

УДК 620.179.162

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-6

Верификация математической модели акустического тракта ультразвукового метода измерения расстояний до нагретой вертикальной пластины в присутствии естественной конвекции

А. В. Воронина¹, С. В. Павлов²

^{1,2}Дмитровградский инженерно-технологический институт – филиал НИЯУ «МИФИ», Дмитровград, Ульяновская обл., Россия

¹AVVoronina@mephi.ru, ²pavlov@sosny.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Представлена математическая модель акустического тракта ультразвукового метода измерения расстояний до нагретой вертикальной пластины, разработанная в приближении геометрической акустики. На основании модели выделены факторы, влияющие на результат измерения времени распространения ультразвуковых волн. Целью работы является оценка применимости модели при разработке ультразвуковых эхо-импульсных измерительных систем. *Материалы и методы.* Верификация модели акустического тракта проводилась путем сопоставления численных и экспериментальных данных, полученных авторами при моделировании воздействия различных факторов на результаты измерений ультразвукового метода. *Результаты и выводы.* В результате проведения верификации показано, что расчетные данные, полученные с использованием разработанной модели, дают хорошее согласие с экспериментальными данными. Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что представленная модель может использоваться при разработке измерительных систем, основанных на ультразвуковом эхо-импульсном методе.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, ультразвук, модель, геометрическая акустика, естественная конвекция, рефракция

Для цитирования: 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. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-6

Verification of the acoustic path mathematical model of the ultrasonic method for measuring distances to a heated vertical plate in conditions of natural convection

A.V. Voronina¹, S.V. Pavlov²

^{1,2}Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute, National Research Nuclear University MEPhI, Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia

¹AVVoronina@mephi.ru, ²pavlov@sosny.ru

Abstract. *Background.* This article describes a mathematical model of the acoustic path of the ultrasonic method for measuring distances to a heated vertical plate, developed in the geometrical-acoustics approximation. Based on the model, the factors influencing the measurement of the propagation time of ultrasonic waves are identified. The purpose of the work is an evaluation of applicability of the model for the development of ultrasonic pulse echo measuring systems. *Materials and methods.* The model of the acoustic path is verified

by comparing the numerical data with experimental obtained by the authors when modeling the effect of various factors on the measurement results of the ultrasonic method. *Results and conclusions.* As a result of the verification shows that the calculated data obtained using the developed model, give good agreement with experimental data. The study lead to the conclusion that the presented model can be used in the development of measuring systems based on the ultrasonic echo-pulse method.

Keywords: ultrasound method, ultrasound, model, geometric acoustics, natural convection, refraction

For citation: Voronina A.V., Pavlov S.V. Verification of the acoustic path mathematical model of the ultrasonic method for measuring distances to a heated vertical plate in conditions of natural convection. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;2:63–76. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-6

Введение

Ультразвуковые эхо-импульсные методы измерения линейных размеров нашли широкое применение в различных областях техники при диагностике и контроле изделий и технологических процессов [1]. Наибольшую известность в силу своей массовости получили методы ультразвуковой толщинометрии и размеромерии, которые основаны на измерении времени распространения ультразвуковых волн в контролируемом объекте или в среде, окружающей этот объект от датчика до отражающей волны поверхности и обратно к этому же датчику. Зная скорость звука в среде распространения ультразвуковых волн, вычисляют длину пути волн и затем определяют расстояние от датчика до соответствующей отражающей поверхности [2, 3].

Как одну из разновидностей ультразвуковой размеромерии можно рассматривать класс задач, в которых измеряют расстояние от датчика до поверхности контролируемого объекта, находящегося в жидкой или газообразной средах. В частности, к таким задачам можно отнести контроль за формоизменением ядерного топлива после его эксплуатации в ядерном реакторе и выгрузке в водяной бассейн выдержки на атомной станции [4, 5].

Принцип контроля за формоизменением ядерного топлива основан на принципе работы координатно-измерительных машин [6]. С помощью ультразвуковых эхо-импульсных датчиков производится сканирование поверхности ядерного топлива. При этом измеряется расстояние от датчиков до определенных контрольных точек поверхности объекта контроля. Затем в заданной заранее системе координат высчитывают координаты контрольных точек поверхности ядерного топлива, сравнивают с эталонными значениями и определяют его формоизменение.

Одной из особенностей контроля выгруженного из реактора ядерного топлива является нейтронное и гамма-излучение, а также значительное, до сотни киловатт, остаточное тепловыделение, которое является причиной возникновения естественной конвекции у поверхности топлива. Естественная конвекция оказывает существенное влияние на распространение ультразвуковых волн в воде и, следовательно, влияет на результаты контроля.

Для создания ультразвуковой системы контроля за формоизменением ядерного топлива российских реакторов ВВЭР-1000 была разработана математическая модель акустического тракта ультразвукового эхо-импульсного метода измерения линейных размеров [7]. Модель описывает распространение ультразвуковых волн в воде с учетом естественной конвекции у поверх-

ности ядерного топлива. Волны распространяются от датчика до поверхности топлива, отражаются от нее и принимаются этим же датчиком.

