяет рекомендовать его для применения в стендах инспекции на других АЭС.

**Ключевые слова:** ультразвуковой метод, тепловыделяющая сборка, формоизменение, модель, естественная конвекция.

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе облучения в активной зоне (а.з.) реактора тепловыделяющая сборка (ТВС) претерпевает термические, радиационные и вибрационные воздействия и нагрузки. В результате возникают различные виды деформации, такие как прогиб, скручивание и удлинение, изменение размера «под ключ», депланация дистанционирующих решеток (ДР). Деформация ТВС может быть причиной нештатной работы органов регулирования и системы управления и защиты, поэтому проблема формоизменения ТВС является актуальной и требует особого внимания.

© А.В. Воронина, С.В. Павлов, С.В. Амосов, 2022

Исследования формоизменения ТВС вследствие эксплуатации в реакторе проводят либо в защитных камерах материаловедческих центров, либо на стендах инспекции, расположенных непосредственно на АЭС в бассейнах выдержки (БВ). Примером материаловедческого центра является АО «ГНЦ НИИАР», где исследуются, в частности, облученные ТВС ВВЭР-1000 со всех АЭС России [1, 2]. Распространенность стендов инспекции в мире объясняется оперативностью и экономичностью получения информации о состоянии ТВС сразу после их выгрузки из а.з. реактора по сравнению с исследованиями в защитных камерах. Реализуемые в настоящее время новые проекты АЭС с ВВЭР в России предусматривают в своем составе наличие стенда инспекции ТВС [3].

Для проекта «АЭС-2006» разработан стенд инспекции и ремонта, где контроль формоизменения ТВС осуществляется с помощью контактных дифференциально-трансформаторных датчиков линейных перемещений [4]. Альтернативным методом, применяемым на стендах инспекции, является бесконтактный метод. Отсутствие контакта с объектом исследования и простота конструкции упрощают процесс инспекции ТВС и повышают надежность стенда [5]. Для определения геометрических параметров в стенде инспекции, разработанном в Китае, используют ультразвуковой эхо-импульсный метод [6]. Излучаемые датчиком ультразвуковые волны (УЗ-волны) распространяются в воде до поверхности ТВС и после отражения от неё принимаются этим же датчиком. По известной скорости звука в воде и времени распространения УЗ-волны можно определить расстояние от датчика до поверхности ТВС. Совокупность полученных в ходе инспекции координат точек поверхности ТВС позволяет определить её геометрические параметры. Кроме созданного в Китае варианта стенда инспекции с ультразвуковым эхо-импульсным методом были разработаны и другие, отличающиеся между собой схемой и способом проведения измерений: стенд инспекции для ТВСА, разработанный в НИЯУ МИФИ [7]; французская система DAMAC, созданная для определения прогиба ТВС [8]; проект стенда инспекции для Балаковской АЭС, разработанный АО «ГНЦ НИИАР» и ОКБ «Гидропресс» [9]. Конструкция и принцип работы лабораторных и эксплуатируемых измерительных установок контроля, основанных на ультразвуковом методе, представлены в работе [10].

Несмотря на широкое применение ультразвукового метода в технике сегодня отсутствует общий инструментарий по разработке ультразвуковых систем контроля геометрических параметров ТВС. К тому же при использовании ультразвукового метода возникают трудности с оценкой погрешности получаемых результатов.

В статье описан новый ультразвуковой эхо-импульсный способ определения формоизменения ТВС ВВЭР в бассейне выдержки АЭС, который был успешно реализован на АЭС «Темелин» для инспекции ТВСА. Представлены математическая модель акустического тракта эхо-импульсного метода измерения расстояния от датчика до поверхности ТВС и результаты верификации модели. Разработан программный комплекс для моделирования процесса контроля формоизменения ТВС, который может также быть использован при разработке новых измерительных систем и методов контроля ТВС.

### **ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Для проведения инспекции ТВС, находящихся в БВ АЭС, разработан способ определения геометрических параметров ТВС ультразвуковым методом, заключающийся в следующем [11]. Ультразвуковые датчики (УЗ-датчики) располагают по периметру ТВС попарно напротив граней ДР на расстоянии не более половины протяженности ближней зоны акустического поля этих датчиков  $X_6$  (рис. 1).

Размер ближней зоны  $X_6$  равен

$$X_6 = R^2 \cdot f / c, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус пьезоэлемента, м;  $f$  – частота УЗ-волны, Гц;  $c$  – скорость звука в среде, м/с.

Например, для датчика, радиусом  $R = 0,01$  м, генерирующего УЗ-волны с частотой  $f = 5$  МГц, размер ближней зоны будет равен  $X_6 = 0,33$  м.

Когда исследуемая поверхность находится на расстоянии, не превышающем  $0,7X_6$ , амплитуда отраженного эхо-импульса УЗ-волн практически не меняется [9]. Таким образом, проведение измерений на расстоянии не более  $0,5X_6$  позволит стабилизировать метрологические характеристики ультразвукового метода.

