

УДК 621.039.546.8

DOI: 10.21779/2542-0321-2020-35-1-27–34

A.V. Воронина

Моделирование естественной конвекции у поверхности отработанных тепловыделяющих сборок в бассейне выдержки АЭС

Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал НИЯУ МИФИ; Россия, 433511, Ульяновская обл., г. Димитровград, ул. Куйбышева, 294; AVVoronina@mephi.ru

В настоящей работе представлена методика численного моделирования процесса естественной конвекции у поверхности отработанной тепловыделяющей сборки с помощью программного пакета ANSYS Fluent. Процесс теплообмена был построен на предположении, что поверхность тепловыделяющей сборки можно представить в виде вертикальной пластины с постоянным тепловым потоком, находящейся в статической среде с постоянной температурой. Проведен анализ методов численного решения уравнений Навье–Стокса для турбулентных течений. На основании данного анализа было решено применить метод RANS и его турбулентную модель Realizable $k-\varepsilon$, реализуемую в ANSYS Fluent.

Даны рекомендации при выборе постановки граничных условий и построении расчетной сетки при условии естественной конвекции и наличии ламинарного и турбулентного режимов, а также переходного состояния. Для проверки разработанной модели были проведены расчеты в нестационарной постановке в условиях экспериментов, в которых исследовался процесс естественной конвекции. Сравнение полученных результатов проводилось по избыточной температуре стенки и профилю температуры в пограничном слое для ламинарного и турбулентного режимов течения.

Анализ экспериментальных и расчетных данных показывает, что используемая методика расчета достаточно адекватно описывает процесс теплообмена при естественной конвекции у поверхности тепловыделяющей сборки с учетом наличия остаточного тепловыделения. Это позволяет сделать вывод о возможности применения рассмотренного алгоритма расчета при моделировании для определения параметров естественной конвекции у поверхности полномасштабной модели отработанной тепловыделяющей сборки, расположенной в среде бассейна выдержки на АЭС.

Ключевые слова: *моделирование, естественная конвекция, ТВС.*

Введение

Моделирование процесса естественной конвекции у поверхности нагретой вертикальной пластины привлекает к себе исследователей на протяжении многих лет. Разработаны и экспериментально подтверждены полуэмпирические соотношения для определения параметров теплообмена при ламинарном и турбулентном режимах течения жидкости [1]. На сегодняшний день в инженерной практике широко используются программные пакеты для автоматизации инженерных расчетов. Целью данной работы является оценка возможности применения программного комплекса (ПК) Ansys [2] для определения параметров естественной конвекции у поверхности отработанной тепловыделяющей сборки (ТВС), находящейся в бассейне выдержки. На основании экспериментальных данных по исследованию параметров свободной конвекции у нагретой поверхности в воде, изложенных в работах [3, 4], смоделирован процесс теплообмена, ко-

торый строится на предположении, что поверхность ТВС можно представить в виде вертикальной пластины с постоянным тепловым потоком.

1. Численное моделирование

1.1. Постановка задачи

Численное моделирование настоящей задачи выполнялось в нестационарной постановке. Тепловыделяющая пластина высотой 1,5 м погружена в статическую жидкость (вода) с постоянной температурой. Значения определяющих параметров задавались в соответствии с экспериментальными исследованиями [3, 4]. Схема расчетной области приведена на рис. 1. Границные области проанализированы в п. 1.3.

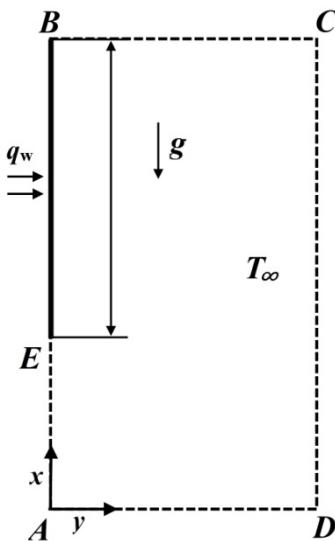


Рис. 1. Схема расчетной области

1.2. Выбор численного решения для уравнений Навье–Стокса

Уравнения Навье–Стокса не меняют свою форму для турбулентных и ламинарных течений. Основная проблема заключается в моделировании турбулентного потока. Существует три подхода к решению уравнений Навье–Стокса для турбулентных течений.