Модель разработана в приближении геометрической акустики, учитывает рефракцию ультразвуковых волн, изменение скорости звука в воде вдоль траектории распространения волн и их наклонное падение на поверхность ядерного топлива. Для практического использования разработанной модели ее необходимо верифицировать, желательно с помощью экспериментально полученных данных. При этом наибольшую трудность представляет определение профиля температуры воды и, соответственно, профиля скорости звука в пограничном конвективном слое у поверхности ядерного топлива.

В связи с этим в качестве приближения поверхность ядерного топлива, обращенная к ультразвуковым датчикам, моделируется нагретой вертикальной пластиной. Выбор нагретой пластины объясняется, с одной стороны, близким ее подобием с теплофизической точки зрения поверхности ядерного топлива, а с другой – достаточно хорошей изученностью естественной конвекции у ее поверхности.

Таким образом, верификация математической модели, полученной для произвольного профиля температуры в конвективном пограничном слое у поверхности ядерного топлива, сводится к более простой задаче – верификации математической модели для нагретой вертикальной пластины. Следует отметить, что модель с нагретой вертикальной пластиной может иметь более широкое применение в промышленности в сравнении с конкретной задачей контроля формоизменения ядерного топлива.

Математическая модель акустического тракта

Ультразвуковой датчик, расположенный вблизи поверхности, распространяет ультразвуковые волны (УЗ-волны), которые, отражаясь от нее, возвращаются обратно в датчик. Вследствие естественной конвекции у поверхности нагретой пластины формируется пограничный тепловой слой. В пределах пограничного слоя температура среды изменяется от значения, равного температуре стенки $T_{ст}$, до температуры среды T_{∞} на большом расстоянии от пластины (рис. 1). Поскольку вдоль траектории распространения УЗ-волн существует градиент температур, то возникает изменение скорости звука, что приводит к изменению времени распространения УЗ-волн.

Дополнительно на результат измерения влияет неоднородность структуры среды в тепловом слое. Структура слоя изменяется по длине пластины и зависит от режима течения, характеризующегося числом Рэлея. На начальном участке пластины с постоянным тепловым потоком при $Ra < 3 \cdot 10^{12}$ образуется ламинарный пограничный слой, течение в котором имеет струйный характер. Выше по пластине происходит переход ламинарного течения в турбулентное. При $Ra > 4 \cdot 10^{13}$ у поверхности пластины развивается турбулентный режим, который сопровождается хаотическим пульсационным движением вихрей в пограничном слое. Неоднородности среды в виде турбулентных вихрей, масштаб которых меньше длины волны, приводят к рассеиванию волн. Если масштаб неоднородности значительно больше длины волны, то волна отклоняется в сторону. Таким образом, неравномерности потока в области турбулентного пограничного слоя приводят к возникновению флуктуации амплитуды эхо-сигналов по причине изменения условия отражения УЗ-волн от объекта.

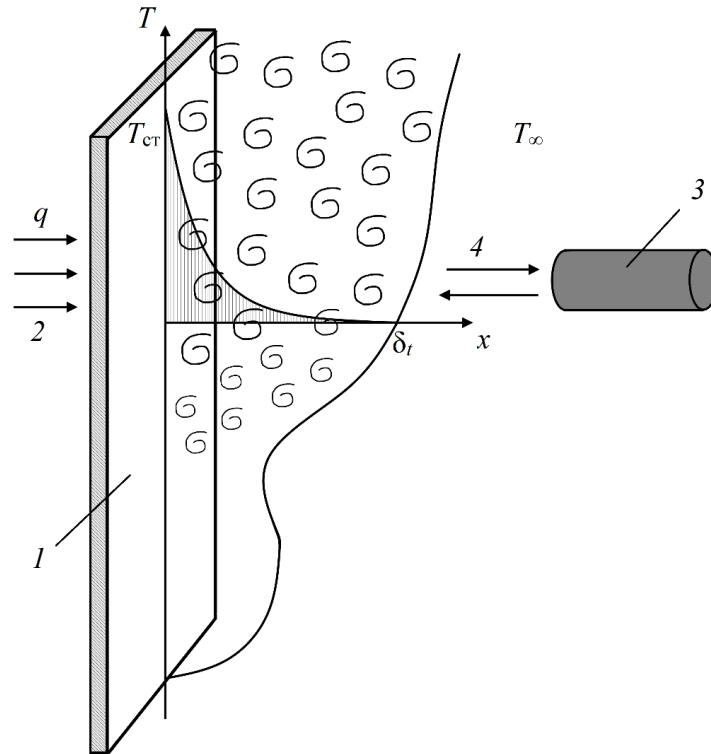


Рис. 1. Профиль температуры в пограничном слое у поверхности нагретой пластины:
 1 – пластина; 2 – направление теплового потока; 3 – датчик;
 4 – направления распространения ультразвуковых волн

