

УДК 621.039.517

## **К вопросу о численном расчете теплоотдачи от стержневых тепловыделяющих элементов ядерных реакторов ВВЭР**

Марков П. В.<sup>1,\*</sup>

\* [mankov@list.ru](mailto:mankov@list.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

В статье приведены результаты численного расчета теплообмена в модели тепловыделяющей сборки ядерного реактора ВВЭР-1000, состоящей из 19-ти имитаторов стержневых тепловыделяющих элементов, 7 из которых имеют электронагревательные элементы. Моделируется течение водного теплоносителя при условиях, близких к нормальным. Физические эксперименты, анализируемые в настоящей работе, выполнены и обработаны в ГНЦ РФ-ФЭИ. Расчеты выполнены методами вычислительной гидродинамики с помощью CFD-кода STAR-CCM+. В статье описана математическая модель, использованная для решения сопряженной задачи, и проведена ее валидация по данным о коэффициенте теплоотдачи, полученным из физического эксперимента.

**Ключевые слова:** реакторная установка ВВЭР, тепловыделяющая сборка, физическая модель, турбулентное число Прандтля, коэффициент теплоотдачи, вычислительная гидродинамика и теплообмен

---

Одним из факторов, влияющих на работоспособность тепловыделяющих сборок (ТВС) ядерных реакторов, является температурный режим ее тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), который определяет температурные напряжения в ТВЭЛ, кристаллическую структуру топлива, скорость ползучести, коррозионную стойкость и механические свойства оболочки ТВЭЛ.

До недавнего времени основным инструментом для получения данных о полях температур в ТВС было физическое моделирование. С развитием компьютерных технологий и вычислительной техники появилась возможность углубить знания о теплофизических и гидравлических процессах, происходящих в ТВС ядерных реакторов, и облегчить способ получения новых данных при помощи методов вычислительной гидродинамики (CFD). Однако использование CFD-кодов для решения определенных задач требует предварительного обоснования методики проведения численного анализа.

В настоящей работе приводятся результаты численного расчета течения и теплообмена в модели ТВС реактора ВВЭР-1000, проводится сравнение по величинам коэффициента теплоотдачи от ТВЭЛ, полученным в численном и физическом

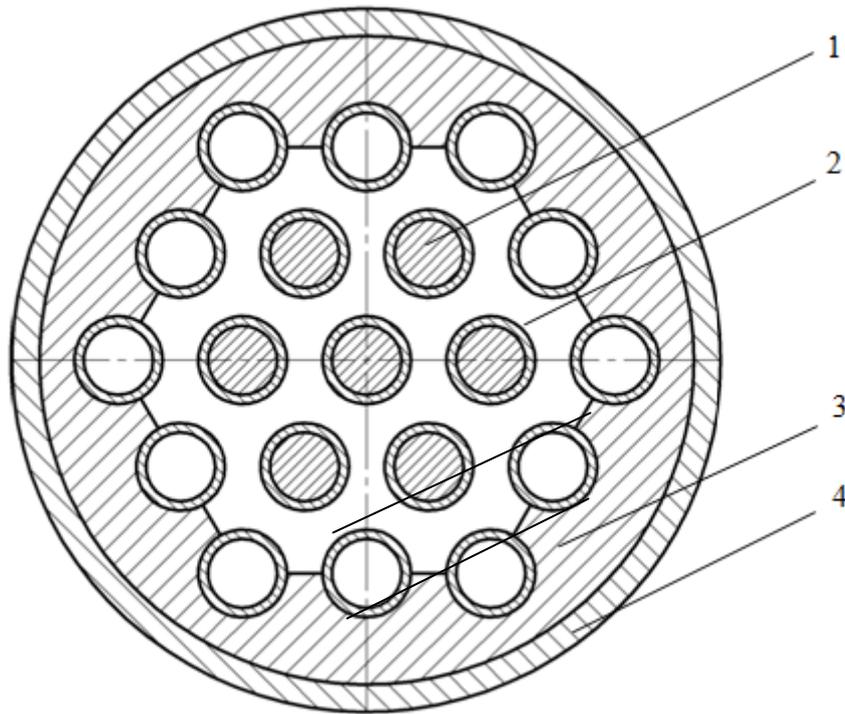
экспериментах. Физические эксперименты проведены и обработаны в ГНЦ РФ-ФЭИ [1], численное моделирование, сравнение результатов выполнено автором настоящей работы.

