

МЕТОДИКА И ПРОГРАММА РАСЧЕТА СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОДЕ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ У ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

© 2019 г. А. В. Воронина^{1,*}, С. В. Павлов¹

¹ Димитровградский инженерно-технологический институт –
филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Димитровград, 433511, Россия

*e-mail: AVVoronina@mephi.ru

Поступила в редакцию 05.06.2019 г.

После доработки 02.08.2019 г.

Принята к публикации 27.08.2019 г.

Рассмотрен принцип ультразвукового метода определения формоизменения ТВС в бассейнах выдержки АЭС. Показано, что вызванная остаточным тепловыделением естественная конвекция влияет на увеличение погрешности измерений при использовании ультразвукового метода. Предложена методика расчета процесса теплообмена при свободной конвекции с граничными условиями II рода. Проверка разработанной методики проводилась путем проведения расчетов в условиях экспериментов, в которых исследовалось изменение температуры в воде внутри свободноконвективного ламинарного и турбулентного теплового пограничного слоя. Анализ экспериментальных и расчетных данных показывает, что используемая методика достаточно адекватно описывает процесс теплообмена при естественной конвекции. На ее основе разработан алгоритм и создана программа для расчета скорости звука в воде в ламинарном и турбулентном пограничном слое у поверхности вертикальной нагретой пластины, моделирующей в первом приближении нагретую поверхность ТВС ВВЭР-1000. Разработанная программа вычисляет также параметры пограничного слоя, температуру подогрева, профиль температуры вдоль акустической оси ультразвукового датчика. Программа может быть использована для приближенных оценок влияния конвекции на результаты измерений и для верификации CFD-кодов применительно к расчету параметров естественной конвекции у поверхности ТВС ВВЭР-1000 с учетом наличия остаточного тепловыделения.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, ТВС, свободная конвекция, пограничный слой, скорость звука

DOI: 10.1134/S2304487X19050080

ВВЕДЕНИЕ

Геометрическая стабильность тепловыделяющих сборок (ТВС) ядерных реакторов, характеризующаяся непревышением определенных значений параметров формоизменения на протяжении всего срока эксплуатации, является залогом надежной и безопасной работы, как самой сборки, так и энергоблока в целом. Для наиболее распространенного в России энергетического реактора ВВЭР-1000 параметрами, определяющими формоизменение сборки, являются величина и форма прогиба вертикальной оси ТВС, угол скручивания. Последний определяется по углу поворота дистанционирующей решетки (ДР) вокруг вертикальной оси относительно своего исходного положения до эксплуатации ТВС.

Эти параметры определяются в результате измерений геометрических характеристик ТВС с помощью неразрушающих методов либо на стен-

дах инспекции и ремонта ТВС на АЭС [1], либо в защитных камерах в исследовательских центрах [2].

Наличие воды в бассейнах выдержки АЭС дает возможность использовать при инспекциях ТВС на стендах инспекции и ремонта ультразвуковые методы (УЗ-методы), которые широко используются в других областях промышленности. Привлекательность использования УЗ-методов размеромерии объясняется отсутствием контакта датчиков с измеряемой ТВС. Это в значительной мере снижает вероятность повреждения ТВС при измерениях и существенно упрощает конструкцию измерительных узлов стенда [3].

Для определения величины прогиба и угла скручивания ТВС ВВЭР-1000 определяются координаты точек поверхности ободов ДР в заранее определенной системе координат, связанной или с самой ТВС, или со стендом инспекции. Зная

эти координаты, с помощью простых формул вычисляются искомые величины [4].

При использовании ультразвукового эхо-импульсного метода координаты точек поверхности исследуемой ТВС определяются следующим образом. Измеряется время τ распространения ультразвуковых волн от датчика до поверхности ТВС и обратно. Затем, задавшись соответствующим данной температуре значением скорости звука в воде c , определяют расстояние от датчика до поверхности ТВС X :

$$X = \frac{c\tau}{2}, \quad (1)$$

где c — скорость звука в среде распространения, м/с², τ — время распространения ультразвуковой волны от датчика до объекта и обратно, с.

Вдоль акустической оси датчика откладываются вычисленное по формуле (1) расстояние и определяются координаты точки поверхности ТВС. Для каждого геометрического параметра установлен определенный набор точек поверхности ТВС, знание пространственного положения которых относительно друг друга позволяет определить данный параметр.