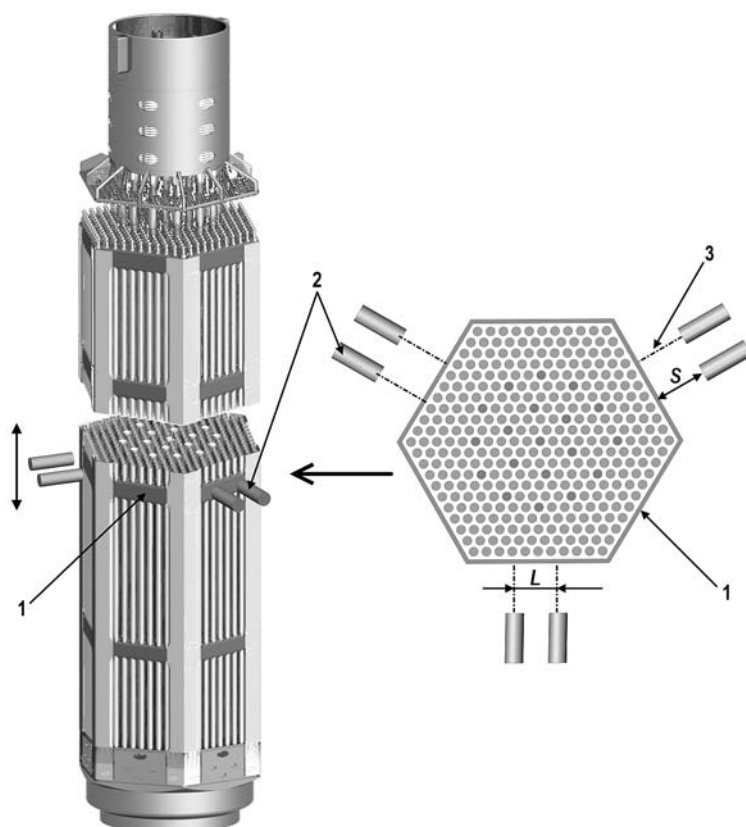


Рис. 1. Расположение УЗ-датчиков для определения геометрических параметров ТВС: 1 – ДР; 2 – УЗ-датчик; 3 – акустическая ось

Систему с УЗ-датчиками перемещают вдоль продольной оси ТВС, определяя расстояния между датчиками и гранями ДР по формуле

$$S = c \cdot \tau / 2, \quad (2)$$

где  $\tau$  – время распространения УЗ-волн от датчика до ТВС и обратно, с.

Расположение датчиков попарно позволяет определить угол поворота грани  $\alpha$ :

$$\alpha = \arctg(\Delta S_n / L_n), \quad (3)$$

где  $\Delta S_n$  – разность показаний датчиков, расположенных напротив  $n$ -й грани, м;  $L_n$  – расстояние между акустическими осями датчиков, расположенных напротив  $n$ -й грани, м.

Вычисленный угол позволяет внести поправку в определение расстояния  $S$  и снизить погрешность, возникающую при наклонном падении УЗ-волн. Эта погрешность

обусловлена неперпендикулярным отражением УЗ-волны от наклонной поверхности. Расстояние, измеряемое с учетом поправки на угол, составит

$$S = c \cdot \tau \cdot [1 + 1/\cos(2\alpha)]^{-1} + R \cdot \operatorname{tg}\alpha, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус пьезоэлемента, м;  $\alpha$  – угол поворота грани, вычисленный по формуле (3), град.

Для применения поправки на угол необходимо сначала определить расстояния от датчиков до поверхности по формуле (2), далее определить угол поворота грани  $\alpha$  и расстояние с учетом поправки по формуле (4) и затем повторно выполнить расчет угла  $\alpha$ . Данный подход при проведении измерений позволит уменьшить влияние наклонного падения на результаты метода.

Угол скручивания  $\psi$  для каждого сечения ТВС можно определить путем определения угла поворота всех граней относительно верхней или нижней ДР ТВС по формуле

$$\Psi = \Psi_0 - \Psi_i, \quad (5)$$

$$\Psi_i = \frac{1}{n} \left( \sum_1^n \operatorname{arctg} \frac{\Delta S_n}{L_n} \right), \quad (6)$$

где  $\Psi_0$  – угол поворота верхней или нижней ДР, град;  $\Psi_i$  – угол поворота  $i$ -й ДР, град;  $n$  – число граней ТВС.

Прогиб ТВС рассчитывается из полученного при инспекции массива координат точек поверхности ДР с помощью алгебраических вычислений.

Данный способ можно использовать для всех типов ТВС легководных реакторов, в том числе и сборок квадратной формы.

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА ЭХО-ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА**

При инспекции облученной ТВС вследствие наличия остаточного тепловыделения ЯТ у поверхности ТВС возникает тепловой пограничный слой. Он характеризуется наличием градиента температур, растущим в направлении снизу-вверх вдоль продольной оси ТВС. Профиль температур в условиях естественной конвекции зависит от режима течения жидкости, температуры воды в БВ, значения остаточного тепловыделения ЯТ.

Поскольку скорость ультразвука зависит от температуры среды, в которой происходит ее распространение, то возникает погрешность в определении расстояния между датчиком и гранью ДР. В дополнение к этому возникает погрешность, зависящая от наклонного падения УЗ-волн на поверхность. Кроме того в среде с градиентом температур необходим учет явления рефракции – искривления траектории распространения УЗ-волн.

Для определения зависимости погрешности измерения расстояния от представленных факторов разработана математическая модель акустического тракта ультразвукового метода [12]. Модель позволяет определить время распространения УЗ-волны от датчика до поверхности и обратно в ближней зоне датчика. Она разработана в приближении геометрической акустики и учитывает профиль температуры и рефракцию УЗ-волн.

Введём обозначения:  $\tau_1$  – время распространения УЗ-волны от датчика до пограничного слоя;  $\tau_2$  – время распространения УЗ-волны в пограничном слое;  $\tau_3$  – время распространения отраженной УЗ-волны до датчика после прохождения пограничного слоя;  $\Delta\tau_d$  – время, обусловленное способом регистрации эхо-импульса по его переднему фронту;  $X$  – расстояние от датчика до исследуемой поверхности вдоль

акустической оси датчика, м;  $\alpha$  – угол наклона поверхности ТВС, град;  $\delta_t$  – толщина теплового пограничного слоя, м;  $c(T_\infty)$  – постоянное значение скорости звука при температуре воды  $T_\infty$  в БВ вдали от ТВС, м/с;  $T(x)$  – профиль температуры в пограничном слое;  $f$  – частота УЗ-волны, Гц;  $k$  – отношение амплитуды порога  $A_0$  и максимальной амплитуды сигнала  $A_{\max}$ .