Рассматриваемая модель ТВС ВВЭР-1000 выполнена в масштабе 1:1,758 и состоит из 19-ти имитаторов твэл (2), заключенных в обечайках (4) с фигурными вытеснителями (3), обеспечивающими геометрическую идентичность трактов охлаждения стержней [1]. Имитаторы выполнены из стали X18H10T (плотность –  $8000 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность –  $16,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , теплоемкость –  $502 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ). Нагрев потока теплоносителя осуществляется нихромовыми нагревателями (1), установленными внутри 7-ми центральных имитаторов, при этом на внутренней поверхности обогреваемых стержней формируется постоянный тепловой поток. 12 периферийных стержней не обогреваются. Начало участка электрообогрева смещено относительно входа в пучок вниз по течению. Геометрические характеристики модели приведены в таблице 1, схема опытного участка показана на рисунке 1.

**Таблица 1** – Геометрические характеристики модели ТВС ВВЭР-1000

Параметр	Значение
Внешний диаметр имитаторов твэл, мм	16,0
Шаг имитаторов твэл, мм	22,40
Относительный шаг имитаторов твэл	1,4
Длина имитаторов твэл, мм	891
Число имитаторов твэл	19
Число обогреваемых имитаторов твэл	7
Расстояние от торца имитаторов твэл до начала участка электрообогрева, мм	50
Длина участка электрообогрева, мм	800
Внутренний диаметр имитаторов твэл, мм	12,5
Проходное сечение центральной ячейки, $\text{мм}^2$	117,5
Проходное сечение модели, $\text{мм}^2$	2820
Гидравлический диаметр центральной ячейки, мм	18,6
Гидравлический диаметр модели, мм	16,5

Моделировалось течение воды с температурой на входе в модель  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  (плотность –  $992,3 \text{ кг/м}^3$ , теплоемкость –  $4178 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ , вязкость –  $6,53 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$ , теплопроводность –  $0,629 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , число Прандтля – 4,34) в диапазоне чисел Рейнольдса, рассчитанных по гидравлическому диаметру центральной ячейки, от  $3 \cdot 10^4$  до  $9 \cdot 10^4$ , что соответствует диапазону скоростей теплоносителя от 1,1 до 3,2 м/с. Средний по периметру стержней тепловой поток с наружной поверхности имитаторов твэл составлял  $10^5 \text{ Вт/м}^2$ .



1 – нагреватель, 2 – имитатор твэл, 3 – фигурный вытеснитель, 4 – обечайка

**Рисунок 1** – Схема опытного участка

Рассматриваемая математическая модель, описывающая течение и теплообмен в потоке теплоносителя, базируется на системе уравнений движения вязкой несжимаемой турбулентной среды:

- баланса количества движения:

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \rho \cdot \overline{V_i \cdot V_j} \right), \quad (1)$$

- баланса массы:

$$\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

Для замыкания системы уравнений движения выбрана апробированная при расчете течения и переноса тепла в пучках стержней с сотовыми перемешивающими дистанционирующими решетками [2] квадратичная  $k - \epsilon$  модель [3], в которой турбулентные напряжения  $-\rho \cdot \overline{V_i \cdot V_j}$  определяются через тензор анизотропии:

$$\begin{aligned} -\rho \cdot \overline{V_i \cdot V_j} = & 2 \cdot \mu_T \cdot S_{ij} - 4 \cdot C_1 \cdot \mu_T \cdot \frac{k}{\epsilon} \cdot \left[ \sum_k S_{ik} \cdot S_{kj} - \frac{1}{3} \sum_k \sum_l S_{kl} \cdot S_{lk} \cdot \delta_{ij} \right] - \\ & - 4 \cdot C_2 \cdot \mu_T \cdot \frac{k}{\epsilon} \cdot \left[ \sum_k \omega_{ik} \cdot S_{kj} + \sum_k \omega_{jk} \cdot S_{ki} \right] - 4 \cdot C_3 \cdot \mu_T \cdot \frac{k}{\epsilon} \cdot \left[ \sum_k \omega_{ik} \cdot \omega_{kj} - \frac{1}{3} \sum_k \sum_l \omega_{kl} \cdot \omega_{kl} \cdot \delta_{ij} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где компоненты тензора завихренности:

$$\omega_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i}. \quad (4)$$

Кинетическая энергия турбулентности определяется из уравнения

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T \cdot P - \rho \cdot \varepsilon, \quad P = -\frac{1}{\mu_T} \cdot \sum_i \sum_j \rho \cdot \overline{V_i' \cdot V_j'} \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j}. \quad (5)$$