- Прямое численное моделирование (DNS).
- Решение систем уравнений, осредненных по Рейнольдсу (RANS).
- Метод моделирования крупных вихрей (LES).

Метод DNS означает, что вихри всех размеров моделируются без использования какой-либо дополнительной модели турбулентности. Для моделирования всех масштабов турбулентности сетка требует значительного разрешения. Если обозначить число ячеек сетки по одному координатному направлению через N , то количество ячеек будет определяться [5]:

$$N^2 \approx Re^{6/4}, \quad (1)$$

где Re – число Рейнольдса.

Из уравнения (1) следует, что метод DNS применим на практике только для невысоких чисел Re порядка 10^4 . Согласно [6] с учетом уровня развития современной вычислительной техники применение метода DNS для решения инженерных задач с более высоким числом Re станет возможным примерно к 2080 году.

Семейство RANS включает в себя большое число моделей, в которых принимаются определенные допущения. Данный метод позволяет получить физически корректный результат при относительно невысокой ресурсоемкости.

Метод LES, который разрешает большие масштабы турбулентности, обеспечивает лучшую точность в сравнении с методом RANS. По причине ограниченных ресурсов (метод LES требует использования параллельных вычислительных систем) было решено применить метод RANS и его турбулентную модель Realizable $k-\varepsilon$, широко применяемую в инженерных расчетах.

Основные уравнения теплоотдачи в условиях естественной конвекции представлены в виде связанных эллиптических уравнений в частных производных. С целью упрощения этих уравнений применяется приближение Буссинеска [7]. Использование приближения Буссинеска возможно только при малых перепадах температур (для воды $\Delta T < 2^{\circ}\text{C}$) [8]. В связи с этим все теплофизические свойства воды, в том числе и плотность, предполагаются как функции от температуры.

1.3. Границные условия

Через поверхность пластины (участок ВЕ) задан постоянный тепловой поток q_w . На участке АЕ, расположенном ниже пластины, ставится условие симметрии. На входной границе CD задаются нулевое полное давление и температура, равная температуре окружающей среды. Скорость движения определяется в ходе решения задачи по величине получаемого статического давления. На выходной границе ВС реализуются условие нулевого статического давления и температура окружающей среды. Нижняя граница AD задается адиабатической стенкой.

Для предотвращения возможных сбоев, обусловленных ограниченностью вычислительной области, был применен метод «псевдоэлементов» [9–11], заключающийся в достаточном удалении границ (более 0,5 м) от нагреваемой пластины.

Значения параметров турбулентности на входной границе задавались интенсивностью турбулентности и турбулентным масштабом длины.

Формула для интенсивности турбулентности для полностью развитого потока в канале имеет вид:

$$I = 0,16 (\text{Re})^{-1/8}. \quad (2)$$

Режим течения при свободной конвекции определяется произведением чисел Грасгофа Gr и Прандтля Pr , которое называется числом Рэлея Ra . Число Рэлея можно рассматривать как число Рейнольдса, используя в формуле числа Рейнольдса вместо скорости потока значение скорости течения жидкости при естественной конвекции. Адаптируем уравнение (2) для нашего случая:

$$I = 0,16 (\text{Ra})^{-1/8}.$$

Для расчета турбулентного масштаба длины использовалась следующая формула [2, 12]:

$$\begin{aligned} L &= 0,4\delta_u, \\ \delta_u &= 0,565x(\text{Gr}_x)^{-1/10}(\text{Pr})^{-8/15} \left[1 + 0,494(\text{Pr})^{2/3} \right]^{1/10}, \end{aligned}$$

где δ_u – ширина кинетического пограничного слоя пластины, м.

2. Сетка

Для расчетов применялись декартовые сетки со сгущением по направлению к стенке. В качестве сеточного генератора использовался Ansys Meshing. Сеточная модель создавалась с учетом основных критериев, характеризующих её качество: мини-

мальные значения критерия *orthogonal quality* не опускались ниже значения 0,3; максимальное значение *skewness* не превышало значение 0,8; максимальное значение критерия *aspect ratio* составляло не более 100.

Высота первого слоя ячеек возле стенки у определялась необходимым значением безразмерного расстояния от стенки $y^+ < 1$ исходя из оценочной формулы [2]:

$$y = \frac{y^+ \mu}{\rho U_\tau},$$

где μ – динамический коэффициент вязкости, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; $U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$

– скорость трения, $\text{м}/\text{с}$.