В настоящей статье рассматривается влияние естественной конвекции у поверхности ТВС на результаты измерений геометрических характеристик ТВС ультразвуковым методом с учетом остаточного тепловыделения. Предложена методика определения параметров теплообмена в воде внутри свободноконвективного теплового пограничного слоя и разработана программа расчета скорости звука в воде в условиях естественной конвекции у поверхности тепловыделяющих сборок ядерных реакторов.

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На результаты ультразвуковой размеромерии влияют параметры воды, в которой распространяются ультразвуковые волны, и особенно масштаб их изменений вдоль траектории распространения волн. Вследствие наличия остаточного тепловыделения у облученной ТВС, вдоль ее поверхности образуется конвективный слой, существенно влияющий на распространение ультразвуковых волн: температура у поверхности ТВС медленно изменяется вдоль акустической оси датчика (рис. 1).

В нижней части ТВС возникает ламинарный пограничный слой, который затем в верхней части ТВС переходит в турбулентный (степень турбулизации потока напрямую зависит от температуры) [6].

Вследствие того, что скорость звука увеличивается при увеличении температуры воды до

74°C, а затем незначительно уменьшается [7], скорость звука уменьшается при удалении от стенки (рис. 2) и за пределами пограничного слоя имеет постоянное значение $c(T_\infty)$.

Таким образом, время распространения ультразвуковой волны от датчика до плоскости зависит от изменения скорости звука у поверхности ТВС:

$$\tau = \frac{x_0 - \delta_t}{c(T_\infty)} + \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{c(T(x))}, \quad (2)$$

где x_0 — координата расположения датчика; δ_t — толщина теплового пограничного слоя.

На рис. 3 показаны экспериментальные данные методической погрешности измерения диаметра макета ТВС от произведения δ_t на температурный перепад ΔT в пограничном слое [6]. Видно, что свободная конвекция у поверхности ТВС оказывает значительное влияние на результаты измерений параметров формоизменения ТВС УЗ-методом.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ ЗВУКА В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ У ПОВЕРХНОСТИ ТВС

Для изучения влияния естественной конвекции у поверхности ТВС на результаты ультразвуковых измерений используют численное и натуральное моделирование [8]. Методика расчета процесса теплообмена строится на предположении, что поверхность ТВС можно представить вертикальной пластиной с постоянным тепловым потоком через нее. Для пластины существуют достаточно простые аналитические зависимости, описывающие естественную конвекцию у ее поверхности.

В результате проведенного изучения характеристик теплообмена при естественной конвекции авторами разработана программа для расчета скорости звука и профиля температур в области ламинарного и турбулентного режимов теплообмена при свободной конвекции с граничными условиями второго рода в приближении плоской стенки [9].

Режим течения при свободной конвекции определяется произведением чисел Грасгофа Gr и Прандтля Pr , которое называется числом Релея Ra . Следует отметить различную форму записи числа Gr при разных граничных условиях. При граничных условиях II рода ($q = \text{constant}$) выражение для Gr принимает вид (3):

$$Gr_y^* = \frac{g\beta q y^4}{\lambda \nu^2}, \quad (3)$$

где β — коэффициент объемного теплового расширения жидкости, 1/К; q — плотность теплового