Тогда время распространения УЗ-волны можно представить выражением

$$\begin{aligned} \tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \Delta\tau_A = & \frac{X - R \cdot \operatorname{tg}\alpha - \frac{\delta_t}{\cos\alpha}}{c(T_\infty)} \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos 2\alpha}\right) + \\ & + 2 \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{c(T(x)) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin\alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}} + \\ & + \frac{2 \sin^2 \alpha}{c(T_\infty)^2 \cos 2\alpha} \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{c(T(x)) dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin\alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}} + \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k). \end{aligned} \quad (7)$$

Первые три слагаемых определяются по траектории распространения УЗ-волны в среде между датчиком и поверхностью ДР. Последнее слагаемое характеризует способ регистрации эхо-импульса. По причине наличия крутизны переднего фронта эхо-импульса возникает дополнительная погрешность определения расстояния, которая зависит от уровня порога  $A_0$ , по которому происходит измерение времени  $\tau$ . При увеличении  $A_0$  время  $\Delta\tau_A$  и, соответственно, погрешность увеличиваются [12].

Согласно (7), для расчета времени распространения УЗ-волны необходимы данные по толщине пограничного слоя и профилю температуры в нём. Для определения профиля температуры в условиях естественной конвекции у поверхности ТВС можно использовать результаты расчетно-экспериментальных исследований естественной конвекции или выполнить численное моделирование методами вычислительной гидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics).

На основании полуэмпирических соотношений, известных в литературе для определения характеристик теплообмена при естественной конвекции, была разработана программа для расчета скорости звука в воде [13]. Программа также вычисляет параметры пограничного слоя, температуру подогрева, профиль температуры вдоль акустической оси УЗ-датчика. Для проведения CFD-моделирования естественной конвекции у наружной поверхности ТВС ВВЭР-1000, погруженной в воду, был использован программный комплекс ANSYS Fluent [14]. При применении CFD-моделирования возникает проблема выбора конкретной модели турбулентности и оценки степени достоверности полученных с ее помощью результатов. В работе [15] показано, что для моделирования естественной конвекции у поверхности ТВС рекомендовано использовать модель RNG  $k$ - $\epsilon$ .

В процессе обоснования применимости разработанной модели акустического тракта была выполнена процедура её верификации [16]. В ходе верификации было проведено натурное и численное моделирование влияния факторов на результаты метода, а именно, остаточного тепловыделения и наклона исследуемой поверхности.

На рисунке 2 показана зависимость абсолютного значения погрешности измеряемого расстояния от датчика до нагретой поверхности имитатора ТВС  $|\Delta X|$  от числа Рейля для двух серий экспериментов. Измерения проводились на различных высот-

ных отметках для поверхностной плотности теплового потока в диапазоне от 0 до 7 кВт/м<sup>2</sup> при постоянном расстоянии от датчика до исследуемой поверхности. Результаты расчетов и экспериментов хорошо согласуются между собой во всем диапазоне чисел Рэлея, особенно для турбулентного режима с числом Ra > 1·10<sup>14</sup>.

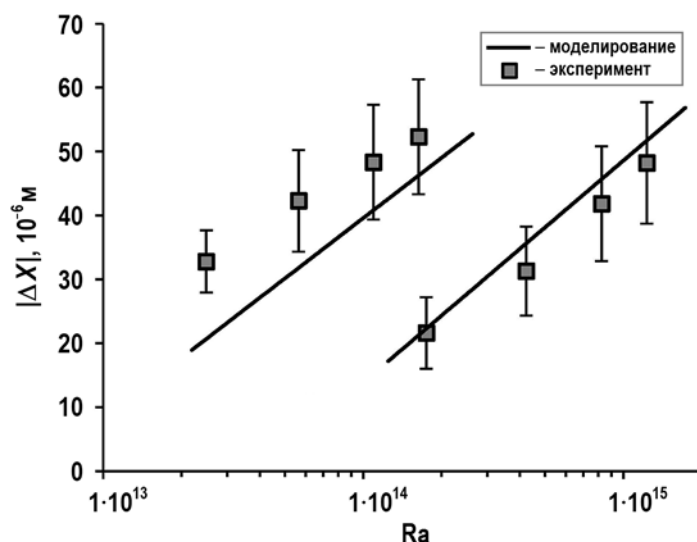


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения  $|\Delta X|$  от числа Рэлея [17]

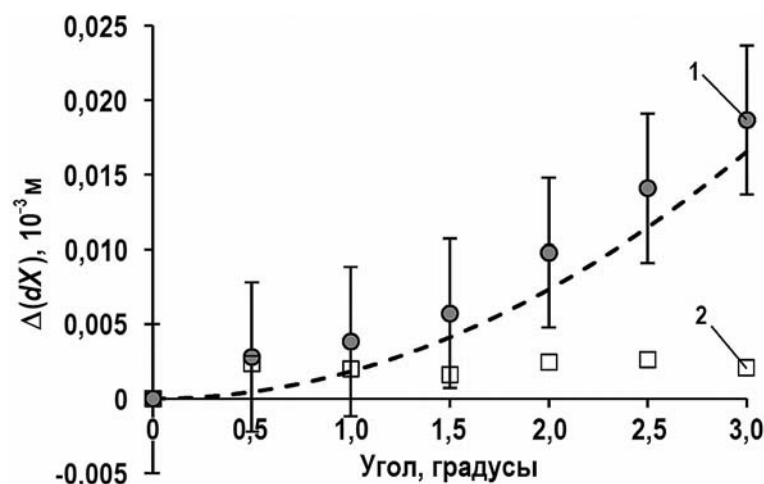


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения приращения расстояния  $dX$  от угла наклона поверхности: 1 – исходные экспериментальные данные; 2 – экспериментальные данные с учетом поправки на угол; результаты моделирования показаны штриховой линией