Акустическое поле датчика разделяют на две зоны (рис. 2): ближнюю, в которой амплитуда сигнала постоянна, и дальнюю, в которой возникает нарушение синфазности, что сопровождается изменением амплитуды. Граница ближней зоны x_6 зависит от радиуса датчика R и длины волны λ :

$$x_6 = \frac{R^2}{\lambda}. \quad (1)$$

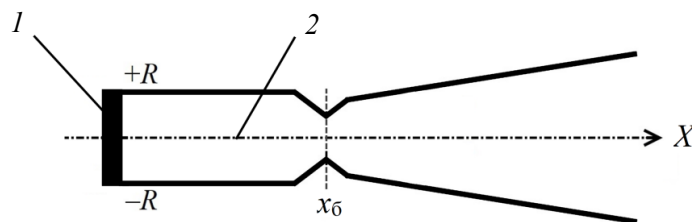


Рис. 2. Схема поля излучения ультразвукового датчика:
 1 – датчик; 2 – акустическая ось датчика

В пределах ближней зоны распространение УЗ-волн соответствует законам геометрической оптики при выполнении условий применимости [8, 9]:

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 X – расстояние от датчика до исследуемой поверхности; α – угол падения, град.

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

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

Математическая модель акустического тракта, разработанная авторами, описывает время распространения УЗ-волны в однородной среде от датчика до поверхности пластины и обратно в ближней зоне датчика в приближении геометрической акустики. Под однородностью среды подразумевается отсутствие турбулентных вихрей в пограничном слое вблизи поверхности пластины. Модель учитывает температурные изменения среды и связанную с этим рефракцию: искривление направления движения УЗ-волны.

Время распространения УЗ-волны в модели определяется как

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \Delta\tau_A, \quad (5)$$

где τ_1 – время распространения УЗ-волны от датчика до пограничного слоя; τ_2 – время распространения УЗ-волны в пограничном слое; τ_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 .

Первые три слагаемых определяются исходя из траектории распространения УЗ-волн в среде. В среде, где температура постоянна и равна T_∞ , время прохождения УЗ-волны можно определить по формуле

$$\tau = \frac{L}{c(T_\infty)},$$

где L – пройденный УЗ-волной путь; $c(T_\infty)$ – значение скорости при температуре T_∞ .

При наклонном падении УЗ-волны на поверхность ее траектория в области пограничного слоя не будет прямолинейной (рис. 3). Тогда время распространения УЗ-волн в пограничном слое определяется исходя из известного распределения температуры в слое $T(x)$:

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

где δ_t – толщина теплового пограничного слоя.

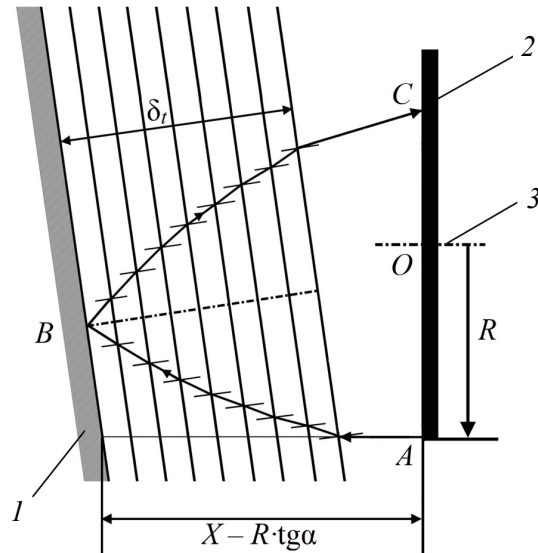


Рис. 3. Траектория распространения УЗ-волны до нагретой поверхности: 1 – пластина; 2 – датчик; 3 – акустическая ось; α – угол наклона поверхности

Поскольку время распространения УЗ-волны в среде измеряется автоматически по переднему фронту эхо-импульса, то временной интервал $\Delta\tau_A$ будет зависеть от уровня порога A_0 , по которому происходит измерение времени τ . На рис. 4 показано, что при увеличении уровня порога A_0 временной интервал $\Delta\tau_A$ будет увеличиваться.

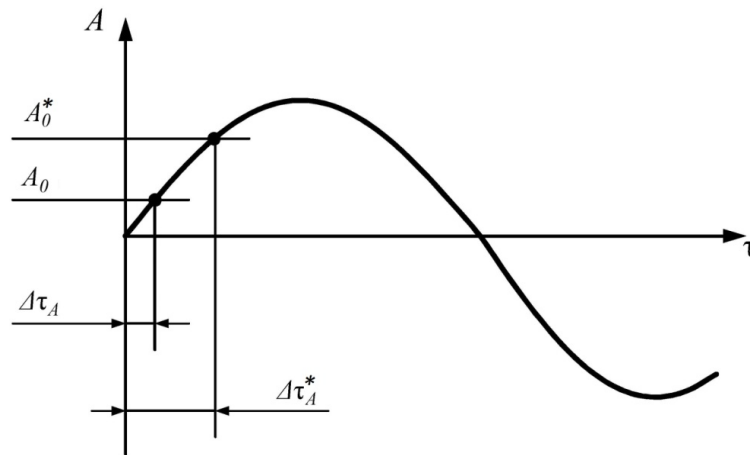


Рис. 4. Измерение времени прихода эхо-импульса

Передний фронт импульса формируется той частью пучка, которая проходит наименьшее расстояние от датчика до поверхности пластины. В приближении геометрической акустики наименьшее расстояние в случае наклонного падения волн на поверхность пройдет луч из точки A , находящийся на окружности датчика (рис. 3).