Касательное напряжение на стенке τ_w при естественной конвекции может быть рассчитано по закону вязкости Ньютона

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}.$$

Скорость около вертикальной поверхности при естественной конвекции определяется выражением [13]:

$$u = \frac{5v}{x} \left(\frac{\text{Gr}_x^*}{5} \right)^{2/5} \cdot f'(\eta),$$

$$\text{где } \eta = \frac{y}{x} \left(\frac{\text{Gr}_x^*}{5} \right)^{1/5}.$$

Тогда касательное напряжение вычисляется следующим образом:

$$\tau_w = \mu \cdot \frac{5v}{x^2} \left(\frac{\text{Gr}_x^*}{5} \right)^{3/5} \cdot f''(0) = 5\mu v x^{2/5} \left(\frac{g\beta q}{5\lambda v^2} \right)^{3/5} \cdot f''(0).$$

Численное значение функции $f''(0)$ представлено в работе [14].

Для $k-\epsilon$ моделей турбулентности характерно смещение границ переходного режима вверх по пластине [15]. Для обеспечения хорошей согласованности с экспериментальными данными были внесены дополнительные сеточные возмущения посредством сгущения сетки к нижней границе пластины (рис. 2).

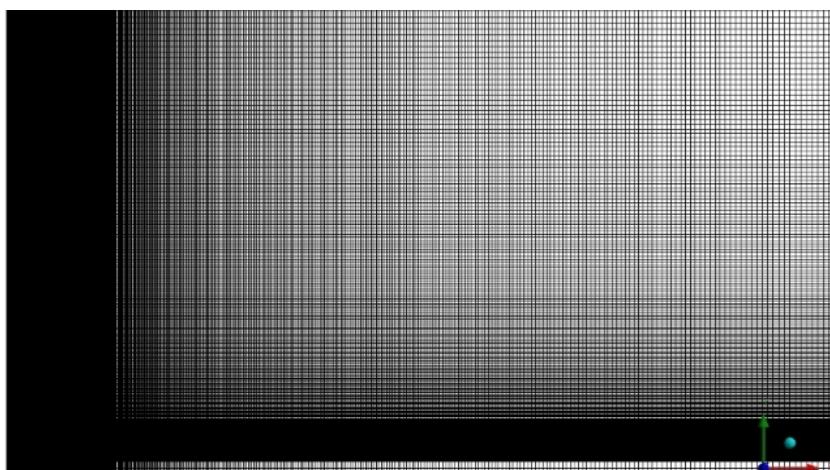


Рис. 2. Расчетная сетка

3. Результаты

Численное решение системы уравнений Навье–Стокса было проведено с использованием алгоритма SIMPLEC (Simple-Consistent). Градиент давления рассчитывался по схеме PRESTO! (Pressure staggering option).

Для проверки разработанной модели были проведены расчеты в условиях экспериментов [3, 4]. Из [3] были взяты эксперименты со значениями тепловых потоков $583 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и $919 \text{ Вт}/\text{м}^2$, соответствующие ламинарному режиму (рис. 3, 4). Для турбулентного режима были выбраны эксперименты со значениями тепловых потоков $19\,497 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и $28\,661 \text{ Вт}/\text{м}^2$ из работы [4] (рис. 5–7). Для сопоставления с результатами экспериментов использовались расчетные профили температуры в пограничном слое, а также избыточная температура стенки $\Delta T = T_w - T_\infty$. На представленных рисунках экспериментальные значения обозначены цифрой 1, расчётные значения – цифрой 2.