Влияние наклона поверхности на результаты измерений ультразвуковым методом представлены на рис. 3. Угол наклона пластины, отражающей УЗ-волны, изменялся в диапазоне 0 – 3° относительно излучающей поверхности пьезоэлемента датчика. Исходное расстояние между датчиком и поверхностью составляло ~ 120 мм. Перемещение пластины осуществлялось микрометрическим столом в сторону отдаления от датчика. Величина приращения расстояния  $dX$  от датчика до наклонной поверхности составила 6 мм. На рисунке 3 по оси ординат отложена погрешность измеренного датчиком приращения расстояния  $\Delta(dX)$ .

Видно, что с увеличением угла наклона погрешность увеличивается. Экспериментальные данные под цифрой 1 (диски) лежат выше расчетной линии, но зависимости



погрешностей аналогичны. Данные под цифрой 2 (квадраты) демонстрируют результаты применения поправки на угол при расчете расстояния между датчиком и поверхностью по формуле (4). С использованием предлагаемой поправки погрешность уменьшается и в диапазоне  $0 - 3^\circ$  не превышает 5 мкм. На основании этого можно сделать вывод о том, что применение данной поправки необходимо при расчете расстояний, поскольку позволяет значительно уменьшить погрешность измерения.

Исследования влияния естественной конвекции на результаты размеромерии ультразвуковым методом показали, что величина погрешности измерения расстояния от датчика до объекта контроля для турбулентного режима конвекции в несколько раз больше, чем для ламинарного, и определяется, в первую очередь, толщиной пограничного слоя и перепадом температуры воды в этом слое. Для турбулентного режима естественной конвекции, начинающегося при  $Ra > 4 \cdot 10^{13}$ , были получены номограммы для определения толщины пограничного слоя, температурного перепада, начала координаты турбулентного режима у поверхности ТВС и абсолютного значения погрешности измеренного расстояния между датчиком и поверхностью [18].

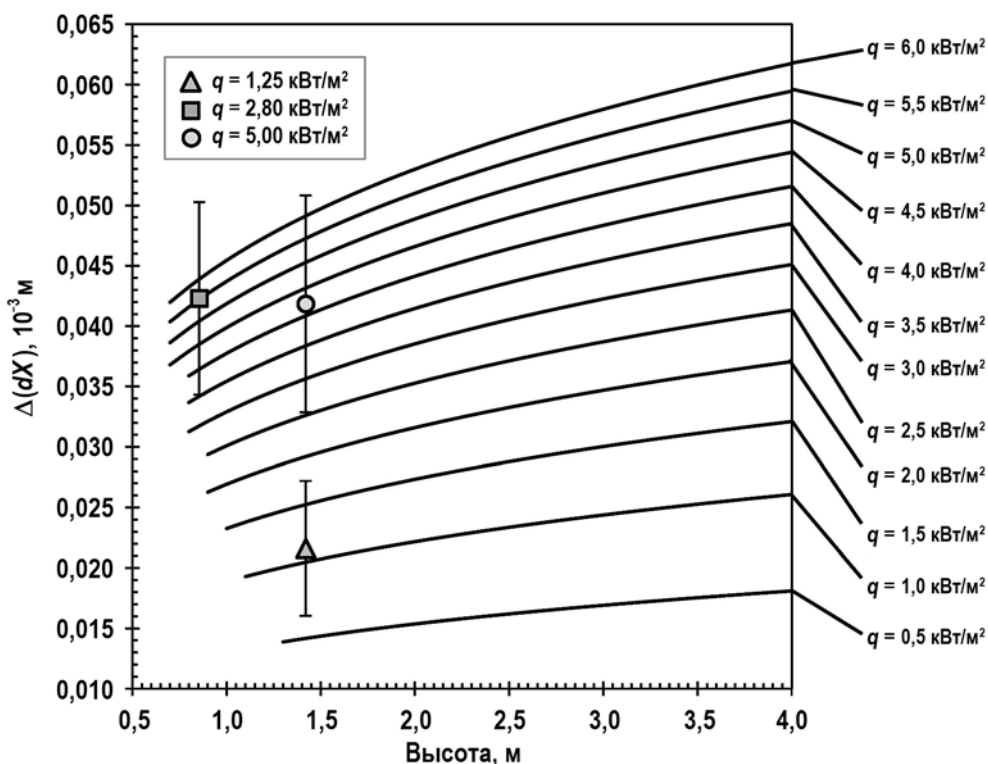


Рис. 4. Номограмма для определения абсолютного значения погрешности, полученная в результате численного моделирования; экспериментальные данные для значений  $q = 1,25; 2,80; 5,00$  кВт/м<sup>2</sup> взяты из [17]

На рисунке 4 показана номограмма для определения погрешности при температуре воды в БВ, равной  $25^\circ\text{C}$ . Плотность теплового потока  $q$  варьируется от  $0,5$  до  $6,0$  кВт/м<sup>2</sup> с шагом в  $0,5$  кВт/м<sup>2</sup>. По оси ординат отложено абсолютное значение погрешности, т.е. измеряемое расстояние уменьшается с увеличением плотности теплового потока и координаты расположения датчика вдоль продольной оси ТВС.

На рисунке 4 отмечены также экспериментальные данные, представленные в работе [17]. Измерения проводились на отметке  $0,86$  и  $1,4$  м с нагретым имитатором ТВС с плотностью теплового потока, равной  $1,25; 2,80$  и  $5,00$  кВт/м<sup>2</sup>. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает их удовлетворительное согласие.

