

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 621.039.548

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА  
ЭХО-ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА  
В ПРИБЛИЖЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

© 2020 г. А. В. Воронина<sup>1,\*</sup>, С. В. Павлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Димитровградский инженерно-технологический институт –  
филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Димитровград, 433507, Россия

\*e-mail: AVVoronina@mephi.ru

Поступила в редакцию 27.03.2020 г.

После доработки 02.07.2020 г.

Принята к публикации 07.07.2020 г.

Рассмотрен принцип определения размеров при инспекции облученных ТВС ультразвуковым эхо-импульсным методом. Приведены факторы, влияющие на траекторию распространения ультразвука в среде и обусловленные наличием остаточного тепловыделения у ТВС. В приближении геометрической акустики разработана математическая модель акустического тракта ультразвукового датчика. Среда, в которой распространяется ультразвук, рассматривается в приближении плоскопараллельной слоистой среды жидкости с монотонным изменением температуры и плотности воды от слоя к слою. Предполагается, что температура воды между датчиками и поверхностью ТВС определяется конвективным теплообменом между ТВС и водой бассейна выдержки АЭС. Модель учитывает нестабильность скорости звука и рефракцию ультразвуковых волн при наклонном падении волн на поверхность. Предложенная авторами модель позволяет исследовать акустический тракт при ультразвуковом эхо-импульсном методе. Данную модель можно использовать при разработке систем контроля формоизменения ТВС ВВЭР-1000.

*Ключевые слова:* ультразвуковой метод, ультразвук, ТВС, геометрическая акустика, рефракция

**DOI:** 10.1134/S2304487X20030104

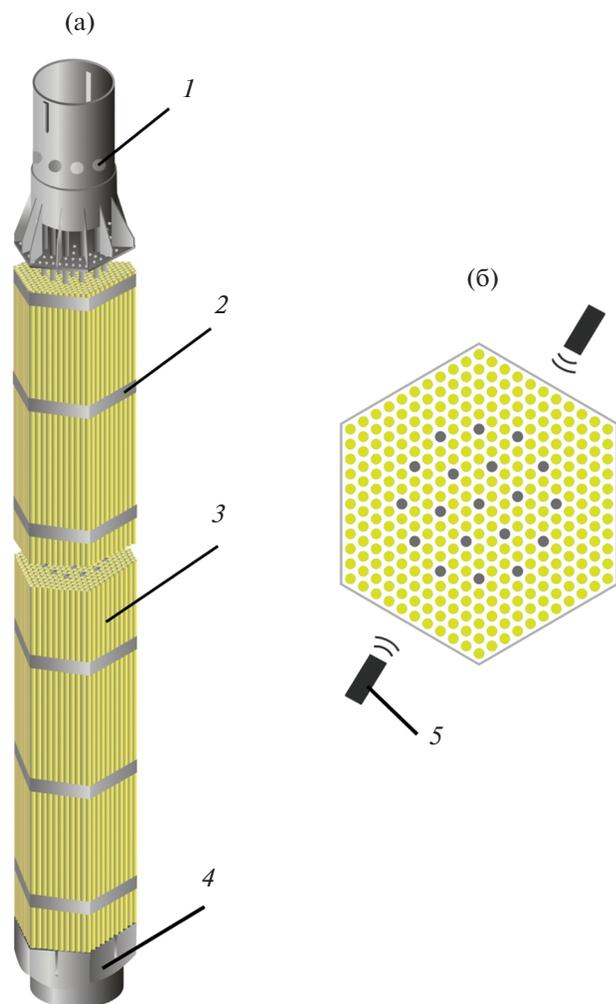
## ВВЕДЕНИЕ

Одним из требований безопасности, предъявляемым к тепловыделяющим сборкам (ТВС), является геометрическая стабильность в течение всего срока эксплуатации в ядерном реакторе. Геометрическая стабильность, определяемая степенью формоизменения ТВС, зависит от механической жесткости и прочности конструкции ТВС, а также от воздействующих на ТВС факторов. При эксплуатации в активной зоне ядерного реактора ТВС подвержена воздействию нейтронного и гамма-излучения, градиентов температуры, статических и динамических нагрузок со стороны теплоносителя, окружающих ТВС и элементов конструкции реактора. При этом допускаются изменения формы и геометрических параметров ТВС, которые не оказывают существенного влияния на безопасность, в частности, не препятствуют штатной работе органов системы управления и защиты реактора; не затрудняют проведение транспортно-технологических операций с ТВС при их загрузке и выгрузке из активной зоны реактора; обеспечивают надежный теплоотвод от

тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) к теплоносителю.

Об изменении формы ТВС обычно судят по результатам их инспекции и исследований после эксплуатации, которые проводят с использованием специальных стендов инспекции на АЭС или в радиационно-защитных камерах в исследовательских центрах [1]. Для определения какого-либо геометрического параметра ТВС (длина, поперечный размер, величина прогиба и др.) с помощью различных измерительных систем и устройств [2] определяют координаты соответствующих базовых точек поверхности ТВС, в последующем вычисляя искомый геометрический параметр.