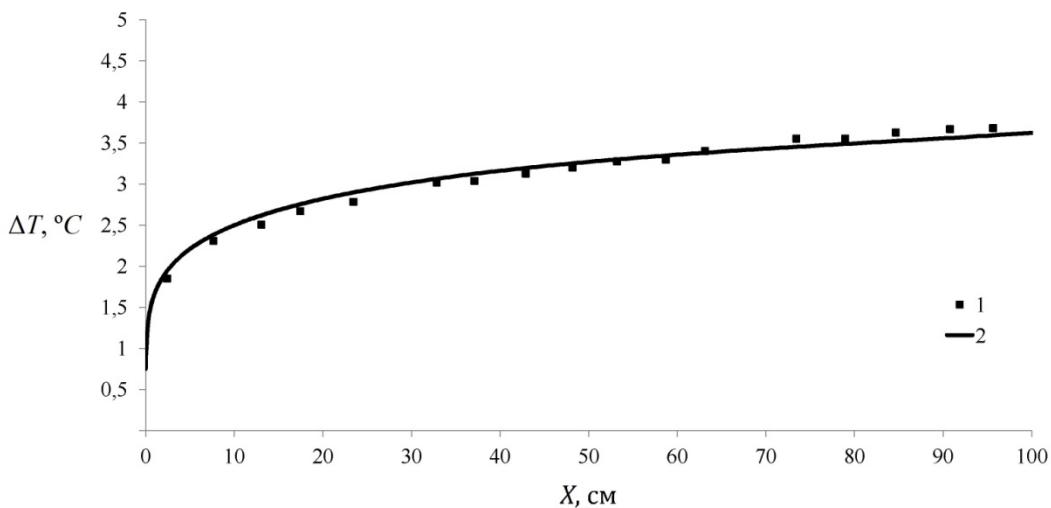


Рис. 3. Избыточная температура стенки в условиях эксперимента [3] с $q_w = 583 \text{ Вт}/\text{м}^2$

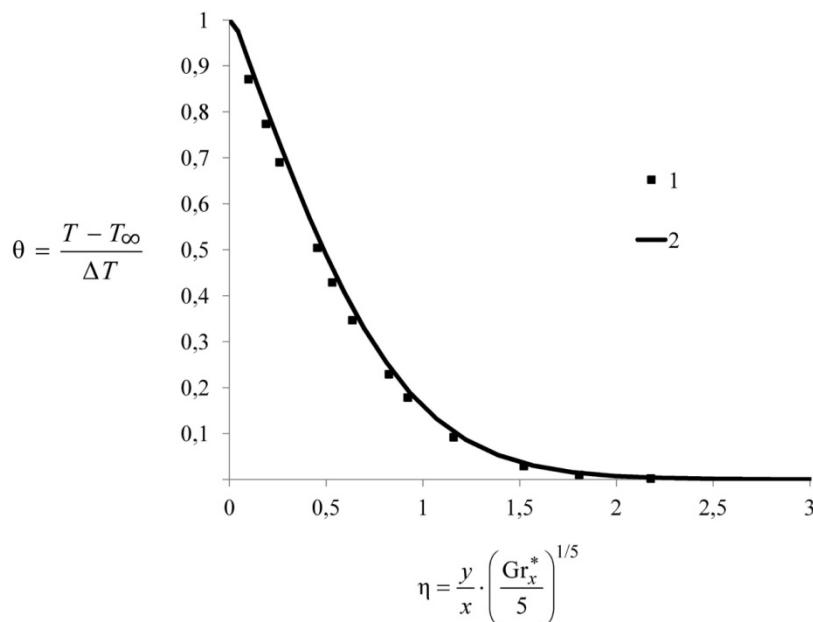


Рис. 4. Профиль избыточной температуры в ламинарном пограничном слое в условиях эксперимента [3] с $q_w = 919 \text{ Вт}/\text{м}^2$