Тогда на основании математической модели время распространения УЗ-волны составит

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \Delta\tau_A =$$

$$= \frac{X - R \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{\delta_t}{\cos \alpha}}{c(T_\infty)} \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos 2\alpha}\right) + 2 \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{c(T(x)) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}} +$$

$$+ \frac{2 \sin^2 \alpha}{c(T_\infty)^2 \cos 2\alpha} \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{c(T(x)) dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}} + \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k), \quad (6)$$

где f – частота волны; k – отношение амплитуды порога A_0 и максимальной амплитуды сигнала A_{\max} .

Если УЗ-волна падает нормально к исследуемой поверхности нагретой пластины ($\alpha = 0$), то выражение примет вид

$$\tau = 2 \cdot \frac{X - \delta_t}{c(T_\infty)} + 2 \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{c(T(x))} + \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k). \quad (7)$$

В случае наклонного падения на поверхность ненагретой пластины ($T_{\text{ст}} = T_\infty$) выражение (6) упростится:

$$\tau = \frac{X - R \cdot \operatorname{tg} \alpha}{c(T_\infty)} \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos 2\alpha}\right) + \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k). \quad (8)$$

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

В соответствии с разработанной математической моделью акустического тракта метода измерения расстояний от ультразвукового датчика до поверхности пластины на результат измерения времени распространения ультразвуковых волн влияют три группы факторов: наличие естественной конвекции у поверхности нагретой пластины; наклонное падение ультразвуковых волн на поверхность пластины и изменение амплитуды принятых сигналов.

Концепция экспериментальной проверки математической модели акустического тракта метода заключается в натурном моделировании каждой группы факторов по отдельности. Таким образом, моделировались следующие условия:

– влияние естественной конвекции на время распространения ультразвуковых волн при перпендикулярном направлении акустической оси датчика к поверхности пластины;

– наклонное падение ультразвуковых волн на поверхность пластины при отсутствии естественной конвекции;

– изменение амплитуды принятого датчиком сигнала относительно величины порога отсчета времени распространения волн по переднему фронту эхо-импульса.

Результаты экспериментальных исследований влияния естественной конвекции на измерения линейных размеров в воде ультразвуковым эхо-

импульсным методом изложены в работе [10]. Эксперименты проводились в бассейне с водой (размеры $5 \times 3 \times 10$ м), в котором вертикально располагался электрообогреваемый цилиндр диаметром 74 мм и высотой 1700 мм. Естественная конвекция возникала у поверхности электрообогреваемого цилиндра при его нагреве. Конструкция цилиндра обеспечивала постоянное по его высоте значение плотности теплового потока и позволяла ее регулировать в диапазоне от 0 до $7,00 \text{ кВт/м}^2$.

Ультразвуковой датчик, работающий в эхо-импульсном режиме, располагался на расстоянии ~ 80 мм от поверхности цилиндра, акустическая ось датчика была перпендикулярна образующей цилиндра. Датчик устанавливался на трех разных высотных отметках относительно торца цилиндра, равных 295; 855 и 1415 мм. В датчике использовался доскообразный пьезоэлемент из пьезокерамики ЦТС-19 с резонансной частотой 5 МГц. Эксперименты проводились на ненагретом цилиндре и нагретом с плотностью теплового потока, равной 1,25; 2,80; 5,00 и $7,00 \text{ кВт/м}^2$.

Схема проведения экспериментов заключалась в следующем:

– ультразвуковой датчик устанавливали на одной из трех обозначенных выше высотных отметок;

– измеряли время распространения ультразвуковых волн от датчика до ненагретого цилиндра и вычисляли соответствующее расстояние между ними;

– подавали электрическое напряжение на электрообогреваемый цилиндр и устанавливали плотность теплового потока равной $1,25 \text{ кВт/м}^2$;

– измеряли время распространения волн и вычисляли расстояние от датчика до цилиндра;

– устанавливали плотность теплового потока, равную $2,80 \text{ кВт/м}^2$ и т.д.;

– затем датчик устанавливали на следующую высотную отметку и повторяли всю вышеописанную последовательность действий.

При неизменном расстоянии от датчика до поверхности цилиндра во время его разогрева при плотности теплового потока от $1,25$ до $7,00 \text{ кВт/м}^2$ устанавливаются определенные параметры естественной конвекции вдоль траектории распространения ультразвуковых волн, которые можно охарактеризовать шириной конвективного слоя и профилем осредненной по времени температуры воды в этом слое. При этом время распространения волн (среднее значение из временной выборки сигналов) с повышением плотности теплового потока будет уменьшаться и соответственно будет уменьшаться измеренное расстояние от датчика до поверхности цилиндра.