Измерение координат точек поверхности ТВС осуществляют различными неразрушающими методами: оптическими, электромагнитными, ультразвуковыми. При контроле ТВС на стендах инспекции в бассейнах выдержки АЭС, когда ТВС находится в воде, удобно использовать ультразвуковые методы контроля, отличающиеся простотой, экспрессностью выполнения, хоро-



**Рис. 1.** Общий вид ТВС ВВЭР-1000 (а) и ее поперечное сечение с ультразвуковыми датчиками (б): 1 – головка; 2 – решетка дистанционирующая; 3 – твэлы; 4 – хвостовик; 5 – датчик ультразвуковой.

шими метрологическими характеристиками и отсутствием прямого контакта с объектом контроля [3, 4].

Ультразвуковые эхо-импульсные методы измерения линейных размеров основаны на измерении времени распространения ультразвуковых волн от датчиков до объекта контроля и обратно с последующим вычислением расстояния между ними [5]. Метрологические характеристики ультразвукового эхо-импульсного метода во многом определяются параметрами акустического тракта, который определяется как путь, проходимый ультразвуковыми волнами от датчика до объекта контроля и обратно [6].

Акустический тракт при инспекции облученных ТВС в бассейнах выдержки АЭС зависит от условий распространения и отражения ультразвуковых волн (УЗ-волны) в среде вследствие на-

личия естественной конвекции вдоль поверхности ТВС из-за ее остаточного тепловыделения.

В данной статье представлена разработанная математическая модель акустического тракта ультразвукового эхо-импульсного метода измерения геометрических параметров ТВС. Модель разработана в приближении геометрической акустики и описывает время распространения УЗ-волн от датчика до поверхности ТВС и обратно с учетом: рефракции УЗ-волн в конвективном слое, изменяющейся скорости звука в воде вдоль траектории распространения УЗ-волн и с учетом наклонного падения УЗ-волн на поверхность ТВС.

### ПРИНЦИП ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ЭХО-ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Изменение формы и размеров ТВС в процессе облучения могут стать ограничивающим фактором безопасной эксплуатации реактора. Применительно к ТВС ядерных реакторов типа ВВЭР-1000 (рис. 1) контролируемые параметрами, характеризующими формоизменение ТВС, являются: длина сборки, прогиб, угол скручивания и размер “под ключ”. На рис. 2 представлены типичные кривые по результатам исследования геометрической стабильности конструкции ТВС на стендах инспекции. Изменения геометрических параметров ТВС в процессе эксплуатации проявляются в виде изгибных деформаций и деформации скручивания ТВС, изменению размера “под ключ”, прогибу дистанционирующих решеток (ДР). Накопленная за время эксплуатации деформация может привести к механическим повреждениям ТВС при перегрузках активных зон и к ограничению свободного прохождения органов регулирования системы управления и защиты при эксплуатации.

Внедрение новых технических решений, таких как: уменьшение количества ДР, изменение конструкции твэла – уменьшение толщины оболочки, уменьшение диаметрального зазора между оболочкой и топливными таблетками, увеличение длины твэла, могут привести к изменению изгибной жесткости ВВЭР-1000 и требуют экспериментального обоснования [7]. На стендах инспекции в бассейнах выдержки АЭС использование в качестве измерительных систем ультразвукового эхо-импульсного метода повысит оперативность проведения измерений формоизменения ТВС.

Определение геометрических характеристик и формоизменения ТВС и ее элементов ультразвуковым эхо-импульсным методом основано на измерении расстояния от ультразвукового датчика до поверхности грани дистанционирующей ре-

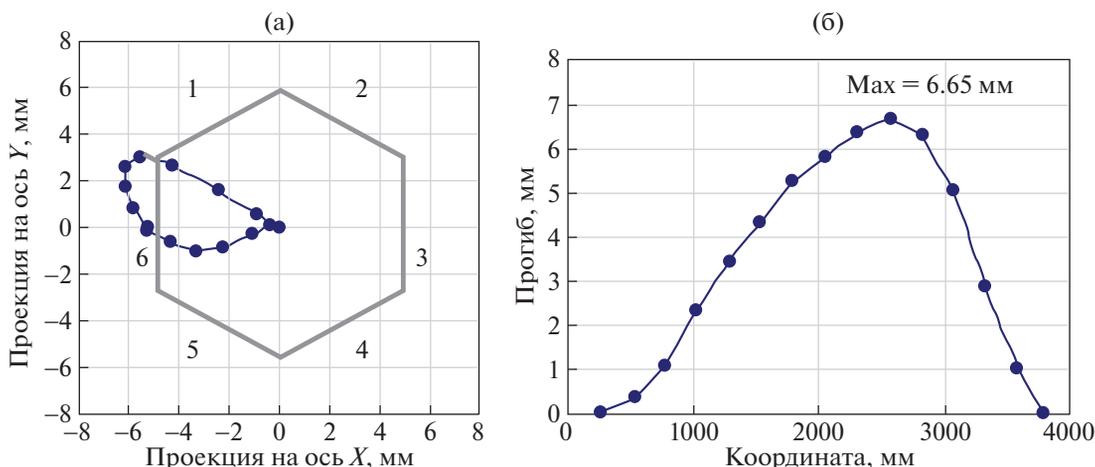


Рис. 2. Пример представления результатов инспекции ТВС ВВЭР-1000: а – годограф вектора прогиба ТВС; б – модуль вектора прогиба ТВС [8].