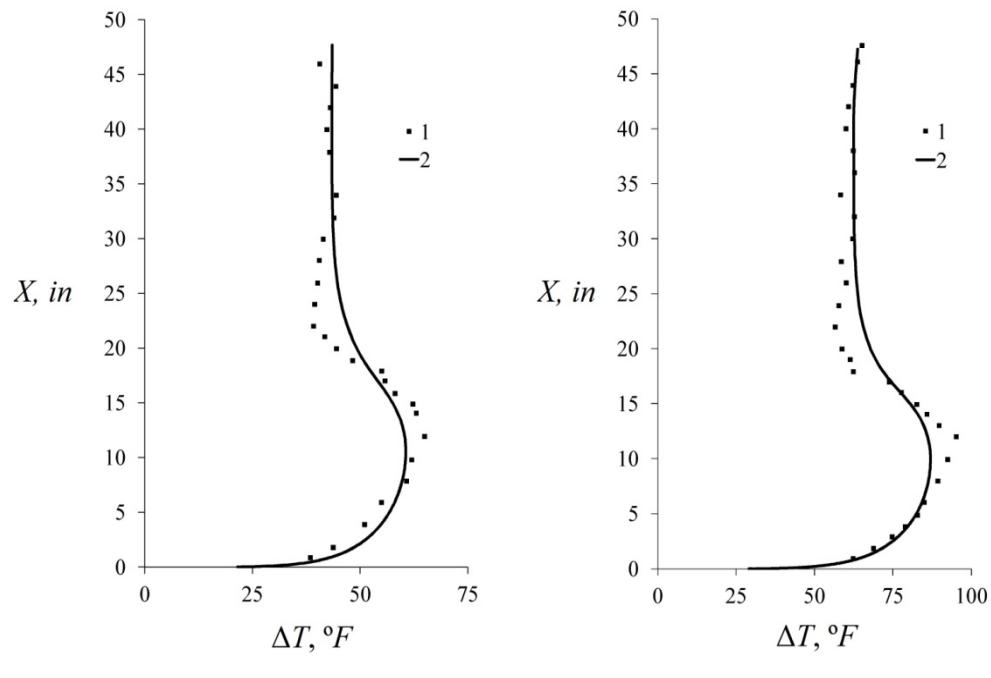


Рис. 5. Избыточная температура стенки в условиях экспериментов [4] с $q_w = 19\ 497 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (а) и с $q_w = 28\ 661 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (б)

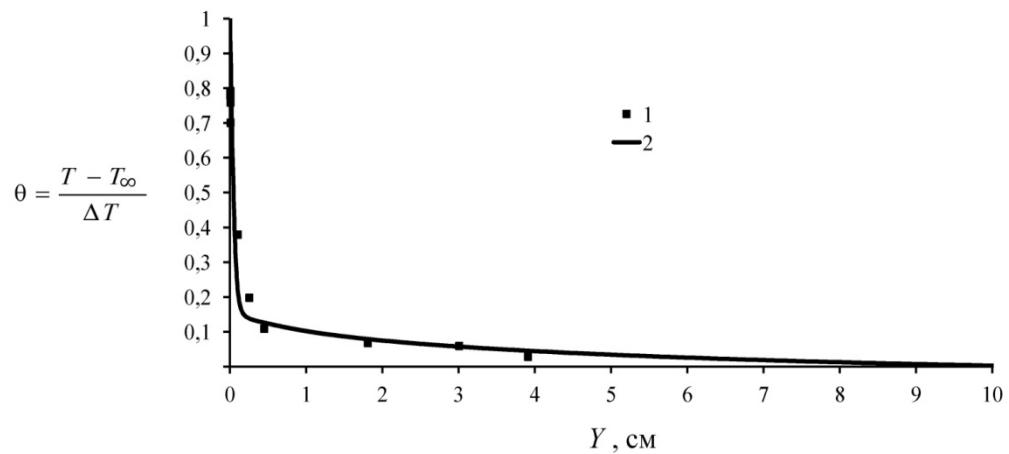


Рис. 6. Профиль избыточной температуры в турбулентном пограничном слое в условиях эксперимента [4] с $q_w = 19\ 497 \text{ Вт}/\text{м}^2$

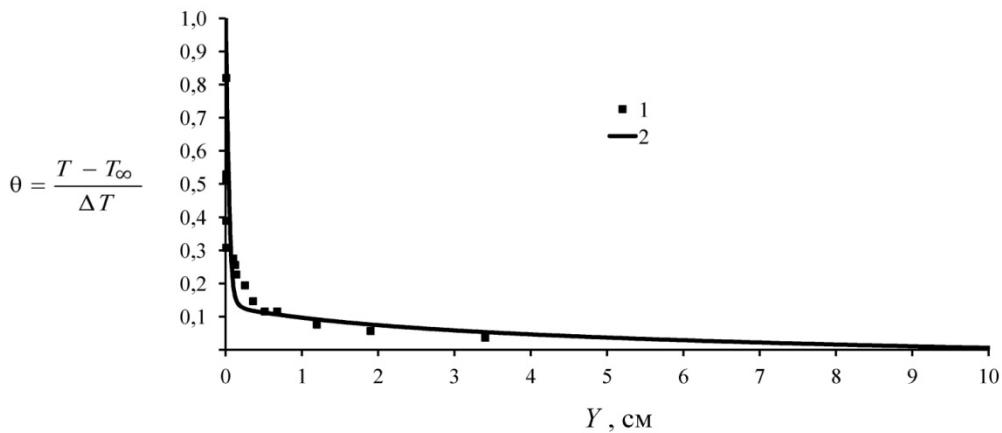


Рис. 7. Профиль избыточной температуры в турбулентном пограничном слое в условиях эксперимента [4] с $q_w = 28\,661 \text{ Вт}/\text{м}^2$

Вывод

Проведенное исследование процесса естественной конвекции у вертикальной нагретой пластины в условиях экспериментов [3, 4] с помощью разработанной модели показало хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Это позволяет сделать вывод о возможности применения рассмотренного алгоритма расчета при моделировании для определения параметров естественной конвекции у поверхности полномасштабной модели отработанной ТВС в среде бассейна выдержки в Ansys Fluent. При этом необходимо соблюдать указанные в данной работе рекомендации по построению расчетной сетки.