Уравнение для скорости диссипации кинетической энергии:

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} \cdot (C_{\varepsilon 1} \cdot \mu_T \cdot P - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \varepsilon). \quad (6)$$

Турбулентная вязкость:

$$\mu_T = \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k^2}{\varepsilon}. \quad (7)$$

Коэффициенты квадратичной модели:

$$C_1 = \frac{C_{nl1}}{(C_{nl6} + C_{nl7} \cdot S^{*3}) \cdot C_\mu}, \quad C_2 = \frac{C_{nl2}}{(C_{nl6} + C_{nl7} \cdot S^{*3}) \cdot C_\mu}, \quad C_3 = \frac{C_{nl3}}{(C_{nl6} + C_{nl7} \cdot S^{*3}) \cdot C_\mu}, \quad (8)$$

$$C_\mu = \frac{C_{a0}}{C_{a1} + C_{a2} \cdot S^* + C_{a3} \cdot \omega^*}, \quad (9)$$

$$S^* = \frac{k}{\varepsilon} \cdot \sqrt{2 \cdot \sum_i \sum_j S_{ij} \cdot S_{ij}}, \quad \omega^* = \frac{k}{\varepsilon} \cdot \sqrt{2 \cdot \sum_i \sum_j \omega_{ij} \cdot \omega_{ij}}. \quad (10)$$

Постоянные в выражениях (5), (6), (8) и (9) приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Постоянные квадратичной k – ε модели

Константа	Значение	Константа	Значение	Константа	Значение
$C_{\varepsilon 1}$	1.44	$C_{nl1}$	0.75	$C_{a0}$	0.667
$C_{\varepsilon 2}$	1.92	$C_{nl2}$	3.75	$C_{a1}$	1.25
$\sigma_k$	1.0	$C_{nl3}$	4.75	$C_{a2}$	1
$\sigma_\varepsilon$	1.3	$C_{nl6}$	1000	$C_{a3}$	0.9
-	-	$C_{nl7}$	1	-	-

Перенос тепла рассчитывается при помощи уравнения энергии:

$$\rho \cdot C_p \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} = C_p \cdot \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_T}{Pr_T} \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \sum_i \sum_j \tau_{ij} \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, \quad (11)$$

$Pr$ ,  $Pr_T$  – молекулярное и турбулентное число Прандтля, соответственно.

Турбулентное число Прандтля, являющееся отношением турбулентной (кинематической) вязкости  $\nu_T$  к турбулентной температуропроводности  $\alpha_T$ , определяется следующим образом:

$$Pr_T = 0,9 \cdot \frac{1 - \exp(y^+/26)}{1 - \exp(y^+/B)}. \quad (12)$$

Выражение (12) может быть получено с помощью алгебраических моделей турбулентности типа модели «пути смешения» Прандтля. Согласно этим моделям, турбулентная вязкость и турбулентная теплопроводность имеют вид  $\nu_T = l_D^2 \cdot \frac{\partial V}{\partial y}$ ,

$a_T = l_D \cdot l_H \cdot \frac{\partial V}{\partial y}$ , где  $l_D$  и  $l_H$  – динамическая и тепловая длины смешения, соответственно,  $V$  – продольная скорость теплоносителя,  $y$  – расстояние от стенки по нормали. Таким образом, турбулентное число Прандтля определяется как  $Pr_T = l_D/l_H$ . С учетом демпфирующих множителей, длины смешения представляются в виде:

$$l_D = k_D \cdot y \cdot [1 - \exp(y^+/A)], \quad l_H = k_H \cdot y \cdot [1 - \exp(y^+/B)], \quad (13)$$

где  $y^+ = \rho \cdot y \cdot V^*/\mu$  – безразмерная координата,  $V^*$  – скорость трения. Согласно [6],  $k_D = 0,40$ ,  $k_H = 0,44$ ,  $A = 26$ ,  $B = Pr^{-0,5} \cdot \sum_{i=1}^5 C_i \cdot (\log_{10} Pr)^{i-1}$ , где  $C_1 = 34,96$ ,  $C_2 = 28,79$ ,  $C_3 = 33,95$ ,  $C_4 = 6,33$ ,  $C_5 = -1,186$ .

