

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС**

УДК 621.039.517.6

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА
В ТВС РЕАКТОРА ВВЭР-СКД**

© 2014 г. Д.С. Грузинцев, А.С. Шелегов

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Обнинск, Калужская обл.

В статье представлены результаты численного моделирования теплообмена в ТВС реактора на сверхкритических параметрах теплоносителя. Расчет проводился с целью верификации расчетного кода ANSYS CFX. Верификация кода проводилась с использованием эмпирических зависимостей для критерия Нуссельта. В результате расчета были получены поля температур и скоростей теплоносителя. Результаты расчета в целом согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: сверхкритические параметры, теплоноситель, тепловыделяющая сборка, теплообмен, расчетный код.

Поступила в редакцию 02.06.2014 г.

В стратегическом документе Минатома России «Облик атомной науки в XXI веке» реакторные установки на закритических параметрах отнесены к перспективным. Их основное назначение – усовершенствование действующих водоохлаждаемых реакторов на тепловых нейтронах со сравнительно низким КПД. Эту задачу должен решать ВВЭР-СКД, КПД энергоблока с которым может достигать 40 - 45% [1]. ОКБ «Гидропресс» предлагает несколько концептуальных проектов реактора ВВЭР-СКД с различным спектром нейтронов и схемами циркуляции теплоносителя [2]. Каждый проект реактора обладает своими преимуществами и своими недостатками, которые необходимо устранить путем проведения комплекса расчетно-экспериментальных работ.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ТВС РЕАКТОРА ВВЭР-СКД

Численное моделирование теплообмена при сверхкритических параметрах теплоносителя проводилось для тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-СКД, конструкция которой предложена ОКБ «Гидропресс» [2]. Поперечное сечение ТВС данной конструкции представлено на рисунке 1а. Тепловыделяющие элементы с наружным диаметром $d_{нар}=10,7$ мм расположены в ТВС треугольной упаковки (шахматное расположение) с шагом 12 мм.

Для численного моделирования теплообмена ТВС реактора ВВЭР-СКД была выбрана расчетная область тепловыделяющей сборки, состоящая из 6 регулярных элементарных ячеек, образованных семью ТВЭЛами. Расчетная область представлена на рисунке 1б.

По известным геометрическим размерам для проведения расчетов была разработана твердотельная расчетная модель выбранной области ТВС. Разработка модели проводилась при помощи Design Modeler, входящего в состав программного комплекса ANSYS Workbench. Расчетная сетка, сгенерированная в приложении CFX-Mesh, для модели представлена на рисунке 1в.

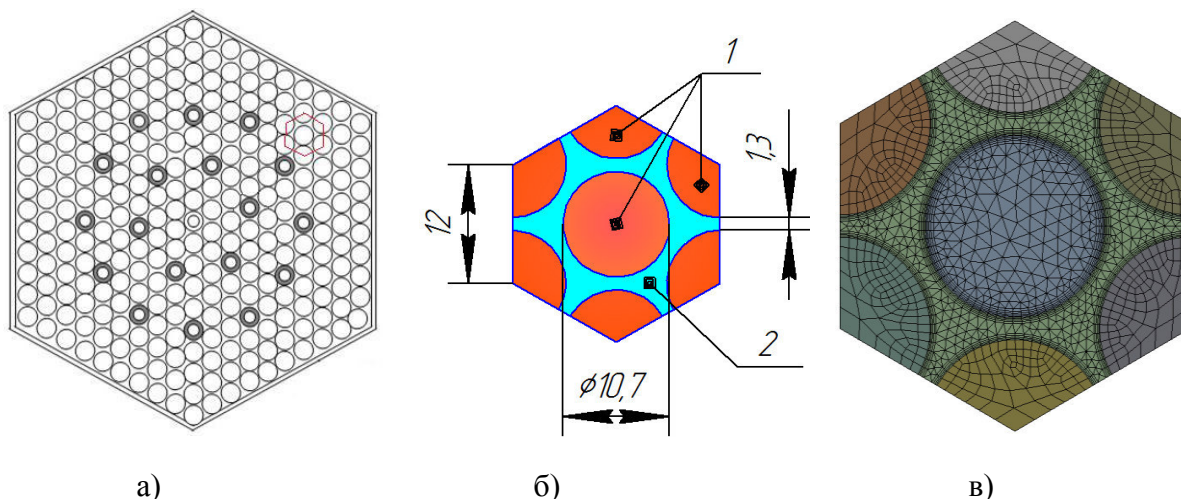


Рис. 1. Геометрия ТВС реактора ВВЭР-СКД:
а) поперечное сечение; б) расчетная область; в) расчетная сетка

Сетка является частично структурируемой. Детализация сетки проводилась путем ее сгущения в области течений теплоносителя на границе с поверхностью ТВЭЛов. Сгущение проводилось по гиперболическому закону. Для центрального ТВЭЛа также проводилось сгущение сетки на границе стенка-жидкость. Количество элементов сетки составило порядка 12 млн. штук.