шетки ТВС и координатной привязке датчика к определенной точке на поверхности сборки.

Координаты точек поверхности ДР ТВС ультразвуковым эхо-импульсным методом определяются следующим образом. Ультразвуковой датчик излучает волны, которые распространяются от датчика до поверхности ТВС и после отражения регистрируются этим же датчиком. Измеряется время распространения волн  $\tau$  и затем определяется расстояние от датчика до поверхности ТВС  $X$ :

$$X = \frac{c\tau}{2}, \tag{1}$$

где  $c$  – скорость звука в среде распространения, м/с<sup>2</sup>,  $\tau$  – измеренное время, с.

Вдоль акустической оси датчика откладывается вычисленное по формуле (1) расстояние и определяются координаты точки поверхности ТВС. Для каждого геометрического параметра установлен определенный набор точек поверхно-

сти ТВС, знание пространственного положения которых относительно друг друга позволяет определить данный параметр.

Время поступления на датчик отраженного от поверхности сигнала равно сумме времени распространения УЗ-волн в среде  $\tau_p$  и временного интервала  $\Delta\tau_A$ , связанного с конечной длительностью эхо-импульса. Из рис. 3 видно, что при увеличении уровня порога  $A_0$ , по которому происходит измерение времени, временной интервал  $\Delta\tau_A$  увеличивается. Таким образом, временной интервал  $\Delta\tau_A$  прямо пропорционален периоду колебаний и зависит от уровня порога  $A_0$ .

Вследствие наличия остаточного тепловыделения у облученной ТВС, вдоль поверхности образуется конвективный слой, возникают неоднородности в виде турбулентных вихрей. Если на пути УЗ-волны встречается неоднородность, масштаб которой значительно больше длины волны ультразвука, то УЗ-волна отклоняется в сторону. Если попадают неоднородности, масштаб которых меньше длины волны, то луч рассеивается. Таким образом, вследствие неоднородности среды у поверхности ТВС условия распространения УЗ-волны постоянно изменяются, что приводит к флуктуации амплитуды принятых сигналов. На рис. 4 показана зависимость отношения среднеквадратичного отклонения амплитуды  $S(A)$  к значению средней амплитуды сигнала  $\bar{A}$  от числа Рэлея, характеризующего интенсивность процесса конвекции. Представленные данные опубликованы в работе [9], посвященной экспериментальному исследованию влияния естественной конвекции на результаты измерения геометрических характеристик твэлов и ТВС. Видно, что с увеличением интенсивности конвекции флуктуации амплитуды сигнала увеличиваются. Это объясня-

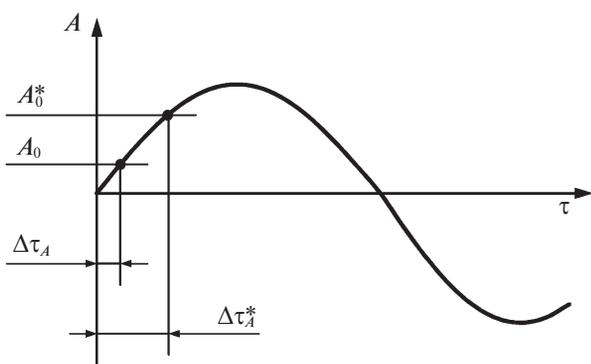


Рис. 3. Особенность измерения времени прихода эхо-импульса.

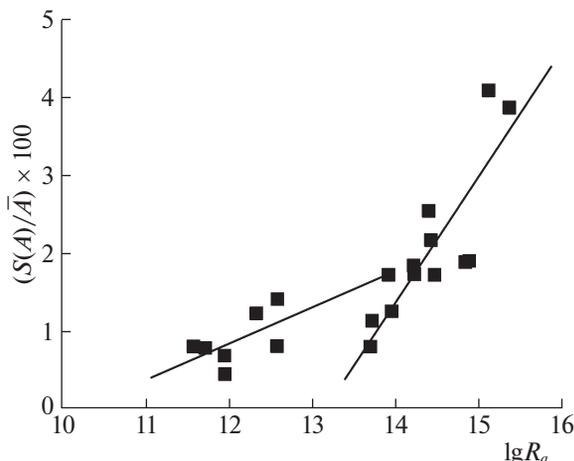


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичного отклонения амплитуды от числа Рэлея [9].

ется тем, что число вихрей, проходящих в единицу времени область акустического тракта, становится больше и, следовательно, число актов рассеяния и отклонения УЗ-волны увеличивается.