Уравнение энергии для оболочки имитатора твэл:

$$\sum_i \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} = 0. \quad (14)$$

В качестве граничных условий используются:

- постоянства распределений скорости и температуры на входе в модель и статического давления на выходе из модели, дополненные интегральным условием сохранения массы;

- условие прилипания потока к наружным поверхностям имитаторов твэл и внутренней поверхности вытеснителя, представляемым как гидравлически гладкие неподвижные стенки, при этом контактное термическое сопротивление между оболочками имитаторов твэл и теплоносителем отсутствует;

- интенсивность и масштаб турбулентности на входе в модель;

- постоянный по длине обогреваемого участка и периметру тепловой поток на внутренней поверхности оболочек имитаторов твэл с электрообогревом.

Математическая модель реализована при помощи CFD-кода STAR-CCM+ [5].

Для получения среднеинтегральных значений коэффициентов теплоотдачи необходимо провести обработку полученных в результате моделирования трехмерного распределения температур и скоростей потока в расчетной области. Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{q_{Fw}}{T_w - T_f}, \quad (15)$$

где  $q_{Fw}$  – тепловой поток с наружной поверхности центрального имитатора твэл;

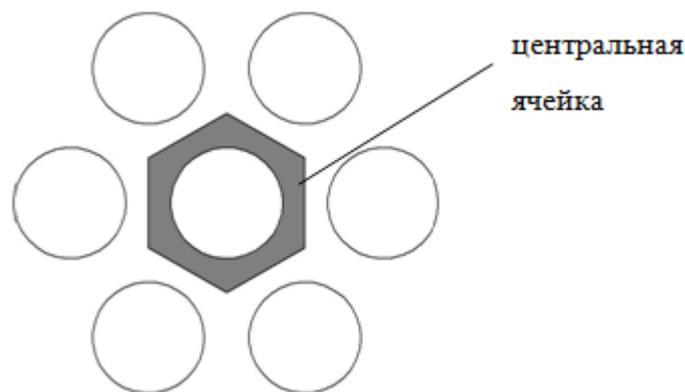
$$T_w = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{2\pi} T_w(\varphi) \cdot d\varphi - \text{средняя по периметру температура наружной поверхности}$$

центрального имитатора твэл;

$$T_f = \frac{\int T \cdot V \cdot dF}{\int V \cdot dF} - \text{среднесмешанная температура потока теплоносителя};$$

$T$  – температура потока теплоносителя;  $V$  – осевая скорость потока теплоносителя;  $F$  – площадь проходного сечения потока теплоносителя.

Среднесмешанная температура определялась по площади центральной шестигранной ячейки (см. рисунок 2).



**Рисунок 2** – Центральная шестигранная ячейка для определения среднесмешанной температуры потока теплоносителя

Число Нуссельта рассчитывалось как

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda}, \quad (16)$$

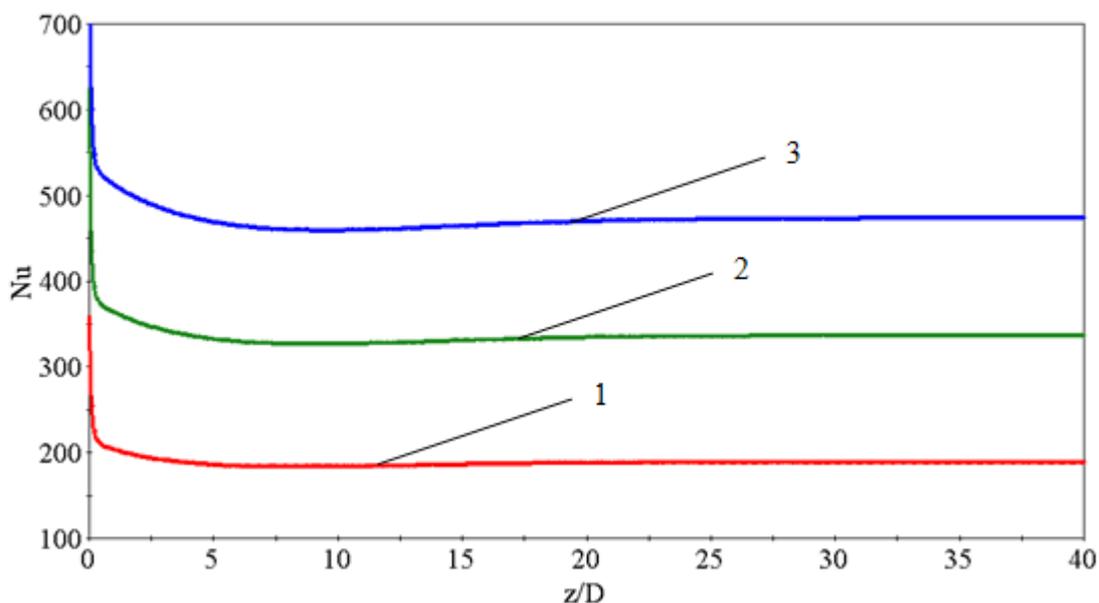
где  $D$  – гидравлический диаметр центральной ячейки;  $\lambda$  – теплопроводность теплоносителя.