С помощью обработки номограмм были получены инженерные формулы для вычисления погрешности измеренного расстояния при турбулентном режиме конвекции [18]:

$$|\Delta X| = \frac{q \cdot y^2}{\alpha} \cdot (Ra_y)^{-0.44} \cdot 10^{-2} + \chi \cdot q^{\gamma} \cdot \left( \frac{y}{q} \cdot 10^3 \right)^{\epsilon} \cdot 10^{-6}, \quad (8)$$

$$y_T = \omega \cdot q^{-0.25}, \quad (9)$$

где  $|\Delta X|$  – абсолютное значение погрешности, м;  $y_T$  – координата начала турбулентного режима, м;  $y$  – координата вдоль вертикальной оси ТВС, м;  $q$  – плотность теплового потока у поверхности ТВС, Вт/м<sup>2</sup>;  $Ra_y = Pr \cdot g \cdot \beta \cdot q \cdot y^4 / (\lambda \nu^2)$  – локальное число Рэлея;  $Pr$  – число Прандтля;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\beta$  – коэффициент объёмного теплового расширения жидкости, 1/К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·°С);  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м<sup>2</sup>/с.

Коэффициенты в формулах (8), (9) определяются в зависимости от температуры воды в БВ [18].

Значение остаточного тепловыделения для произвольного значения выгорания и времени выдержки ТВС можно определить с помощью различных расчетных кодов либо рассчитать методом линейной интерполяции значений остаточного тепловыделения, приведенных в РБ-093-20 [19]. Следовательно, используя формулу (8) можно выполнить предварительные оценки по погрешности ультразвукового метода или определить погрешность экспериментальных данных по формоизменению, полученных при инспекции, для любой сборки легководяного реактора с различными выгоранием и временем выдержки ТВС.

### ПРИМЕРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА НА АЭС

На основании математической модели акустического тракта была разработана программа для моделирования контроля формоизменения ТВС ВВЭР ультразвуковым методом [20]. ТВС представлена нагретым шестигранником с шириной грани, равной ширине грани ДР ТВС. В качестве исходных данных в программе используются значения прогиба, угла скручивания, плотности теплового потока ТВС и температуры воды в БВ. Программа позволяет провести исследования ультразвуковой системы при различном расположении датчиков относительно друг друга и поверхности ТВС, а также для различных значений радиуса пьезоэлемента датчика.

С использованием разработанных математической модели и программы было выполнено расчетно-экспериментальное моделирование процесса контроля формоизменения ТВС ВВЭР-1000 [21]. Моделирование выполнялось для ТВС с выгоранием от 10 до 65 МВт·сут/кгU, с величиной прогиба, не превышающей 20 мм, и углом скручивания не более 3°. Показано, что максимальная погрешность определения прогиба без учета поправки на угол скручивания составляет ~ 0,54 мм, а с учетом поправки почти в 10 раз меньше – 0,06 мм; погрешность определения угла скручивания не превышает 0,03°. Пример результатов моделирования представлен на рис. 5.

На графике приведены зависимости погрешности  $\Delta X$  измеренного датчиком расстояния для различных расстояний  $X$  между датчиками и поверхностью ТВС ВВЭР-1000. Радиус пьезоэлемента принимался равным 9 мм, резонансная частота – 5 МГц, а расстояние между акустическими осями датчиков было выбрано равным 25 мм. Значение прогиба грани составило 20 мм, угол скручивания ТВС – не более 3°. Данные получены для турбулентного режима с числом  $Ra = 3 \cdot 10^{16}$  при температуре воды, равной 20°С.



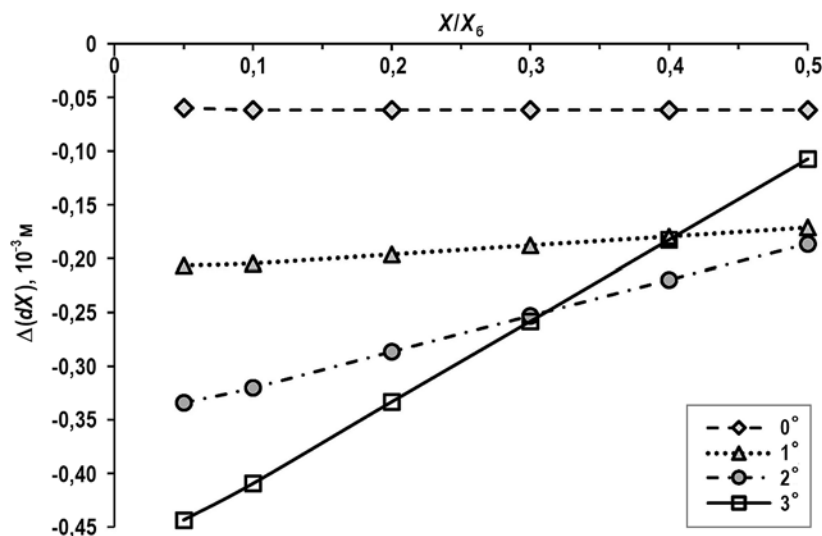


Рис. 5. Моделирование процесса инспекции ТВС ВВЭР-1000 с помощью ультразвукового метода

Зависимость погрешности от расстояния  $X$  линейная. Видно, что коэффициент наклона прямой зависит от угла скручивания. С увеличением угла скручивания наклон прямой увеличивается по мере отдаления датчика от поверхности ДР, погрешность измеренного расстояния снижается. Представленные расчётные зависимости демонстрируют результаты, полученные без учета поправки на угол. Как отмечено ранее, вносимая поправка позволяет значительно уменьшить погрешность измерения. По результатам расчета применение поправки нивелирует влияние наклона поверхности, снижая погрешность до значений погрешности, обусловленной наличием остаточного тепловыделения у ТВС. На графике значения этой погрешности соответствуют данным, полученным для угла, равного  $0^\circ$ .