Наряду с неоднородностью среды на распространение УЗ-волны влияет нестабильность физических свойств потока. Вдоль поверхности ТВС формируется тепловой пограничный слой, толщиной  $\delta_t$ , который характеризуется градиентом температур по нормали к поверхности и совпадает с направлением акустического тракта. Температура у поверхности ТВС медленно изменяется вдоль акустической оси датчика (рис. 5). Температурная зависимость скорости звука [10] вызывает рефракцию – отклонение траектории УЗ-волн в области пограничного слоя.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При измерении размеров в основном используют датчики с плоскими пьезоэлементами круглой формы, для которых структура поля достаточно хорошо изучена, как теоретически, так и экспериментально [6]. В акустическом поле преобразователя дискообразной формы выделяют две зоны: дальняя, в которой амплитуда изменяется с расстоянием, и ближняя, где амплитуда постоянна (рис. 6). Размер ближней зоны  $r_b$  для датчика радиусом  $R$ , генерирующего ультразвуковые волны с частотой  $f$ , равен:

$$r_b = \frac{R^2 \cdot f}{c},$$

где  $c$  – скорость звука в среде распространения, м/с<sup>2</sup>.

Будем рассматривать систему, состоящую из пьезопреобразователя радиусом  $R$  и пластины, моделирующей в первом приближении поверх-

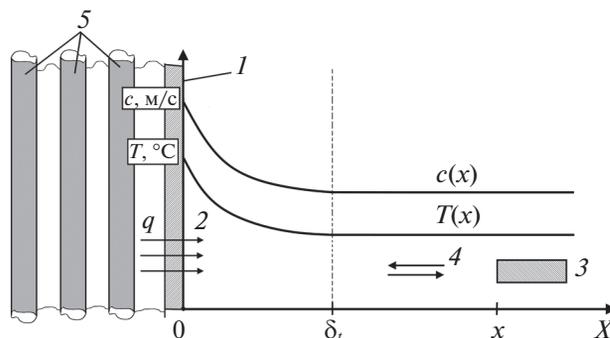


Рис. 5. Схема расположения датчика: 1 – поверхность грани ДР ТВС; 2 – направление теплового потока; 3 – датчик; 4 – направления распространения ультразвуковых волн;  $c(x)$ ,  $T(x)$  – профиль скорости звука и температуры вдоль акустической оси датчика соответственно, 5 – твэлы.

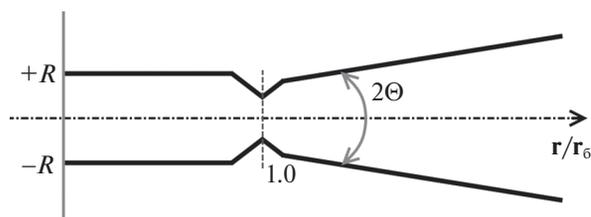


Рис. 6. Схема поля излучения на оси дискового пьезопреобразователя, радиусом  $R$ ;  $r_b$  – размер ближней зоны,  $\Theta$  – угол расхождения.

ность грани ДР. Среда, в которой распространяется УЗ-волна, однородна: отсутствуют неоднородности вследствие турбулентности вблизи поверхности ТВС.

Распространение УЗ-волн в водной среде будем рассматривать в ближней зоне в приближении геометрической акустики. В пределах ближней зоны УЗ-волна представляется как совокупность параллельных лучей, энергия которых не будет выходить за пределы трубки, радиусом датчика  $R$  [11].

Приближение геометрической акустики применимо для нашего случая при выполнении следующих условий [12]:

1) Размеры отражающей поверхности должны быть не меньше эллипса с полуосями

$$a \geq \frac{1}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\lambda \cdot X}{1 + \cos 2\alpha}}; \quad (2)$$

$$b \geq \sqrt{\frac{\lambda \cdot X}{1 + \cos 2\alpha}}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;  $X$  – расстояние от датчика до исследуемой поверхности;  $\alpha$  – угол падения, град.

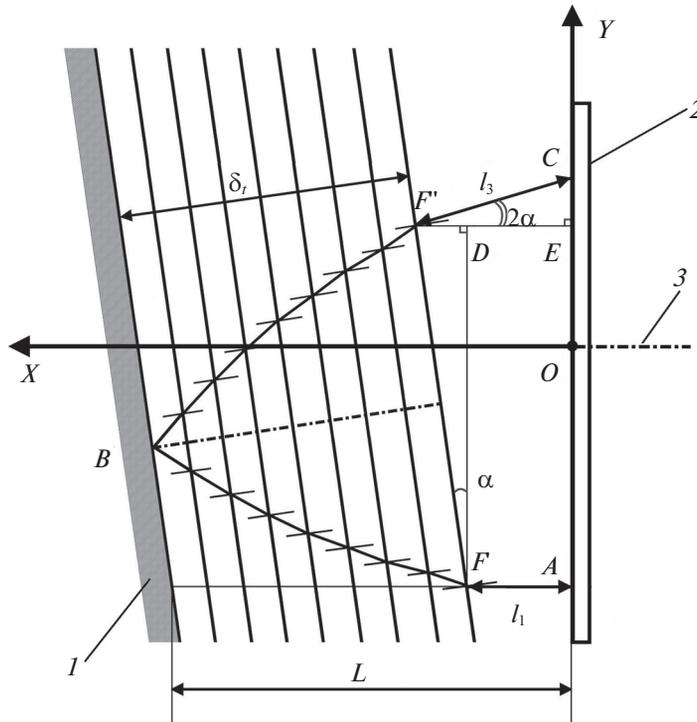


Рис. 7. Траектория распространения ультразвукового луча до наклонной поверхности: 1 – поверхность ТВС; 2 – пьезопреобразователь; 3 – акустическая ось;  $\alpha$  – угол наклона поверхности ТВС.