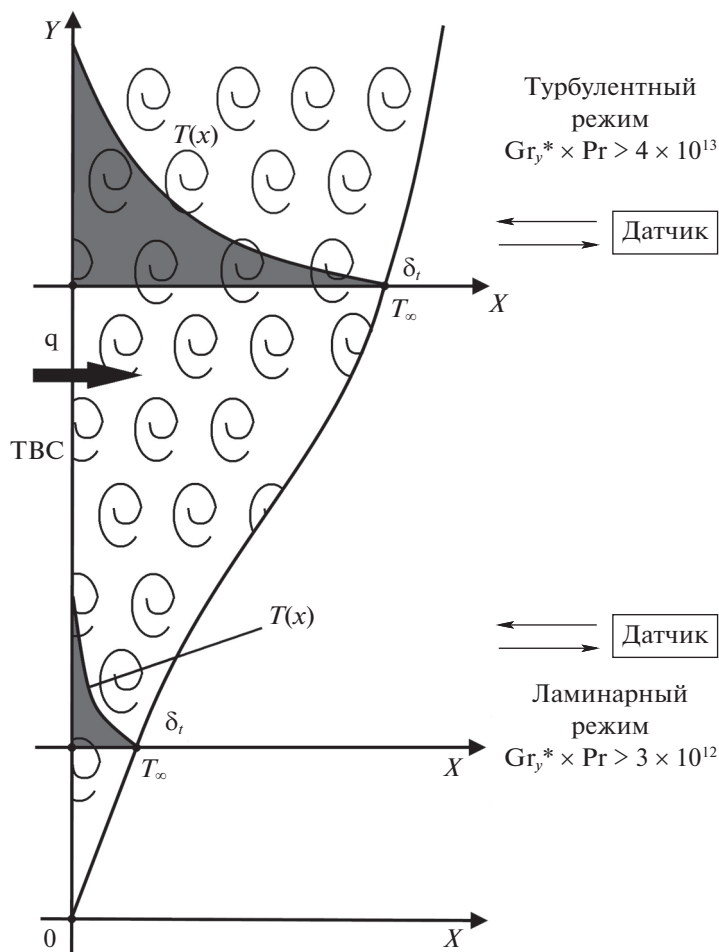


Рис. 1. Изменение профиля температуры в зависимости от режима течения при естественной конвекции [5].

потока, Вт/м²; y — координата вдоль вертикальной оси, м; λ — коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м °С); ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с.

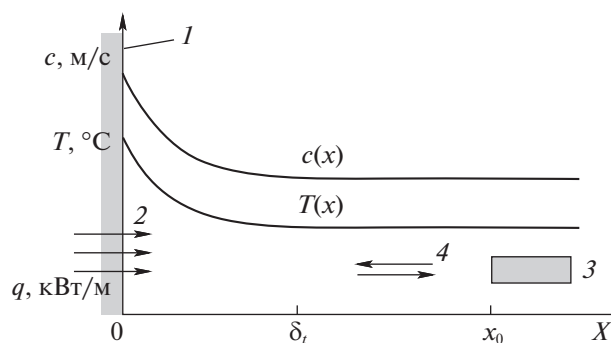


Рис. 2. Схема расположения датчика: 1 — поверхность ТВС; 2 — направление теплового потока; 3 — датчик; 4 — направления распространения ультразвуковых волн; $c(x)$, $T(x)$ — профиль скорости звука и температуры вдоль акустической оси датчика соответственно.

Теплофизические свойства воды определяются при средней температуре пограничного слоя. Для расчета по данным, полученным с помощью функций пакета WaterSteamPro [10], в диапазоне температур от 10 °С до 100 °С в Microsoft Excel были построены графики зависимостей свойств (c , β , λ и ν) от температуры воды T . Аппроксима-

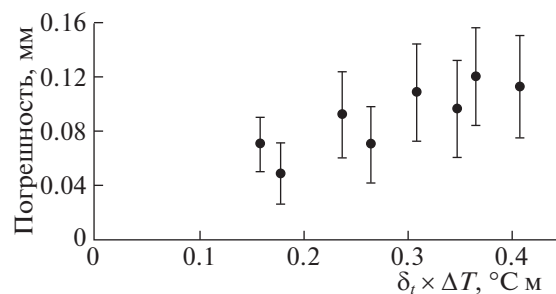


Рис. 3. Зависимость методической погрешности измерения поперечного размера макета ТВС от произведения $\delta_t \Delta T$: • — экспериментальные данные [6].

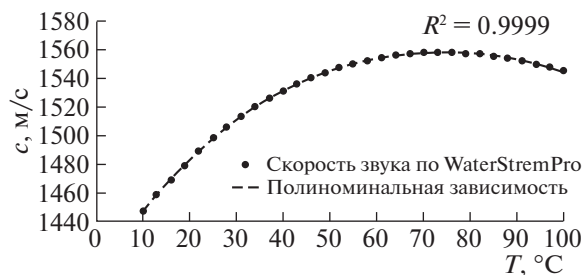


Рис. 4. Зависимость скорости звука в воде от температуры.

ция зависимостей была произведена стандартным методом анализа Excel полиномиальной линией тренда шестой степени для получения требуемой (максимальной) величины достоверности аппроксимации R^2 . Пример построения линии тренда для графика скорости звука представлен на рис. 4. Теплофизические свойства воды, используемые для расчета, представляют вид (4):

$$f(T) = A_1 + A_2T + A_3T^2 + A_4T^3 + A_5T^4 + A_6T^5 + A_7T^6. \quad (4)$$

Изменение температуры вдоль акустической оси датчика для ламинарного режима естественной конвекции определяют по выражению (5) [11]:

$$T(x) = T_V + \Delta T \left(1 - \frac{x}{\delta_t}\right)^2, \quad (5)$$

где T_V — температура воды на большом расстоянии от ТВС, °C; ΔT — температурный перепад, °C; δ_t — толщина теплового пограничного слоя, м.