Ввиду неопределенности значений расхода по ТВС активной зоны, по элементарным ячейкам ТВС на входе задавалось среднее значение скорости теплоносителя $W = 0,78$ м/с ($\rho W = 606,06$ кг/м²·с), рассчитанное по техническим характеристикам реактора ВВЭР-СКД. Температура на входе $t_{вх} = 280$ °С, давление $P_{ref} = 25$ МПа, энерговыделение q_v соответствует реакторному и задавалось для двух вариантов:

- средне нагруженной $q_v = 1,07 \cdot 10^8$ Вт/м³;
- максимально нагруженной $q_v = 1,39 \cdot 10^8$ Вт/м³.

Длина энерговыделения составляет 4050 мм.

С целью экономии вычислительных ресурсов, оболочка тепловыделяющих элементов, ввиду ее тонкостенности, была исключена из расчетной модели, но учитывалась программно, путем задания в ТВЭЛах на границе стенка-жидкость термического сопротивления, а именно задавалась толщина оболочки $\delta = 0,55$ мм и ее теплопроводность $\lambda = 16,5$ Вт/м·К [2]. Теплофизические свойства воды рассчитывались с использованием стандартной библиотеки ANSYS-CFX (IAPWS IF97). Теплофизические свойства топлива задавались постоянными, соответствующими UO₂.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА И ИХ АНАЛИЗ

Расчеты проводились при вариации энерговыделения с использованием двух моделей турбулентности k-ε и k-Ω. В результате расчета были получены распределение температуры; поле температур; поле скоростей теплоносителя.

На рисунке 2а показано распределение температур в поперечном сечении участка на высоте 0,03 м. Максимальное значение температуры выявлено в центре ТВЭЛов и составляет для данного сечения 410 °С. Температура стенки – 364 °С. Градиент температур в ТВЭЛе равен 10°С/мм. Такой большой градиент температур в топливе объясняется чрезвычайно низкой теплопроводностью керамики UO₂ ($\lambda = 8,68$ Вт/м·К). Градиент температур по радиусу ТВЭЛа представлен на рисунке 2б.

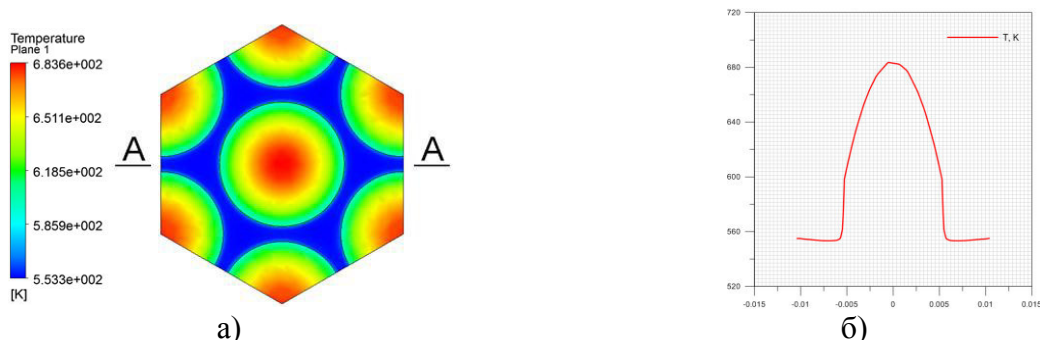


Рис. 2. Распределение температур в поперечном сечении ($q_v = 1,07 \cdot 10^8$ Вт/м³) участка на высоте 0,03 м: а) поле температур; б) градиент температур в сечении А-А

На рисунке 3 представлено распределение скоростей в трех характерных участках. На рисунке 3а представлено распределение скоростей на участке 0,5 м. Данный участок характеризуется не сильно изменяющимися свойствами теплоносителя. Профиль скорости имеет классическую форму скорости. Максимум скорости наблюдается в центре элементарной ячейки и составляет 1 м/с. Во второй зоне (рис. 3б) происходит перераспределение профиля скорости ввиду сильно изменяющихся свойств теплоносителя: вязкость, плотность. При формировании профиля скорости на данном участке большое значение имеют архимедовы силы, возникающие ввиду больших градиентов плотностей по сечению элементарной ячейки. Можно отметить, что максимум скорости находится в узком сечении ячейки. Уменьшение градиентов плотности и вязкости приводит профиль скорости к классическому виду с максимумом скорости в центре элементарной ячейки (см рис. 3в). Скорость теплоносителя от сечения к сечению увеличивается, что связано с уменьшением плотности теплоносителя.