2) Отражающая поверхность может иметь неровности (шероховатости) размером  $H$ , если выполняется условие:

$$2H \cdot \cos\alpha \leq \frac{\lambda}{4}. \quad (4)$$

Например, для датчика, радиусом  $R = 0.008$  м, генерирующего УЗ-волны с частотой  $f = 5$  МГц, длина волны составит  $\lambda = 3 \times 10^{-4}$  м, размер ближней зоны будет равен  $r_g = 0.21$  м. При  $\alpha = 5$  град условия геометрической акустики согласно формулам (2)–(4) будут выполнены для отражающей поверхности с размерами не меньше эллипса с полуосями  $a = 5.70 \times 10^{-3}$  м,  $b = 5.68 \times 10^{-3}$  м и с шероховатостью не более  $38 \times 10^{-6}$  м. Таким образом, для выбранного радиуса датчика и частоты колебаний пьезопластины возможно использовать приближение геометрической акустики для моделирования акустического тракта эхо-импульсного метода измерения геометрических параметров ТВС ВВЭР-1000.

С учетом вышеизложенного исследуем распространение УЗ-волны при прохождении описанной системы с учетом наклонного падения волны на поверхность и наличии градиента температуры в среде.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим траекторию ультразвукового луча из точки А с координатами  $(X, Y)$  в процессе рас-

пространения УЗ-волны в среде. Полагаем, что координата  $X$  – это расстояние от пьезопреобразователя до пластины вдоль акустической оси, а координата  $Y$  лежит в диапазоне  $[-R; +R]$ . В случае наклонного падения в области пограничного слоя происходит искривление направления движения УЗ-волны, которое связано с рефракцией УЗ-волны в среде с градиентом температуры (рис. 7).

Скорость звука в пограничном слое можно записать как функцию температуры  $c(T(x))$  и тогда уравнение эйконала будет иметь вид:

$$\left(\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\psi}{\partial y}\right)^2 = \mu^2 = \left(\frac{c(T_\infty)}{c(T(x))}\right)^2, \quad (5)$$

где:  $c(T_\infty)$  – постоянное значение скорости звука при температуре  $T_\infty$  воды в бассейне выдержки вдали от ТВС, м/с.

Тогда синус угла  $\varphi$  между направлением УЗ-волны и нормалью к наклонной стенке будет равен:

$$\sin \varphi = \frac{\partial\psi}{\partial y} / \sqrt{\left(\frac{\partial\psi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\psi}{\partial y}\right)^2}. \quad (6)$$

Полагая  $\partial\psi/\partial y = \sin \alpha$ , где  $\alpha$  – угол наклона пластины, то из (5) и (6):

$$\sin \varphi = \frac{c(T(x))}{c(T_\infty)} \cdot \sin \alpha. \quad (7)$$

Из этой формулы видно, что если  $dT/dx > 0$ , то угол  $\varphi$  будет увеличиваться, а если  $dT/dx < 0$  то угол  $\varphi$  будет уменьшаться. Таким образом, вычисляется траектория распространения УЗ-волны в пограничном слое, если известно распределение температуры в нем.

Время распространения волны вдоль луча из точки А в точку С составит:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \Delta\tau_A, \quad (8)$$

где  $\tau_1$  – 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 после прохождения пограничного слоя,  $\Delta\tau_A$  – время, обусловленное способом регистрации эхо-импульса по его переднему фронту на уровне порога  $A_0$  (см. рис. 3).

Считаем, что поворот пластины происходит в плоскости ХУ и центр вращения лежит на акустической оси датчика. Тогда расстояние от пьезопреобразователя до пластины  $X$  вдоль акустической оси датчика постоянно при любом угле наклона поверхности. Таким образом, расстояние  $L$  от точки А до поверхности при наклонном падении УЗ-волны можно определить, как:

$$L = X - Y \cdot \operatorname{tg}\alpha.$$

Расстояние  $l_1$ , которое проходит волна от датчика до пограничного слоя, составит:

$$l_1 = L - \frac{\delta_t}{\cos\alpha} = X - Y \cdot \operatorname{tg}\alpha - \frac{\delta_t}{\cos\alpha}. \quad (9)$$

Путь УЗ-волны в области пограничного слоя  $l_2$  с учетом рефракции составит:

$$l_2 = 2 \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin\alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}}. \quad (10)$$

Для нахождения расстояния  $l_3$  после прохождения УЗ-волной пограничного слоя рассмотрим  $\Delta F''CE$  и  $\Delta F''F'D$  на рис. 7. Тогда:

$$l_3 = \frac{F'F'' \cdot \sin\alpha + l_1}{\cos 2\alpha}. \quad (11)$$

Отклонение волны в области пограничного слоя  $F'F''$  (рис. 7) будет равно:

$$F'F'' = 2 \cdot \frac{\sin\alpha}{c(T_\infty)} \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{c(T(x))dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin\alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}}. \quad (12)$$

Для определения времени  $\Delta\tau_A$  рассмотрим затухающие колебания, описываемые функциональной зависимостью типа:

$$\Psi(\tau) = A_{\max} \cdot e^{-\beta\tau} \cdot \sin(\omega_{\text{зат}}\tau), \quad (13)$$

где  $A_{\max}$  – максимальная амплитуда сигнала,  $\beta$  – коэффициент затухания,  $\omega_{\text{зат}} = \sqrt{(2\pi f)^2 - \beta^2}$  – циклическая частота затухающих колебаний.