Распределения числа Нуссельта по длине обогреваемого участка модели ТВС ВВЭР-1000 при различных числах Рейнольдса, полученные после обработки трехмерных полей скоростей и температур, приведены на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, число Нуссельта в диапазоне чисел Рейнольдса от  $3 \cdot 10^4$  до  $9 \cdot 10^4$  монотонно растет с увеличением числа Рейнольдса. Длина участка тепловой стабилизации зависит от числа Рейнольдса и может быть оценена величиной от 15 до 30 гидравлических диаметров.

В [1] приводятся следующие корреляции для определения числа Нуссельта на участке стабилизированного теплообмена в рассматриваемой модели для диапазона чисел Рейнольдса от  $1,2 \cdot 10^4$  до  $1,2 \cdot 10^5$  и диапазона чисел Прандтля от 2,6 до 5,7:

$$Nu = 0,0205 \cdot Re^{0,84} \cdot Pr^{1/3} \pm 15 \%. \quad (17)$$



$$1 - Re = 3 \cdot 10^4; 2 - Re = 6 \cdot 10^4; 3 - Re = 9 \cdot 10^4$$

**Рисунок 3** – Распределение числа Нуссельта по длине обогреваемого участка центрального имитатора твэл модели ТВС ВВЭР-1000

Сравнение результатов численного расчета числа Нуссельта на участке стабилизированного теплообмена с корреляцией (17) приведено в таблице 3.

**Таблица 3** – Сравнение результатов расчета числа Нуссельта на участке стабилизированного теплообмена модельной сборки с относительным шагом имитаторов 1,4 с эмпирическими корреляциями

Параметр	Значение		
Число Рейнольдса	$3 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^4$
Число Нуссельта (численный расчет)	190	337	474
Число Нуссельта, рассчитанное по (17)	193	345	485
Отклонение, %	-1,6	-2,3	-2,3

## Результаты и выводы

1. Предложена математическая модель течения и теплообмена в пучках стержневых твэл ядерных реакторов типа ВВЭР. Модель базируется на осредненных уравнениях движения и энергии несжимаемой турбулентной среды, замыкаемых квадратичной  $k - \epsilon$  моделью и алгебраической зависимостью для турбулентного числа Прандтля.

2. Рассмотрено течение и теплообмен в физической модели ТВС ВВЭР-1000, созданной в ГНЦ РФ-ФЭИ, которая состоит 19 имитаторов твэл, выполненных в масштабе 1:1,758.

3. Получены распределения безразмерного коэффициента теплоотдачи (числа Нуссельта) от поверхности центрального электрообогреваемого имитатора твэл вдоль оси пучка для чисел Рейнольдса потока теплоносителя  $3 \cdot 10^4$ ,  $6 \cdot 10^4$ ,  $9 \cdot 10^4$ .

4. Выполнено сравнение результатов численного моделирования с данными экспериментов, проведенных на исследуемой модели ТВС ВВЭР-1000 в ГНЦ РФ-ФЭИ. Показано, что отклонение расчетных и экспериментальных данных не превышает погрешности эксперимента.