Толщина теплового пограничного слоя δ_t и температурный перепад ΔT при ламинарном режиме определяются следующими выражениями (6) и (7) [12]:

$$\delta_t = (360)^{1/5} \left[\frac{0.8 + \text{Pr}}{\text{Pr}^2} \right]^{1/5} y (\text{Gr}_y^*)^{-1/5}, \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{(360)^{1/5}}{2} \frac{q_y}{\lambda} (\text{Gr}_y^*)^{-1/5} \left[\frac{0.8 + \text{Pr}}{\text{Pr}^2} \right]^{1/5}. \quad (7)$$

Переход ламинарного режима в турбулентный начинается в области, описанной неравенством (8) [13]:

$$3 \times 10^{12} < \text{Gr}_y^* \text{Pr} < 4 \times 10^{13}. \quad (8)$$

Толщина потери энергии δ_h в тепловом пограничном слое для турбулентного режима естественной конвекции определяется выражением (9) [13]:

$$\delta_h = 2.16 \text{Nu}_y^{-1} y, \quad (9)$$

$$\text{Nu}_y = 0.568 (\text{Gr}_y^* \text{Pr})^{0.22}, \quad (10)$$

где Nu_y — число Нуссельта.

Профили температур вдоль акустической оси датчика для турбулентного режима рассчитывают по формулам (11), (12):

$$T(x) = \Delta T \left(1 - \left(\frac{x}{12\delta_h}\right)^{1/15}\right) + T_V, \quad \text{при } \frac{x}{\delta_h} > 1.6, \quad (11)$$

$$T(x) = \Delta T \left(1 - \left(\frac{x}{4\delta_h}\right)^{1/7}\right) + T_V, \quad \text{при } \frac{x}{\delta_h} \leq 1.6, \quad (12)$$

где

$$\Delta T = \frac{qy}{N_y \lambda}.$$

Как отмечалось ранее, теплофизические свойства воды определяются при средней температуре T_{cp} . Поскольку при граничных условиях $q = \text{constant}$ температура $T_{стен}$ неизвестна, то расчет проводится методом итераций, задаваясь начальной величиной T_{cp} из интервала $[T_V; T_{стен}]$. Выполнив расчет параметров теплообмена естественной конвекции по формулам (5)–(12), определяют T_{cp} по формуле (13):

$$T_{cp} = T_V + \frac{\Delta T}{2}. \quad (13)$$

Если вычисленное и принятое значения T_{cp} не равны, то расчет повторяется, приняв новую T_{cp} , вычисленную по формуле (13), в качестве исходной. Таким образом, итерационный процесс реализуется рекуррентной формулой (14):

$$\begin{cases} T_{cp}^1 = f(T_{cp}^0); \\ T_{cp}^2 = f(T_{cp}^1); \\ \dots \\ T_{cp}^n = f(T_{cp}^{n-1}). \end{cases} \quad (14)$$

Процесс прекращается, как только выполняется условие (15):

$$T_{cp}^n - T_{cp}^{n-1} \leq \varepsilon, \quad (15)$$

где ε — заданная точность, равная 0,001.

При расчете параметров теплообмена высота пластины H разбивается с шагом $Step$ на m частей. Проводится цикл вычислений по высоте пластины H таким образом, что при каждом значении $y_m = y_{m-1} + Step$ выполняется итерационный процесс расчета для поиска T_{cp} . В зависимости от режима теплообмена с помощью условного оператора *if* выбираются формулы для расчета чисел подобия, ΔT и др. Средней температуре T_{cp} , вычисленной по формуле (13), в рамках данного расчета присваивается имя **ТЕМР**. Если условие $|\text{ТЕМР} - T_{cp}| \leq \varepsilon$ не выполняется, то цикл вычислений повторяется.