Допустим, что  $\beta = 0$ . Тогда из (13):

$$\Delta\tau_A = \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k), \quad (14)$$

где  $k$  – отношение амплитуды порога  $A_0$  и  $A_{\max}$ .

С учетом вышеописанного, время распространения волны вдоль луча из точки А согласно формуле (8) составит:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \Delta\tau_A = \\ &= \frac{X - Y \cdot \operatorname{tg}\alpha - \frac{\delta_t}{\cos\alpha}}{c(T_\infty)} \left(1 + \frac{1}{\cos 2\alpha}\right) + \\ &+ 2 \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{c(T(x)) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin\alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}} + \\ &+ \frac{2 \sin^2\alpha}{c(T_\infty)^2 \cos 2\alpha} \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{c(T(x))dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin\alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}} + \\ &+ \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k). \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, пользуясь формулой (15) можно определить время распространения ультразвукового луча из любой точки пьезоэлемента, находящейся в диапазоне  $[-R; +R]$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанная модель позволяет оценить вклад различных факторов в погрешность измерения геометрических параметров ТВС эхо-импульсным ультразвуковым методом, а также позволяет найти оптимальные технические решения при создании измерительной системы на базе таких ультразвуковых методов. Ниже приведены несколько примеров для иллюстрации использования модели.

На рис. 8 приведена экспериментальная зависимость дополнительной погрешности из-за изменения уровня порога  $A_0$ , по которому происходит измерение времени распространения ультразвуковых волн (см. рис. 3). Частота колебаний  $f$  пьезопластины датчика в экспериментах равнялась 5.0 МГц. Сплошной линией на графиках обозначены результаты, полученные в ходе моделирования в условиях экспериментов. Расстояние от датчика до поверхности для вычисления погрешности определено по формуле (1). Видно,

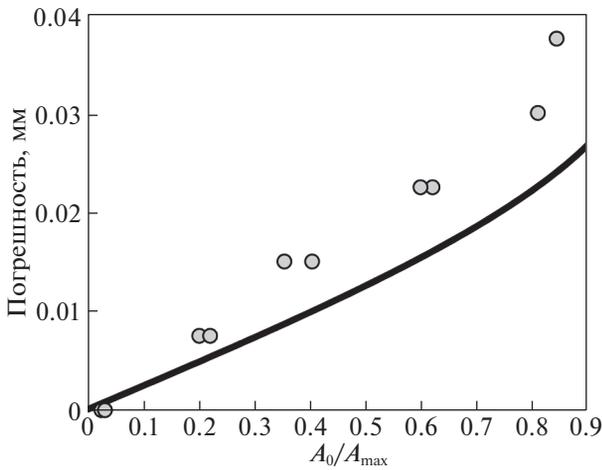


Рис. 8. Зависимость погрешности от амплитуды порога  $A_0$ : — результаты моделирования; ○ — эксперимент.

что экспериментальные данные находятся в хорошем согласии с результатами моделирования.

Результаты моделирования времени распространения ультразвукового луча из центра датчика вдоль акустической оси представлены на рис. 9а, 9б. Для моделирования выбран датчик радиусом  $R = 0.008$  м, генерирующий ультразвуковые волны с частотой  $f = 5$  МГц. Расстояние  $X$  принято равным  $0.2r_0$ . Исследовано перпендикулярное и наклонное падение на поверхность ТВС в условиях наличия естественной конвекции. При свободной конвекции профиль температуры в погра-

ничном слое определяется режимом течения, который характеризуется безразмерным числом Рэлея  $Ra$ . Методика определения параметров теплообмена, в том числе изменения скорости УЗ-волны и температуры в воде, представлена в работе [13]. Методика расчета процесса теплообмена строится на предположении, что поверхность ТВС можно представить в виде вертикальной пластины с постоянным тепловым потоком через нее. Расчеты проведены для пластины высотой 4 м с плотностью теплового потока равным  $3 \text{ кВт/м}^2$ . Температура воды в бассейне выдержки принята  $30^\circ\text{C}$ .

Из представленных данных (рис. 9, а) видно, что с увеличением степени турбулентности у поверхности ТВС (с увеличением  $Ra$ ) измеренное время прохождения ультразвукового луча будет уменьшаться, что обусловлено зависимостью скорости звука от температуры. При измерении расстояния в случае наклонного падения луча на поверхность ТВС (рис. 9, б) время распространения увеличивается с увеличением угла наклона.