На рис. 5 приведены экспериментальные данные для двух серий экспериментов на высотных отметках 855 и 1415 мм. Первая серия экспериментов (на отметке 855 мм) соответствовала окончанию переходной области от ламинарного к турбулентному режиму естественной конвекции ($Ra \approx 2 \dots 4 \cdot 10^{13}$). Вторая серия (на отметке 1415 мм) соответствовала полностью установившейся развитой турбулентной конвекции с $Ra > 10^{14}$. На рис. 5 по оси ординат отложена величина ΔX уменьшения значения измеренного расстояния от датчика до поверхности цилиндра относительно расстояния до ненагретого цилиндра.

С помощью разработанной математической модели акустического тракта метода было выполнено численное моделирование проведенных экспериментов. Расчет профиля температуры в конвективном слое выполнялся

для плоской вертикальной пластины с постоянной плотностью теплового потока. Выбор пластины в качестве тела, вдоль поверхности которого моделировалась конвекция, объясняется несколькими причинами.

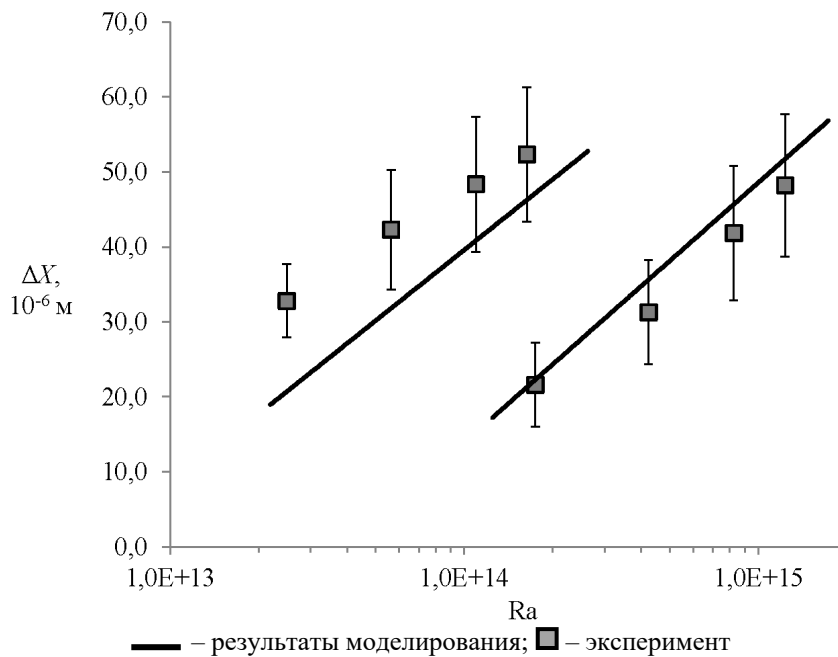


Рис. 5. Зависимость погрешности измерений при наличии естественной конвекции

Во-первых, для плоской пластины существует значительный объем опубликованных результатов расчетно-экспериментальных исследований естественной конвекции [11–13]. Во-вторых, плоская пластина рассматривается как наиболее простая и в то же время наиболее распространенная в практике элементарная поверхность контролируемых ультразвуковым методом объектов. В-третьих, плоскую пластину можно рассматривать при описании естественной конвекции как первое приближение к поверхности цилиндра, с помощью которого выполнялись вышеперечисленные эксперименты.

Для плоской вертикальной пластины с постоянной плотностью теплового потока q профили температуры $T(x)$ рассчитываются следующим образом [12]:

$$T(x) = \Delta T \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{12\delta_h} \right)^{1/15} \right) + T_V, \text{ при } \frac{x}{h} > 1,6, \quad (9)$$

$$T(x) = \Delta T \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{4\delta_h} \right)^{1/7} \right) + T_V, \text{ при } \frac{x}{h} \leq 1,6, \quad (10)$$

где $\Delta T = \frac{qy}{N_y \lambda}$; y – координата по высоте пластины от нижнего торца; x – координата вдоль нормали к поверхности пластины; T_∞ – температура воды

вдали от пластины; Nu_y – число Нуссельта, $Nu_y = 0,568 \cdot (Ra_y)^{0,22}$; h – толщина потери энергии в тепловом пограничном слое: $h = 2,16 \cdot Nu_y^{-1} \cdot y$.

Толщина пограничного слоя δ_t для турбулентного режима определяется расстоянием от поверхности x_δ ($x_\delta = \delta_t$), при котором температура воды составляет 99 % от температуры внешнего потока:

$$\frac{T_s - T(x_\delta)}{T_s - T_\infty} = 0,99, \quad (11)$$

где T_s – температура стенки, °С.

Используя выражения для профиля температуры воды и программу расчета скорости звука в воде в условиях естественной конвекции [14], рассчитали по математической модели изменения времени распространения ультразвуковых волн от датчика до нагретой вертикальной пластины в зависимости от числа Рэлея, которые показаны на рис. 5 сплошными линиями. Результаты расчета хорошо совпадают с экспериментальными данными, особенно для режима развитой турбулентности с $Ra > 10^{14}$ (см. рис. 5).