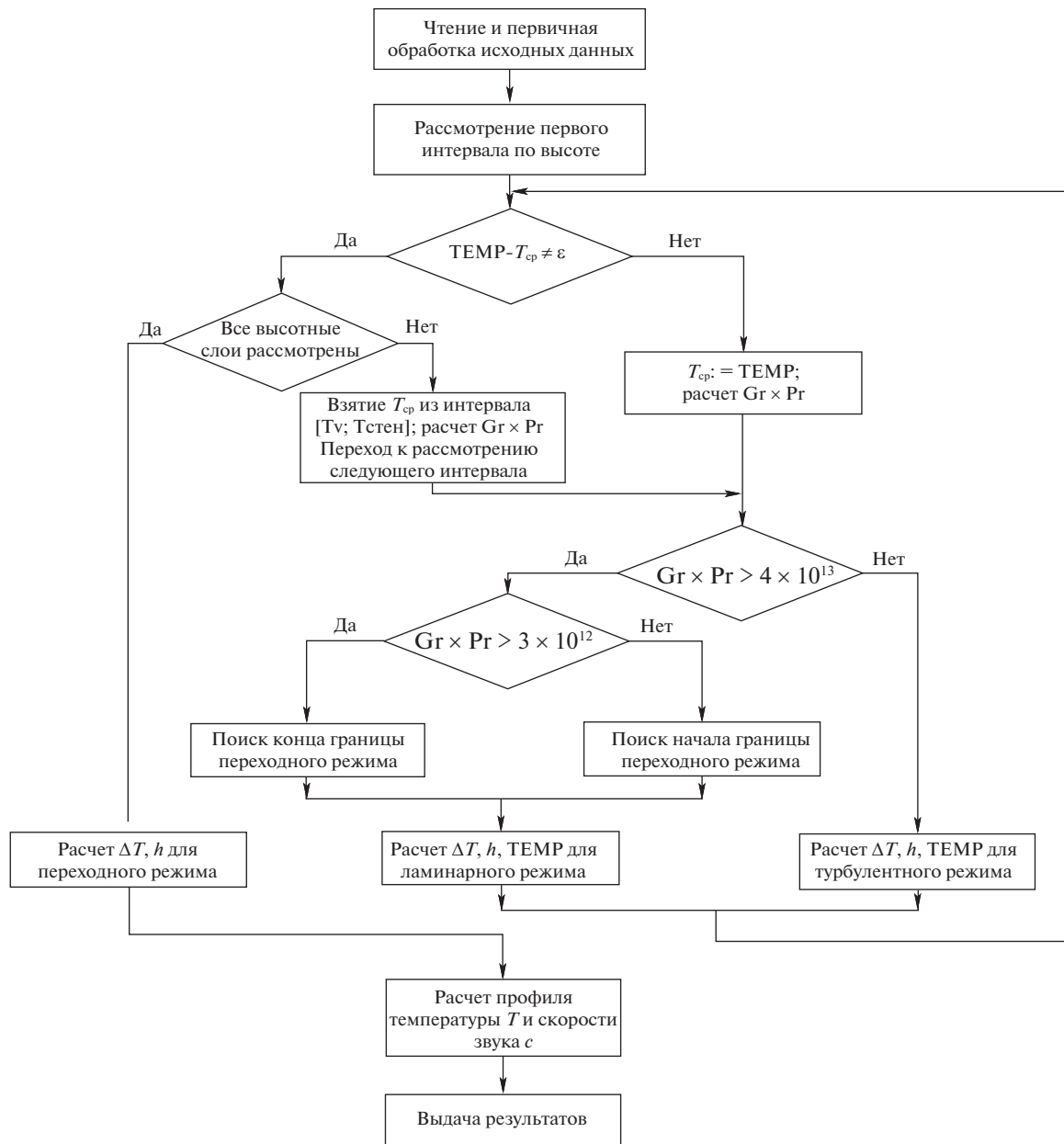


Рис. 5. Блок-схема программы расчета скорости звука в воде.

При проведении расчета определяются координаты границ переходного режима: конца ламинарного $y_{\text{лам}}$ и начало турбулентного $y_{\text{турб}}$ режимов. Для графика температуры подогрева ΔT в области переходного режима составляется уравнение по двум точкам (16):

$$f(y) = \frac{(y - y_{\text{лам}})(f(y_{\text{турб}}) - f(y_{\text{лам}}))}{y_{\text{турб}} - y_{\text{лам}}} + f(y_{\text{лам}}). \quad (16)$$

После выполнения расчета параметров теплообмена производится цикл вычислений профиля температуры T и скорости звука c вдоль акустиче-

ской оси датчика для указанной пользователем координаты Y положения датчика вдоль ТВС.

ПРОГРАММА РАСЧЕТА СКОРОСТИ ЗВУКА У ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКОВ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет процесса теплообмена при свободной конвекции с граничными условиями II рода проводился в соответствии с представленной на рис. 5 блок-схемой.

Программа была написана в среде Turbo Delphi и выполнена в виде исполняемого файла, который запускается из операционной системы.