### ВЫВОД

В работе рассмотрены факторы, влияющие на распространение ультразвука в воде при инспекции облученных ТВС ультразвуковым эхо-импульсным методом. Получена математическая модель акустического тракта в приближении геометрической акустики в пределах ближней зоны акустического поля датчика. Модель учитывает рефракцию УЗ-волн, нестабильность скорости

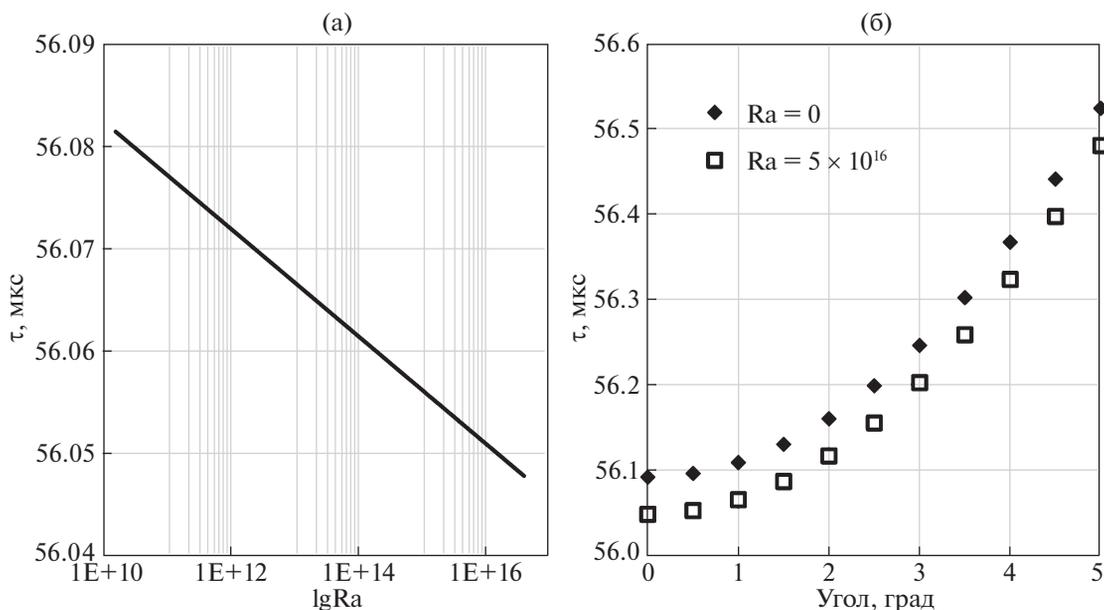


Рис. 9. Время распространения ультразвуковой волны при перпендикулярном (а) и при наклонном (б) падении на поверхность.

звука вдоль траектории распространения УЗ-волн и наклонное падение волн на поверхность ТВС. Разработанная модель может быть использована при разработке систем контроля формоизменения ТВС ВВЭР-1000.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов С.В. Методология материаловедческих исследований ТВС и ТВЭЛов ВВЭР для оперативного сопровождения внедрения нового топлива на АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2014. № 3. С. 25–34.
2. Павлов С.В., Сухих А.В., Сахаров С.С. Неразрушающая диагностика состояния элементов активных зон ядерных реакторов: монография. Димитровград: ДИТИ НИЯУ МИФИ, 2015. 320 с.
3. Павлов С.В. Неразрушающие ультразвуковые методы исследований облученного топлива ядерных реакторов. Димитровград: ОАО “ГНЦ НИИАР”, 2013. 256 с.
4. Xu Yuanhuan, Nie Yong. Distortion Measurement for Fuel Assemblies with Ultrasonic Technique” Post-Irradiation Examination and In-Pile Measurement Techniques for Water Reactor Fuels. Vienna: IAEA, 2009, IAEA-TECDOC-CD-1635.
5. Горбатов А.А., Рудашевский Г.Е. Акустические методы измерения расстояний и управления. М.: Энергоиздат, 1981. 207 с.
6. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Машиностроение, 1981. 240 с.
7. Павлов С.В. Изменение изгибной жесткости ТВС ВВЭР-1000 при эксплуатации // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2016. № 3. С. 42–52.
8. Павлов С.В. Методы и средства исследований ТВС ВВЭР для экспериментального сопровождения внедрения нового топлива на АЭС: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.03 / Павлов Сергей Владленович. Димитровград, 2015. 339 с.
9. 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.
10. Бражников Н.И. Ультразвуковые методы; под общ. ред. Н.Н. Шумиловского. М.; Л.: Энергия, 1965. 248 с.
11. Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
12. Свердлин Г.М. Прикладная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1976. 280 с.
13. Воронина А.В., Павлов С.В. Методика и программа расчета скорости звука в воде в условиях естественной конвекции у поверхности тепловыделяющих сборок ядерных реакторов // Вестник Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, 2019. Т. 8. № 5. С. 465–472. <https://doi.org/10.1134/S2304487X19050080>

---

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta “MIFI”, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 217–225

---

## 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

A. V. Voronina<sup>a,#</sup> and S. V. Pavlov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute,  
National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),  
Dimitrovgrad, 433507 Russia