Разработанный метод внедрен на стенде инспекции ТВСА-Т на АЭС «Темелин». Были проинспектированы примерно 40 ТВСА-Т различных модификаций с выгоранием от  $\sim 11$  до  $\sim 52$  МВт·сут/кгU. Основная масса ТВСА-Т инспектировалась практически через несколько дней после выгрузки их из а.з. реактора, и только несколько сборок имели время выдержки в БВ около двух лет.

Процесс сканирования ТВС в стенде УЗ-датчиками при определении величины прогиба и угла скручивания составляет около 10-ти минут, что подтверждает высокую оперативность контроля ультразвуковым методом. Положительный опыт использования разработанного метода на АЭС «Темелин» позволяет рекомендовать его для применения на других АЭС.

## ВЫВОДЫ

1. Предложен бесконтактный ультразвуковой эхо-импульсный метод измерения поперечных размеров, величины прогиба и угла скручивания ТВС ВВЭР-1000 в условиях бассейнов выдержки на АЭС. Особенностью метода является простота и универсальность с точки зрения его применимости для контроля различных конструкций ТВС: ТВСА, ТВС-2М с любым количеством дистанционирующих решеток.

2. В приближении геометрической акустики разработана и верифицирована математическая модель акустического тракта, учитывающая наклонное падение УЗ-волн на поверхность ТВС и их распространение в условиях естественной конвекции вдоль поверхности ТВС.

3. На базе математической модели акустического тракта разработан программный комплекс и получены инженерные формулы, позволяющие моделировать контроль

формоизменения ТВС ВВЭР, а также проектировать новые системы контроля, в основе которых лежит ультразвуковой эхо-импульсный метод измерения линейных размеров.

4. Разработанный метод использован при создании оборудования для контроля формоизменения ТВСА ВВЭР-1000 на первом и втором блоках АЭС «Темелин» (Чехия). Результаты измерения ~ 40 сборок с выгоранием от 11 до 52 МВт-сут/кгU и временем выдержки после извлечения из а.з. реактора от нескольких дней до двух лет подтвердили надежность и эффективность метода.

### Литература

1. Звир Е.А., Жителев В.А., Захаров А.В., Крюков Ф.Н., Шишин В.Ю. Основные результаты послереакторных исследований, выполненных в АО «ГНЦ НИИАР» в 2014 – 2018 гг. / Тезисы докладов XI Конференции по реакторному материаловедению. Дмитровград, 27-31 мая 2019 г. – АО «ГНЦ НИИАР», 2019. – С. 5-8.
2. Поленок В.С., Жителев В.А., Марков Д.В., Звир Е.А., Шевляков Г.В., Кобылянский Г.П. Послереакторные исследования ТВС ВВЭР-1000 альтернативных конструкций. // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР» – 2010. – № 3. – С. 10-15.
3. Иванов Н.А., Бромирский И.А., Семенцов А.В. Реализация СИР ТВС для новых проектов АЭС с ВВЭР / Бюллетень основных научно-технических работ ОКБ «Гидропресс» за 2016 г. – Подольск: АО ОКБ «Гидропресс», 2017. Электронный ресурс: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/yb-2016/documents/14.pdf> (дата доступа 05.09.2021).
4. Иванов Н.А., Бромирский И.А., Суков Д.В., Первушин Л.А., Тишков А.Н., Семенцов А.В., Павлов С.В., Амосов С.В. Стенд инспекции и ремонта тепловыделяющих сборок для проекта АЭС-2006. // Тяжелое машиностроение. – 2017. – № 4. – С. 25-28.
5. Воронина А.В. Анализ эффективности, надёжности и безопасности методов определения формоизменения тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000 на АЭС. / Тезисы докладов Всероссийской молодёжной конференции «Научные исследования и технологические разработки в обеспечение развития ядерных технологий нового поколения». – Дмитровград: НИИАР, 2018. – С. 62-64.
6. Xu Yuanhuan, Nie Yong Distortion Measurement for Fuel Assemblies with Ultrasonic Technique. / Proc. of the IAEA technical meeting held in Buenos Aires. – Argentina, 2009. – PP. 124-128.
7. Мартыненко С.П. Система измерения геометрии ТВСА («СИГМА-ТВСА») в условиях ВВЭР-1000. Результаты измерений на АЭС. / Тезисы докладов научно-технической конференции «Ядерное топливо нового поколения для АЭС (НТК-2012)». – М.: ОАО «ВНИИМ», 2012.
8. Aullo M., Aleshin Y., Messier J. Reduction of fuel assembly bow with the RFA fuel. // Top Fuel: Operation and Experience. – Manchester, United Kingdom: European Nuclear Society, 2012.
9. Павлов С.В. Разработка методов и средств исследования ТВС и твэлов ВВЭР в бассейнах выдержки ядерных реакторов. Дис. канд. техн. наук: 05.14.03. – Н. Новгород, 2006. – 126 с.
10. Павлов С.В., Воронина А.В. Схемные решения для контроля формоизменения ТВС ВВЭР-1000 ультразвуковым методом в бассейне выдержки АЭС // Вестник Дмитровградского инженерно-технологического института. – 2021. – № 1 (23). – С. 25-38.
11. Амосов С.В., Павлов С.В., Воронина А.В., Правдин Д.И. Способ ультразвукового контроля параметров формоизменения тепловыделяющих сборок ядерных реакторов. Российская Федерация. Патент на изобретение RU 2738751. Заявка от 01.07.2020.
12. Воронина А.В., Павлов С.В. Математическая модель акустического тракта эхо-импульсного метода измерения геометрических параметров тепловыделяющей сборки ядерного реактора в приближении геометрической акустики // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. – 2020. – Т. 9. – № 3. – С. 217-225. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X20030104>.
13. Павлов С.В., Воронина А.В. Программа для расчета скорости звука в воде у поверхности вертикальной нагретой пластины. / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663116 Российская Федерация. Заявка от. 05.10.2018.