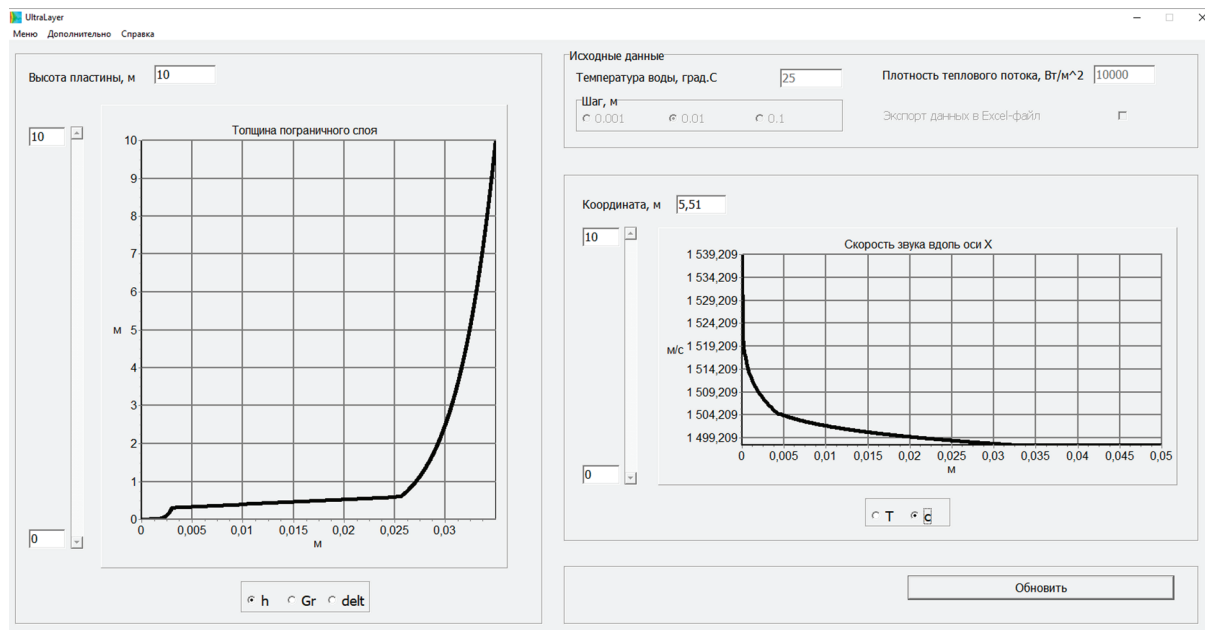


Рис. 6. Вид главного окна с результатами расчета.

Разработанный программный продукт [9] позволяет рассчитать скорость ультразвука и изменение температуры вдоль акустической оси датчика, расположенного на заданной координате, а также параметры теплообмена при ламинарном и турбулентном режиме вдоль вертикальной оси ТВС. Результаты вычислений представляются в виде графиков на главном окне программы (рис. 6).

В качестве примера работы программы на рис. 7 представлены результаты расчета профилей скорости звука вдоль акустической оси датчика при температуре воды, равной 25°C, на высоте 3 м для разных значений плотности теплового потока.

Для проверки разработанной методики были выполнены расчеты в условиях экспериментов [14], в которых исследовалось изменение температуры в воде внутри свободноконвективного ламинарного и турбулентного теплового пограничного слоя.

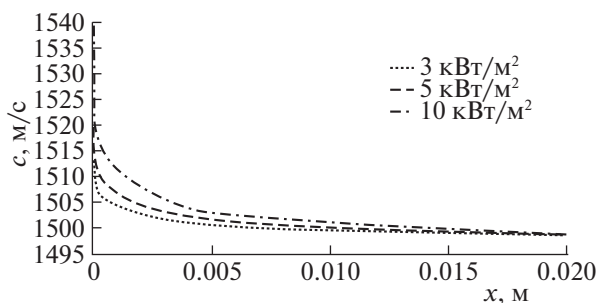


Рис. 7. Изменение скорости звука вдоль акустической оси датчика.

На рис. 8–9 приведены экспериментальные данные Гебхарта-Куреши [14], а также результаты расчетов, проведенных для условий этих экспериментов. Как видно из графиков, расчетные данные с высокой точностью совпадают с результатами экспериментов.

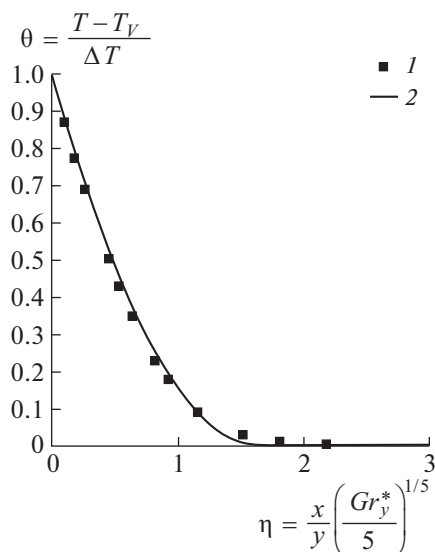


Рис. 8. Профиль избыточной температуры в ламинарном пограничном слое в условиях экспериментов [14] с плотностью теплового потока на стенке 919 Вт/м²: 1 – экспериментальные значения, 2 – расчетные значения.