### Список литературы

1. Жуков А.В., Сорокин А.П., Кузина Ю.А. Теплообмен и температурные поля твэлов в активных зонах ВВЭР (экспериментальные и расчетные исследования) // 5-я Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР»: матер. ОКБ "Гидропресс", 29 Мая – 1 Июня 2007. ОКБ «ГИДРОПРЕСС»: сайт. Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/autorun/article77-ru.htm> (дата обращения 20.04.2013). Heat transfer and temperature fields of pins in VVER cores (experimental and calculation research)
2. Марков П.В., Солонин В.И. Моделирование течения в пучке цилиндрических твэлов реактора ВВЭР, дистанционированных сотовой решеткой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 3. С. 17-29.
3. Chen W., Lien F., Leschziner M. Non-linear eddy-viscosity modelling of transitional boundary layers pertinent to turbomachine aerodynamics // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1998. Vol. 19, no. 4. P. 297-306. DOI: [10.1016/S0142-727X\(97\)10012-1](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(97)10012-1)
4. Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. М.: Академкнига, 2004. 220 с.
5. STAR-CCM+ version 8.06. UserGuide [руководство пользователя]. CD-adapco Group, 2014.
6. Tuncer Cebeci. Analysis of Turbulent Flows. Elsevier Science, 2004. 260 p.

## **Numerical Calculation of Heat Transfer in Fuel Rods Assembly of VVER-Type Nuclear Reactors**

**P.V. Markov<sup>1,\*</sup>**

[\\*mankov@list.ru](mailto:mankov@list.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** VVER-type reactor facility, fuel rods assembly, physical model, turbulent Prandtl number, heat transfer coefficient, computational hydrodynamic and heat exchange

---

The paper considers the flow and heat transfer processes in the physical fuel assembly model of the reactor plant VVER-1000. The physical model is made and used in IPPE (Institute of Physics and Power Engineering) to study the temperature fields and an integral value of the heat transfer coefficient in rod bundles of fuel elements. The model consists of nineteen steel rods. Seven central rods are heated by electric heating elements. On the surfaces of the heated rods there are thermocouples for temperature measurement. The model shed water at various mass flow rates under conditions close to the normal ones. According to the results of experimental data processing, the IPPE specialists proposed a formula for calculating the Nusselt number (dimensionless heat transfer coefficient).

The paper proposes a model for calculating the flow and heat transfer in rod bundle of fuel elements, which is based on the methods of computational fluid dynamics. The model includes fixed averaged equations of motion and energy of a turbulent fluid (RANS), steady-state energy equation of the solid. Turbulent flow of coolant is modeled by nonlinear k-ε turbulence model. The averaged equation of fluid motion is solved using algebraic model for the turbulent Prandtl number. At the inlet to the computational model a value of the coolant flow rate was set. The term of the constant heat flux on the inner surface of the rod shells was accepted. The computational model is implemented using the software package STAR-CCM

Validation of the computational model is made according to the IPPE data. A computational model is created to simulate the physical model of the fuel assembly VVER-1000 used in the IPPE. Numerical calculations of heat transfer for different flow regimes are performed. The calculated values of the heat transfer coefficient are compared with the values calculated from the experimental correlation of the IPPE. It was shown that deviation of calculated values from the experimental ones does not exceed 5%. It is concluded that the proposed model can be used for calculating the heat transfer from the rod fuel elements of VVER reactors.

## References

1. Zhukov A.V., Sorokin A.P., Kuzina Yu.A. Heat transfer and temperature fields of pins in VVER cores (experimental and calculation research). *5-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Obespechenie bezopasnosti AES s VVER": mater.* [Proc. of the 5<sup>th</sup> International Conference "Safety Assurance of NPP with WWER"]. OKB "Gidropress", 29 May – 1 June 2007. OKB "GIDROPRESS": website. Available at: Cores of VVER for nuclear power <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/autorun/article77-ru.htm> , accessed 01.10.2014. (in Russian).
2. Markov P.V., Solonin V.I. Simulation of Flow in Bunch of Cylindrical Fuel Rods of VVER Reactor, Dissociated by Cellular Grid. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, no. 3, pp. 17-29. (in Russian).
3. Chen W., Lien F., Leschziner M. Non-linear eddy-viscosity modelling of transitional boundary layers pertinent to turbomachine aerodynamics. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1998, vol. 19, no. 4, pp. 297-306. DOI: [10.1016/S0142-727X\(97\)10012-1](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(97)10012-1)
4. Shmelev V.D., Dragunov Yu.G., Denisov V.P., Vasil'chenko I.N. *Aktivnye zony VVER dlya atomnykh elektrostantsiy* [Cores of VVER for nuclear power]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004. 220 p. (in Russian).
5. STAR-CCM+ version 8.06. UserGuide. CD-adapco Group, 2014.
6. Tuncer Cebeci. *Analysis of Turbulent Flows*. Elsevier Science, 2004. 260 p.