14. ANSYS Fluent. Электронный ресурс: <http://www.fluent.com> (дата доступа 05.09.2021).

15. Воронина, А.В., Павлов С.В. Выбор модели турбулентности для расчета профиля температуры у поверхности ТВС ВВЭР-1000 в бассейне выдержки АЭС. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2021. – № 1. – С. 83-94. DOI: <https://doi.org/10.26583/pre.2021.1.08>.

16. Воронина А.В., Павлов С.В. Верификация математической модели акустического тракта ультразвукового метода измерения расстояний до нагретой вертикальной пластины в присутствии естественной конвекции. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 63-76.

17. Павлов С.В., Шалагинова Т.М., Михайлов С.В., Прокуданов Д.Л. Исследование влияния естественной конвекции на результаты измерения геометрических характеристик твэлов и тепловыделяющих сборок ультразвуковыми методами в условиях бассейнов выдержки: препринт. – Димитровград: НИИАР, 1991. – 28 с.

18. Воронина А.В., Павлов С.В. Инженерные формулы для оценки влияния естественной конвекции у поверхности ТВС ВВЭР-1000 на результаты измерения ее размеров ультразвуковым методом в бассейне выдержки АЭС. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – № 1. – С. 74-85.

19. РБ-093-20. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных: утверждено Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 марта 2020 г. № 106.

20. Павлов С.В., Воронина А.В. Программа для моделирования контроля формоизменения ТВС ВВЭР ультразвуковым эхо-импульсным методом. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616486 Российская Федерация. Заявка от. 13.04.2021.

21. Воронина А.В., Павлов С.В. Численное моделирование контроля искривления ТВС ВВЭР-1000 в бассейне выдержки АЭС. // Вестник Димитровградского инженерно-технологического института. – 2021. – № 1 (23). – С. 15-24.

Поступила в редакцию 09.09.2021 г.

#### Авторы

Воронина Александра Владимировна, инженер, старший преподаватель

E-mail: [AVVoronina@mephi.ru](mailto:AVVoronina@mephi.ru)

Павлов Сергей Владленович, зам. директора, зав. кафедрой, доцент, доктор техн. наук,

E-mail: [pavlov@sosny.ru](mailto:pavlov@sosny.ru)

Амосов Сергей Витальевич, главный специалист

E-mail: [acb@sosny.ru](mailto:acb@sosny.ru)

UDC 621.039.546.8

## ULTRASONIC MONITORING OF THE VVER-1000 FA FORM CHANGE

Voronina A.V. \*\*, Pavlov S.V. \*\*, Amosov S.V. \*

\* Sosny R&D Company

4a Dimitrov Ave, 433507 Dimitrovgrad, Ulyanovsk Reg., Russia

\*\* Dimitrovgrad branch of NRNU MPhI

294 Kuibyshev Str, 433511 Dimitrovgrad, Ulyanovsk Reg., Russia

#### ABSTRACT

A procedure has been developed to determine the geometrical parameters of fuel assemblies (FA) by an ultrasonic pulse-echo technique used for all types of light-water reactor FAs. The measurement of geometrical parameters is achieved through the

pairwise installation of ultrasonic sensors opposite the FA spacer grid faces at a distance of not more than a half of the sensor acoustic field near-region length such that the acoustic axes of the pairwise sensors are parallel to each other. The advantages of the presented technique is that it enables monitoring of any FA modifications, including the VVER reactor assemblies with a different number of spacer grids.

The paper presents a mathematical model of the acoustic path developed in a geometrical acoustics approximation and its verification results. The model was used for computational and experimental studies of the ultrasonic test technique, and engineering formulas have been developed to calculate the errors of the sensor measurement of the distance to the FA surface. A software package has been developed to simulate the FA form change monitoring and can be used to design new monitoring systems.

The developed technique to determine the VVER-1000 FA geometrical parameters was introduced at units 1 and 2 of the Temelin NPP, the Czech Republic, for the TVSA-T FA form change monitoring. The successful use of the proposed technique makes it possible to recommend it for use in inspection benches at other NPPs.