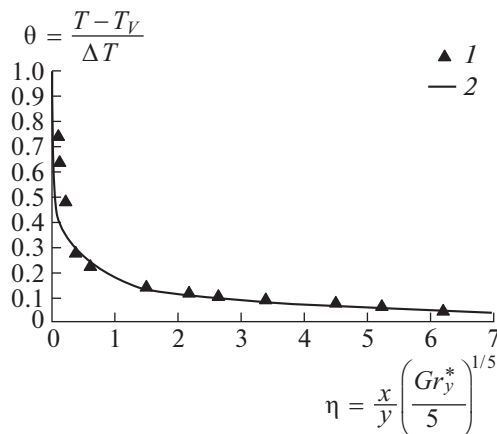


Рис. 9. Профиль избыточной температуры в турбулентном пограничном слое в условиях экспериментов [14] с плотностью теплового потока на стенке 3639 Вт/м²: 1 – экспериментальные значения, 2 – расчетные значения.

ВЫВОД

Совместный анализ экспериментальных и расчетных данных позволяет говорить о том, что рассмотренная программа может быть использована как для приближенных оценок влияния конвекции на результаты измерений, так и для верификации CFD-кодов применительно к расчету параметров естественной конвекции у поверхности ТВС ВВЭР-1000 с учетом наличия остаточного тепловыделения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Н.А., Бромиский И.А., Суров Д.В., Первушин Л.А., Тишков А.Н., Семенов А.В., Павлов С.В., Амосов С.В. Стенд инспекции и ремонта тепловыделяющих сборок для проекта АЭС-2006 // Тяжелое машиностроение (ISSN: 1024-7106), 2017. № 4. С. 25–28.
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. Воронина А.В. Анализ эффективности, надежности и безопасности методов определения формоизменения ТВС ВВЭР-1000 на АЭС // Всероссийская молодежная конференция “Научные исследования и технологические разработки в обеспечении развития ядерных технологий нового поколения”: тезисы докладов. Димитровград: АО “ГНЦ–НИИАР”, 2018. С. 62–64.
4. Дворецкий В.Г., Иванов В.Б., Глушак Н.С. Методики измерения геометрических размеров и формы чехла ТВС: препринт. Димитровград: НИИАР, 1991. 19 с.
5. Павлов С.В. Неразрушающие ультразвуковые методы исследований облученного топлива ядерных реакторов. Димитровград: ОАО “ГНЦ НИИАР”, 2013. 256 с.
6. Павлов С.В. Методы и средства исследований ТВС ВВЭР для экспериментального сопровождения внедрения нового топлива на АЭС: дис. д-р техн. наук: 05.14.03 / Павлов Сергей Владленович. Димитровград, 2015. 339 с.
7. Бражников Н.И. Ультразвуковые методы; под общ. ред. Н.Н. Шумиловского. М.; Л.: Энергия, 1965. 248 с.
8. Павлов С.В., Шалагинова Т.М., Михайлов С.В., Прокуранов 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.
9. Павлов С.В., Воронина А.В. Программа для расчета скорости звука в воде у поверхности вертикальной нагретой пластины. Свидетельство РФ № 2018660777 о государственной регистрации программы для ЭВМ, 2018.
10. Орлов К.А., Александров А.А., Очков А.В., Очков В.Ф. Свидетельство РФ № 2000610803 об официальной регистрации программы для ЭВМ WaterSteamPro, 2011.
11. Лыков А.В. Теплообмен: справочник. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергия, 1978. 480 с.
12. Джалурия И. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен. М.: Мир, 1983. 399 с.
13. Vliet G.C., Liv C.K., An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers // Journal of Heat Transfer. 1969. № 4. P. 73–96.
14. Gebhart B. Transition and transport in a buoyancy driven flow in water adjacent to a vertical uniform flux surface // Int. J. Heat Mass Transf. 1978. V. 21. P. 1467–1479.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta “MIFI”, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 465–472

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

A. V. Voronina^{a, #} and S. V. Pavlov^a

^a Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute,
National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute),
Dimitrovgrad, Ulyanovsk oblast, 433510 Russia