Экспериментальные исследования акустического тракта метода при наклонном падении ультразвуковых волн на плоскую поверхность проводились следующим образом. В экспериментах использовались несколько датчиков с дисковым пьезоэлементом диаметром 18 мм и резонансной частотой $f_p = 5$ МГц. Отражающая ультразвуковые волны плоская пластина устанавливалась в ближней зоне акустического поля датчиков на расстоянии ~ 110 мм. Угол падения волн на поверхность пластины изменялся в диапазоне от 0° до 3° . При угле, большем чем 3° , часть ультразвукового луча после отражения не попадает на пьезоэлемент датчика и амплитуда принятого сигнала резко уменьшается.

Пластина с помощью микрометрического столика перемещалась относительно своего исходного положения на 3; 6; 9 и 12 мм. При этом измерялось приращение расстояния и сравнивалось с величиной перемещения микрометрического столика. Проведенные эксперименты обсчитывались по математической модели акустического тракта метода. Результаты расчетов и экспериментов приведены на рис. 6.

Анализируя рис. 6, можно отметить следующее. Все экспериментальные значения лежат выше расчетных, причем с увеличением приращения расстояния ΔX между датчиком и пластиной разница между экспериментом и расчетом увеличивается. Тем не менее характер увеличения погрешности измерения приращения расстояния от датчика до пластины с увеличением угла падения волн на пластину совпадает с соответствующей расчетной закономерностью. Таким образом, расчетные значения, представленные на рис. 6, можно рассматривать как хорошее приближение «снизу» к полученным экспериментальным значениям.

Экспериментальные исследования влияния величины порога отсчета времени распространения ультразвуковых волн по переднему фронту принятого сигнала проводились путем изменения величины порога относительно максимальной амплитуды первой полуволны сигнала. Изменение величины порога относительно максимальной амплитуды первой полуволны может

привести к изменению измеренного расстояния не более одной восьмой длины волны, что для ультразвуковых волн с частотой 5 МГц в воде составляет ~ 38 мкм. На рис. 7 приведены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных по модели приращений измеренных расстояний в зависимости от отношения величины порога к амплитуде первой полуволны сигнала. Результаты эксперимента достаточно хорошо совпадают с расчетными значениями, особенно в области $A_0/A_{\max} < 0,5$, которая обычно используется в измерениях на практике.

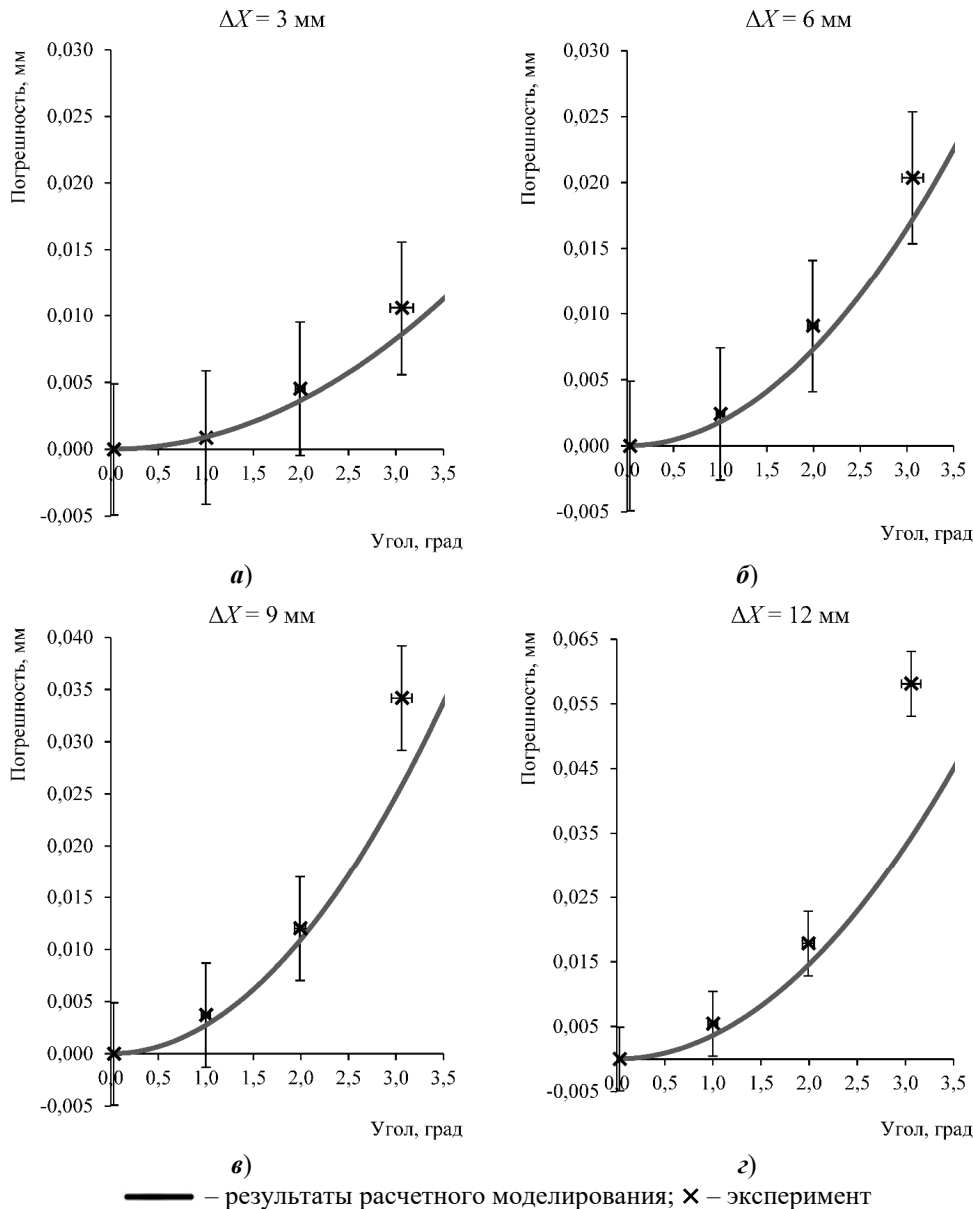
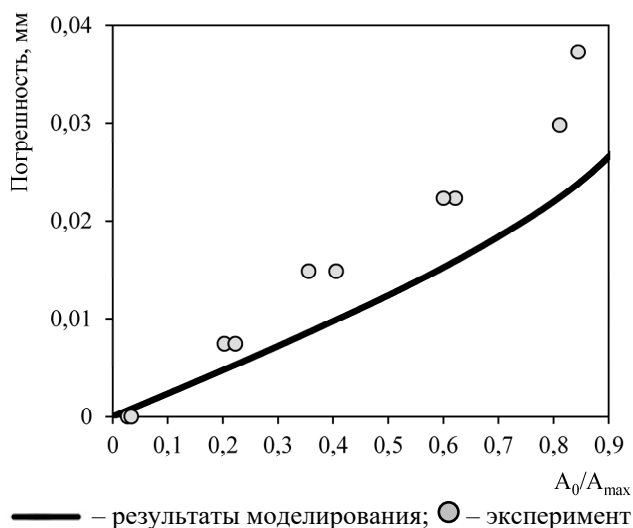