Литература

1. Кутателадзе С.С., Боришианский В.М. Справочник по теплопередаче. – Л.; М.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
2. ANSYS FLUENT 6.3. Theory Manual [Электронный ресурс] // Fluent Inc. Central Source Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA, 2005. – Режим доступа: <http://www.fluent.com>.
3. 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.
4. Vliet G.C., Liv C.K. An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers // Journal of Heat Transfer. – 1969. – № 4. – P. 73–96.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6: Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
6. Spalart P.R. Strategies for turbulence modelling and simulation // Int. J. Heat and Fluid Flow. – 2000. – Vol. 21, № 3. – P. 252–263.
7. Martynenko O.G., Berezovsky A.A. Laminar free convection from a vertical plate // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1984. – Vol. 27. – P. 869–881.
8. Wimshurst A. Boussinesq Approximation [Электронный ресурс] // Режим доступа: <https://www.fluidmechanics101.com/pages/boussinesq.html>.
9. Xiaoxiong, Y. Wall Function for Numerical Simulation of Natural Convection along Vertical Surfaces // Swiss Fereral Institute of Technology (PhD Thesis), 1995. – 105 p.
10. Georgantopoulou C., Tsangaris S. Block, mesh refinement of incompressible flows in curvilinear domains // Appl. Math. Modell. – 2007. – № 31. – P. 2136–2148.

11. Cebeci T., Bradshaw P. Physical and Computational Aspect of Convective Heat Transfer. – New York: Springer-Verlag, 1988. – 487 p.
12. Eckert E.R.G., Jackson T.W. Analysis of turbulent free-convection boundary layer on flat plate // NACA Report. – 1950. – Vol. 1015. – P. 1–7.
13. Джалаурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен. – М.: Мир, 1983. – 399 с.
14. Sparrow E.M., Gregg J.L. Laminar Free Convection from a Vertical Plate with Uniform Surface Heat Flux // Trans. ASME, J. Heat Transfer. – 1956. – № 78. – P. 435–440.
15. Багаев Д.В., Сыралева М.Н. Численное моделирование свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности нагрева // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – № 2. – С. 93–98.

Поступила в редакцию 24 сентября 2019 г.

UDC 621.039.546.8

DOI: 10.21779/2542-0321-2020-35-1-27-34

Modeling of Natural Convection along the Surface of Spent Fuel Assemblies in the Cooling Pond of Nuclear Power Plants

A.V. Voronina

*Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPhI; Russia, 433511 Dimitrovgrad, st. Kuibyshev, 294;
AVVoronina@mephi.ru*

The given study presents a method for numerical modeling of the process of natural convection along the surface of spent fuel assemblies using the ANSYS Fluent software. The heat transfer process was built on the assumption that the surface of the fuel assembly can be represented as the vertical plate with constant heat flux located in static environment with constant temperature. The analysis of methods for the numerical solution of the Navier–Stokes equations for turbulent flows is carried out. Based on this analysis, it was decided to apply the RANS method and its turbulent model Realizable $k-\varepsilon$ implemented in ANSYS Fluent.

Recommendations are given on choosing setting boundary conditions and constructing a computational grid under condition of natural convection and presence of the laminar and turbulent flow modes, alongside the transitional stage. To verify the developed model, calculations were performed in a non-stationary setting under experimental conditions in which the process of natural convection was studied. The comparison of the results was carried out by the excess wall temperature and the temperature profile in the boundary layer for laminar and turbulent flow modes.

The analysis of experimental and calculated data shows that the technique used adequately describes natural convection heat transfer taking into consideration residual heat dissipation. This allows concluding that the considered calculation algorithm can be used in modeling to determine the parameters of natural convection along the surface of a full-scale model of a spent fuel assembly located in the environment of the exposure pool at NPP.

Keywords: *modeling, natural convection, fuel assemblies.*

Received 24 September 2019