[#]e-mail: AVVoronina@mephi.ru

Received June 5, 2019; revised August 2, 2019; accepted August 27, 2019

Abstract—The principle of the ultrasonic method for determining fuel assemblies forming in cooling pond of nuclear power plants is considered. It is shown that natural convection caused by residual heat generation affects the increase in the measurement error of the ultrasonic method. A method is proposed for calculating the convective heat transfer with the boundary condition of the second kind. The developed method has been tested by performing calculations under the conditions of experiments in which temperature change in water inside a free convective laminar and turbulent thermal boundary layer has been studied. Analysis of experimental and calculated data shows that the method used adequately describes natural-convection heat transfer. Using this method, an algorithm and a program are developed for calculating the speed of sound in water in a laminar and turbulent boundary layer near the surface of a vertical heated plate, simulating in the first approximation the heated surface of a WWER-1000 FA. The developed program also computes the parameters of the boundary layer, heating temperature, and temperature profile along the acoustic axis of the ultrasonic sensor. The program can be used to approximately estimate the influence of convection on measurement results and to verify CFD codes as applied to the calculation of the parameters of natural convection at the surface of the WWER-1000 FA, taking into account the decay heat.

Keywords: ultrasonic method, fuel assembly, free convection, boundary layer, speed of sound

DOI: 10.1134/S2304487X19050080

REFERENCES

1. Ivanov N.A., Bromirskii I.A., Surov D.V., Pervushin L.A., Tishkov A.N., Sementsov A.V., Pavlov S.V., Amosov S.V., Stend inspektsii i remonta teplovy' delyayushhix sborok dlya proekta AE'S – 2006 [Fuel repair and inspection equipment for AES-2006 NPP design]. *Tyazheloe mashinostroenie* (ISSN: 1024-7106), 2017, no. 4, pp. 25–28 (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. Voronina A.V. *Analiz effektivnosti, nadezhnosti i bezopasnosti metodov opredeleniya formoizmeneniya TVS VVER-1000 na AE'S* [Analysis of the effectiveness, reliability and safety of methods for determining the forming WWER-1000 NPP]. Vserossiyskaya molodyozhnaya konferenciya “Nauchny'e issledovaniya i tekhnologicheskie razrabotki v obespechenii razvitiya yaderny'x tekhnologiy novogo pokoleniya” [All-Russian Youth Conference “Scientific research and technological development to ensure the development of nuclear technologies of new generation”]. Dimitrovgrad: JSC “SSC RIAR”, 2018, pp. 62–64 (in Russian).
4. Dvoreczkij V.G., Ivanov V.B., Glushak N.S. *Metodiki izmereniya geometricheskij razmerov i formy' chexla TVS* [Methods for measuring the geometric dimensions and shape of fuel assembly outer jacket]. Dimitrovgrad: RIAR, 1991. 19 p.
5. Pavlov S.V. *Nerazrushayushchie ultrazvukovie metody issledovaniy obluchennogo topliva yadernih reaktorov* [Non-destructive ultrasonic research methods of irradiated fuel of nuclear reactors]. Dimitrovgrad: JSC “SSC RIAR”, 2013. 256 p.
6. 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.
7. Brazhnikov N.I. *Ul'trazvukovy'e metody'* [Ultrasonic methods]. In Shumilovskogo N.N. (ed.), Moscow, Leningrad: Energiya, 1965. 248 p.
8. Pavlov S.V., Shalaginova T.M., Mikhailov S.V., Prokudanov D.L. *Issledovanie vliyaniya estestvennoj konvekcii na rezul'taty' izmereniya geometricheskix 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.
9. Pavlov S.V., Voronina A.V. *Programma dlya rascheta skorosti zvuka v vode u poverkhnosti vertikal'noj nagretoj plastiny'* [The program for calculating the speed of sound in water at the surface of a vertical heated plate]. The certificate of the Russian Federation no. 2018660777 about the state registration of the computer program, 2018.
10. Orlov K.A., Aleksandrov A.A., Ochkov A.V., Ochkov V.F. The certificate of the Russian Federation no. 2000610803 about official registration of the computer program WaterSteamPro, 2011.
11. Lykov A.V. *Teplomassoobmen: Spravochnik* [Heat and Mass Transfer: A Handbook]. 2-e izd.: Moscow: Energiya, 1978. 480 p.
12. Dzhauriya I. *Estestvennaya konvekciya. Teplo- i massoobmen* [Natural convection. Heat and mass transfer]. Moscow: Mir, 1983. 399 p.
13. Vliet G.C., Liv C.K. An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers, *Journal of Heat Transfer*, 1969, no. 4, pp. 73–96.
14. 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, pp. 1467–1479.