**Key words:** ultrasonic technique, fuel assembly, form change, model, natural convection.

#### REFERENCES

1. Zvir E.A., Zhitelev V.A., Zaharov A.V., Krjukov F.N., Shishin V.Yu. The main results of post-irradiation studies performed at SSC RIAR JSC in 2014-2018. *Proc. of the XI Conference on Reactor Materials Science*. Dimitrovgrad, 2019, pp. 5-8 (in Russian).
2. Polenok V.S., Zhitelev V.A., Markov D.V., Zvir E.A., Shevljakov G.V., Kobyljanskij G.P. Post-reactor studies of VVER-1000 fuel assemblies of alternative designs. *Collection of Papers of the SSC RIAR JSC*. 2010, no. 3, pp. 10-15 (in Russian).
3. Ivanov N.A., Bromirsky I.A., Sementsov A.V. Implementation of SIR fuel assemblies for new projects of NPP with VVER. *Bulletin of the Main Scientific and Technical Works of OKB «Gidropress» for 2016*. Podolsk. OKB Gidropress JSC Publ., 2017. Available at : <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/yb-2016/documents/14.pdf> (accessed Sep. 05, 2021) (in Russian).
4. Ivanov N.A., Bromirsky I.A., Surov D.V., Pervushin L.A., Tishkov A.N., Sementsov A.V., Pavlov S.V., Amosov S.V. Stand for Inspection and Repair of Fuel Assemblies for NPP-2006 Project. *Tyazhyoloe Mashinostroenie*. 2017, no. 4, pp. 25-28 (in Russian).
5. Voronina A.V. Analysis of the efficiency, reliability and safety of methods for determining the shape change of fuel assemblies of a VVER-1000 reactor at nuclear power plants. *Proc. of the All-Russian Youth Conference «Scientific Research and Technological Development to Support the Development of New Generation Nuclear Technologies»*. Dimitrovgrad, 2018, pp. 62-64 (in Russian).
6. Xu Yuanhuan, Nie Yong Distortion Measurement for Fuel Assemblies with Ultrasonic Technique. *Proc. of the IAEA Technical Meeting held in Buenos Aires*. Argentina, 2009, pp. 124-128.
7. Martynenko S.P. TVSA Geometry Measurement System (SIGMA-TVSA) in VVER-1000 Conditions. The results of measurements on the NPP. *Proc. of the Scientific and technical conference «New-generation nuclear fuel for nuclear power plants»*. Moscow, 2012 (in Russian).
8. Aullo M., Aleshin Y., Messier J. *Reduction of fuel assembly bow with the RFA fuel. TopFuel: Operation and Experience*. Manchester, United Kingdom. European Nuclear Society, 2012.
9. Pavlov S.V. *Development of Methods and Tools for studying Fuel Assemblies and Fuel Rods of VVER Reactors in the Spent Fuel Pools of Nuclear Reactors*. Cand. tech. sci. diss. Nizhny Novgorod, 2006. 126 p. (in Russian).
10. Pavlov S.V., Voronina A.V. Design Solutions for Measurements of VVER-1000 Fuel Assembly Dimensional Changes by Ultrasonic Technique in Cooling Pool at Nuclear Power Plant. *Vestnik Dimitrovgradskogo Inzhenerno-Tehnologicheskogo Instituta*. 2021, no. 1, pp. 25-38 (in Russian).
11. Amosov S.V., Pavlov S.V., Voronina A.V., Pravdin D.I. *Method of Ultrasonic Inspection of Parameters of Molding of Fuel Assemblies of Nuclear Reactors*. Patent RF, no. 2738751, 2020 (in Russian).

12. Voronina A.V., Pavlov S.V. Mathematical Model of an Acoustic Tract of an Echo-Pulse Method for Measurement of the Geometric Parameters of a Fuel Assembly of a Nuclear Reactor in the Geometric Acoustics Approximation. *Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta MIFI*. 2020, v. 9, no. 3, pp. 217-225; DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X20030104> (in Russian).
13. Pavlov S.V., Voronina A.V. *Program for Calculating the Speed of Sound in Water near the Surface of a Vertical Heated Plate*. Certificate of state registration of computer programs RF, no. 2018663116, 2018 (in Russian).
14. ANSYS Fluent. Available at: <http://www.fluent.com> (accessed Sep. 05, 2021).
15. Voronina A.V., Pavlov S.V. Selecting a Turbulence Model for Calculating the Temperature Profile at the Surface of VVER 1000 Fuel Assemblies in the NPP Spent Fuel Pool. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021, no. 1, pp. 83-94; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.1.08> (in Russian).
16. Voronina A.V., Pavlov S.V. Verification of the Mathematical Model of the Acoustic Path of the Ultrasonic Method for Measuring Distances to a Heated Vertical Plate in the Presence Of Natural Convection. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Povolzhskij Region. Tekhnicheskie Nauki*. 2021, no. 2, pp. 63-76 (in Russian).
17. Pavlov S.V., Shalaginova T.M., Mikhaylov S.V., Prokudanov D.L. *Study of Natural Convection Effect on the Measurement Results of Geometrical Characteristics of Fuel Elements and Fuel Assemblies by Ultrasonic Methods in spent pools*. Preprint. Dimitrovgrad. NIAR Publ., 1991, 28 p. (in Russian).
18. Voronina A.V., Pavlov S.V. Engineering Formulas for Estimating the Influence of Natural Convection along the Surface of Fuel Assembly of VVER-1000 on the Results of Measuring its Sizes by the Ultrasonic Method in Cooling Pond of Nuclear Power Plant. *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstanty*, 2021, no. 1, pp. 74-85 (in Russian).
19. Safety Guide «Radiation, Thermal and Physical Characteristics of Spent Nuclear Fuel from Water-Moderated Power Reactors and High Power Channel-Type Reactors». Approved by Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service No. 106 dated March 11, 2020 (in Russian).
20. Pavlov S.V., Voronina A.V. *Program for Simulation of VVER 1000 Fuel Assembly Bow Measurements by Ultrasonic Echo-Pulse Method*. Certificate of state registration of computer programs RF, no. 2021616486, 2021 (in Russian).
21. Voronina A.V., Pavlov S.V. Numerical Simulation of VVER 1000 Fuel Assembly Bow Measurements in Cooling Pool at Nuclear Power Plant. *Vestnik Dimitrovgradskogo Inzhenerno-Tekhnologicheskogo Instituta*, 2021, no. 1, pp. 15-24 (in Russian).

### Authors

Voronina Aleksandra Vladimirovna, Engineer, Senior Lecturer

E-mail: [AVVoronina@mephi.ru](mailto:AVVoronina@mephi.ru).

Pavlov Sergey Vladlenovich, Deputy Director, Head of Department, Associate Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [pavlov@sosny.ru](mailto:pavlov@sosny.ru)

Amosov Sergey Vitalievich, Principal Engineer

E-mail: [acb@sosny.ru](mailto:acb@sosny.ru)