Рис. 6. Зависимость погрешности измерений от угла наклона пластины для различных значений ΔX : а – 3 мм; б – 6 мм; в – 9 мм; з – 12 мм

Рис. 7. Зависимость погрешности от амплитуды порога A_0

Заключение

Математическая модель акустического тракта ультразвукового эхо-импульсного метода измерения расстояний от датчика до отражающей волны поверхности, разработанная в приближении геометрической акустики и в представлении конвективного слоя у нагретой вертикальной плоской поверхности в виде плоскопараллельной слоистой водной системы с монотонно убывающим от поверхности профилем температуры воды, удовлетворительно описывает время распространения ультразвуковых волн в воде от датчика до вертикальной нагретой плоской пластины и обратно.

Показано, что для естественной конвекции в воде у вертикальной нагретой плоской поверхности с числами Рэлея от $2,3 \cdot 10^{13}$ до $1,3 \cdot 10^{15}$ распространение ультразвуковых волн с частотой 5 МГц в первом приближении можно рассматривать как распространение в слоистой параллельной поверхности нагрева водной системе с монотонно убывающим от поверхности профилем температуры, совпадающим с профилем осредненной по времени температуры воды в конвективном слое.

Распространение волн в ламинарном конвективном слое ($Ra < 3 \cdot 10^{12}$) можно также рассматривать как распространение в слоистой плоскопараллельной водной системе с профилем температуры, равным профилю температуры в ламинарном слое.

Разработанная математическая модель может использоваться при разработке ультразвуковых эхо-импульсных измерительных систем, основанных на измерении времени распространения ультразвуковых волн в жидкости, при естественной конвекции вдоль вертикальных нагретых поверхностей, до которых измеряется расстояние.

Список литературы

1. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М. : Машиностроение, 1981. 240 с.
2. Королев М. В. Эхо-импульсные толщиномеры. М. : Машиностроение, 1980. 114 с.
3. Горбатов А. А., Рудашевский Г. Е. Акустические методы измерения расстояний и управления. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоиздат, 1981. 207 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. Павлов С. В. Неразрушающие ультразвуковые методы исследований облучённого топлива ядерных реакторов. Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР», 2013. 256 с.
6. Гапшис А. А., Каспарайтис А. Ю., Модестов М. Б. [и др.]. Координатные измерительные машины и их применение. М. : Машиностроение, 1988. 328 с.
7. 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 НИЯУ «МИФИ»*. 2020. Т. 9, № 3. С. 217–225. doi:10.1134/S2304487X20030104
8. Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. М. : Metallurgia, 1985. 256 с.
9. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Л. : Судостроение, 1976. 280 с.
10. 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.
11. Lock G. S. H., F. J. de V. Trotter Observations on the structure of a turbulent free convection boundary layer // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1968. Vol. 11. P. 1225–1232. doi:10.1016/0017-9310(68)90193-2
12. Vliet G. C., Liv C. K. An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers // *Journal of Heat Transfer*. 1969. Vol. 92. P. 517–531. doi:10.1115/1.3580236
13. Qureshi Z. H., Gebhart B. Transition and transport in a buoyancy driven flow in water adjacent to a vertical uniform flux surface // *Int. J. Heat Mass Transform*. 1978. Vol. 21. P. 1467–1479. doi:10.1016/0017-9310(78)90003-0
14. 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. doi:10.1134/S2304487X19050080