<sup>#</sup>e-mail: AVVoronina@mephi.ru

Received March 27, 2020; revised July 2, 2020; accepted July 7, 2020

**Abstract**—The principle of determining the sizes during inspection of irradiated fuel assemblies by the ultrasonic echo-pulse method is considered. The factors caused by the presence of residual heat release in the fuel assemblies that affect the propagation path of ultrasound in the medium are presented. In the geometric acoustics approximation, a mathematical model of the acoustic path is developed. The medium in which ultrasound propagates is considered in the approximation of a plane–parallel layered fluid medium with a monotonic variation of the temperature and density of water from layer to layer. It is assumed that the water temperature between the sensors and the surface of the fuel assembly is determined by convective heat transfer between the fuel assembly and the water in the pool of a nuclear power plant. The model takes into account the instability of the speed of sound and the refraction of ultrasonic waves during the oblique incidence of waves on the surface. The proposed model allows the study of the acoustic tract with the ultrasonic echo-pulse method. This model can be used to develop forming control systems for a VVER-1000 fuel assembly.

*Keywords:* ultrasound method, ultrasound, fuel assemblies, geometric acoustics, refraction

DOI: 10.1134/S2304487X20030104

## REFERENCES

1. Pavlov S.V. Metodologiya materialovedcheskih issledovaniy TVS i TVELov VVER dlya operativnogo soprovozhdeniya vnedreniya novogo topliva na AES [Methodology of materials science studies of fuel assemblies and VVER fuel elements for operational support of the introduction of new fuel at nuclear power plants] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. YAdernaya energetika*, 2014, no. 3, pp. 25–34 (in Russian).
2. Pavlov S.V., Sukhikh A.V., Sakharov S.S. *Nerazrushayushchaya diagnostika sostoyaniya elementov aktivnykh zon yadernykh reaktorov* [Non-destructive diagnostics of the state of core elements of nuclear reactors]. Dimitrovgrad: DITI MIFI, 2015. 320 p.
3. Pavlov S.V. *Nerazrushayushchie ultrazvukovie metody issledovaniy obluchennogo topliva yadernykh reaktorov* [Non-destructive ultrasonic research methods of irradiated fuel of nuclear reactors]. Dimitrovgrad: JSC “SSC RIAR”, 2013. 256 p.
4. Xu Yuanhuan, Nie Yong Distortion Measurement for Fuel Assemblies with Ultrasonic Technique” Post-Irradiation Examination and In-Pile Measurement Techniques for Water Reactor Fuels. Vienna: IAEA, 2009, IAEA-TECDOC-CD-1635.
5. Gorbатов А.А., Рудашевский Г.Е. *Akusticheskie metody izmereniya rasstoyanij i upravleniya* [Acoustic methods for measuring distances and control]. Moscow: Energoizdat, 1981. 207 p.
6. Ermolov I.N. *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya* [Theory and practice of ultrasonic testing]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 240 p.
7. Pavlov S.V. *Izmenenie izgibnoj zhestkosti TVS VVER-1000 pri ekspluatatsii* [Changes in the bending stiffness of VVER-1000 fuel assemblies during operation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. YAdernaya energetika*, 2016, no. 3, pp. 42–52 (in Russian).
8. Pavlov S.V. *Metody i sredstva issledovaniy TVS VVER dlya eksperimental'nogo soprovozhdeniya vnedreniya novogo topliva na AE'S* [Methods and tools for research of VVER fuel assemblies for experimental support of the introduction of new fuel at nuclear power plants. Dr. eng. sci. diss.]. Dimitrovgrad, 2015. 339 p.
9. Pavlov S.V., Shalaginoва T.M., Mikhailov S.V., Prokudanov D.L. *Issledovanie vliyaniya estestvennoj konvekcii na rezul'taty izmereniya geometricheskikh xarakteristik tve'lov i teplovy'delyayushhix sborok ul'trazvukovy'mi metodami v usloviyax bassejnov vy'derzhki* [Investigation of the effect of natural convection on the results of measuring the geometric characteristics of fuel rods and fuel assemblies by ultrasonic methods in conditions of cooling pond]. Dimitrovgrad: RIAR, 1991. 28 p.
10. Brazhnikov, N.I. *Ul'trazvukovy'e metody* [Ultrasonic methods]. In Shumilovskogo N.N. (ed.), Moscow, Leningrad: Energiya, 1965. 248 p.
11. Vybornov B.I. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya* [Ultrasonic flaw detection]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 256 p.
12. Sverdlin G.M. *Prikladnaya gidroakustika* [Applied hydroacoustics]. Leningrad: Sudostroenie, 1976. 280 p.
13. Voronina A.V., Pavlov S.V. *Metodika i programma rascheta skorosti zvuka v vode v usloviyakh estestvennoj konvekcii u poverhnosti teplovy'delyayushchih sborok yadernykh reaktorov* [Method and Program to Calculate the Speed of Sound in Water under the Conditions of Natural Convection along the Surface of Fuel Assemblies of Nuclear Reactors]. *Vestnik Nacional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta “MIFI”*, 2019. vol. 8. no 5. pp. 465–472. <https://doi.org/10.1134/S2304487X19050080> (in Russian).