References

1. Ermolov I.N. *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya = Theory and practice of ultrasonic testing*. Moscow: Mashinostroenie, 1981:240. (In Russ.)
2. Korolev M.V. *Ekho-impul'snye tolshchinomery = Pulse and echo thickness gauges*. Moscow: Mashinostroenie, 1980:114. (In Russ.)
3. Gorbатов А.А., Rudashevskiy G.E. *Akusticheskie metody izmereniya rasstoyaniy i upravleniya. 2-e izd., pererab. i dop. = Acoustic distance measurement and control methods. The 2nd edition, revised and supplemented*. Moscow: Energoizdat, 1981:207. (In Russ.)
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. Pavlov S.V. *Nerazrushayushchie ul'trazvukovye metody issledovaniy obluchennogo topliva yadernykh reaktorov = Non-destructive ultrasonic methods for studying irradiated fuel of nuclear reactors*. Dimitrovgrad: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2013:256. (In Russ.)
6. Gapshis A.A., Kasparaytis A.Yu., Modestov M.B. [et al.]. *Koordinatnye izmeritel'nye mashiny i ikh primenenie = Coordinate measuring machines and their applications*. Moscow: Mashinostroenie, 1988:328. (In Russ.)
7. Voronina A.V., Pavlov S.V. Mathematical model of the acoustic path of the pulse-echo method for measuring the geometric parameters of the fuel assembly of a nuclear reactor in the approximation of geometric acoustics. *Vestnik NIYaU «MIFI» = Bulletin of*

- National Research Nuclear University MEPHI*. 2020;9(3):217–225. (In Russ.). doi:10.1134/S2304487X20030104
8. Vybornov B.I. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya = Ultrasonic flaw detection*. Moscow: Metallurgiya, 1985:256. (In Russ.)
 9. Sverdlin G.M. *Prikladnaya gidroakustika = Applied hydroacoustics*. Leningrad: Sudostroenie, 1976:280. (In Russ.)
 10. Pavlov S.V., Shalaginova T.M., Mikhaylov S.V., Prokudanov D.L. *Issledovanie vliyaniya estestvennoy konveksii na rezul'taty izmereniya geometricheskikh kharakteristik tvelov i teplovydelyayushchikh sborok ul'trazvukovymi metodami v usloviyakh basseynov vyderzhki: preprint = Studying the influence of natural convection on the results of measuring the geometric characteristics of fuel rods and fuel assemblies by ultrasonic methods under conditions of pool holding: preprint*. Dimitrovgrad: NIIAR, 1991:28. (In Russ.)
 11. Lock G.S.H., F.J. de B. Trotter Observations on the structure of a turbulent free convection boundary layer. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1968;11:1225–1232. doi:10.1016/0017-9310(68)90193-2
 12. Vliet G.C., Liv C.K. An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers. *Journal of Heat Transfer*. 1969;92:517–531. doi:10.1115/1.3580236
 13. Qureshi Z.H., Gebhart V. Transition and transport in a buoyancy driven flow in water adjacent to a vertical uniform flux surface. *Int. J. Heat Mass Transform.* 1978;21:1467–1479. doi:10.1016/0017-9310(78)90003-0
 14. Voronina A.V., Pavlov S.V. Method and program for calculating the speed of sound in water under conditions of natural convection at the surface of fuel assemblies of nuclear reactors. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI = Bulletin of National Research Nuclear University MEPHI*. 2019;8(5):465–472. (In Russ.). doi:10.1134/S2304487X19050080

Информация об авторах / Information about the authors

Александра Владимировна Воронина

аспирант, старший преподаватель, кафедра ядерных реакторов и материалов, Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал НИЯУ «МИФИ» (Россия, Ульяновская обл., г. Димитровград, ул. Куйбышева, 294)

E-mail: AVVoronina@mephi.ru

Aleksandra V. Voronina

Postgraduate student, senior lecturer, sub-department of nuclear reactors and materials, Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute – branch of National Research Nuclear University MEPHI (294 Kuiuysheva street, Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia)

Сергей Владленович Павлов

доктор технических наук, доцент, заведующий базовой кафедрой при ООО НПФ «СОСНЫ», Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал НИЯУ «МИФИ» (Россия, Ульяновская обл., г. Димитровград, ул. Куйбышева, 294)

E-mail: pavlov@sosny.ru

Sergey V. Pavlov

Doctor of engineering sciences, associate professor, head of the base sub-department at LLC NPF “Sosny”, Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute – branch of National Research Nuclear University MEPHI (294 Kuiuysheva street, Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia)

Поступила в редакцию / Received 09.11.2020

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 20.12.2020

Принята к публикации / Accepted 15.01.2021