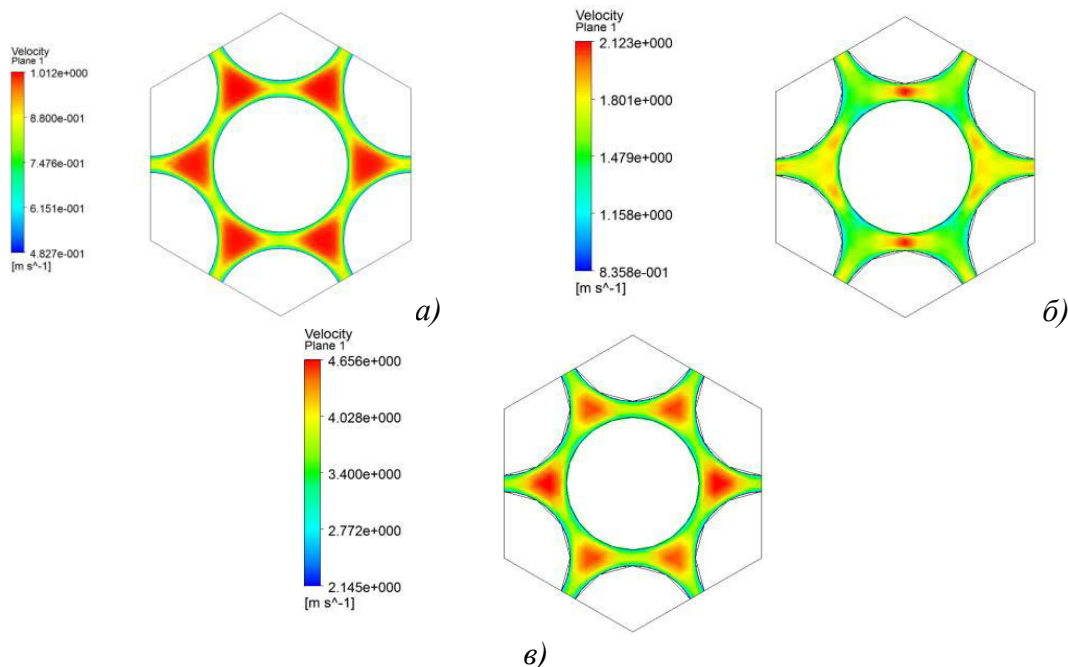


Рис. 3. Распределение скоростей теплоносителя: а) 0,5 м; б) 1,48 м; в) 3 м

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТНОГО КОДА ANSYS-CFX

Верификация расчетного кода ANSYS-CFX проводилась с использованием экспериментальных данных. Использовались следующие эмпирические зависимости [3]:

- Бишопа: $Nu = 6,9 \cdot 10^{-3} \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,66} \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_f}\right)^{0,43}$;
- Дидякин-Попова: $Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,7} \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_f}\right)^{0,43} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_{вх}}\right)^{0,43} \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_{вх}}\right)^{0,43}$;
- ФЭИ: $Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,75} \cdot \left(\frac{\mu_w}{\mu_f}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{\rho_w}{\rho_f}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{C_{p_w}}{C_{p_f}}\right)^{0,43}$.

Ввиду того, что имеет место теплообмен с сильно изменяющимися теплофизическими свойствами теплоносителя, необходимо для расчета теплоотдачи учитывать неизетермичность потока теплоносителя. Неизетермичность учитывается введением соответствующих поправок на изменение теплофизических свойств теплоносителя:

$$\rho_w/\rho_f, C_{p_w}/C_{p_f}, \mu_w/\mu_f$$

где $\rho_w; C_{p_w}; \mu_w$ – плотность, теплоемкость, вязкость теплоносителя по температуре стенки;
 $\rho_f; C_{p_f}; \mu_f$ – плотность, теплоемкость, вязкость теплоносителя в потоке.

При нахождении температуры стенки учитывалось падение давления по длине [4] и изменение теплофизических свойств воды [5].

Верификация кода ANSYS-CFX проводилась по температуре стенки тепловыделяющего элемента. На рисунке 4 представлены распределения температуры стенки по длине в широком зазоре элементарной ячейки.

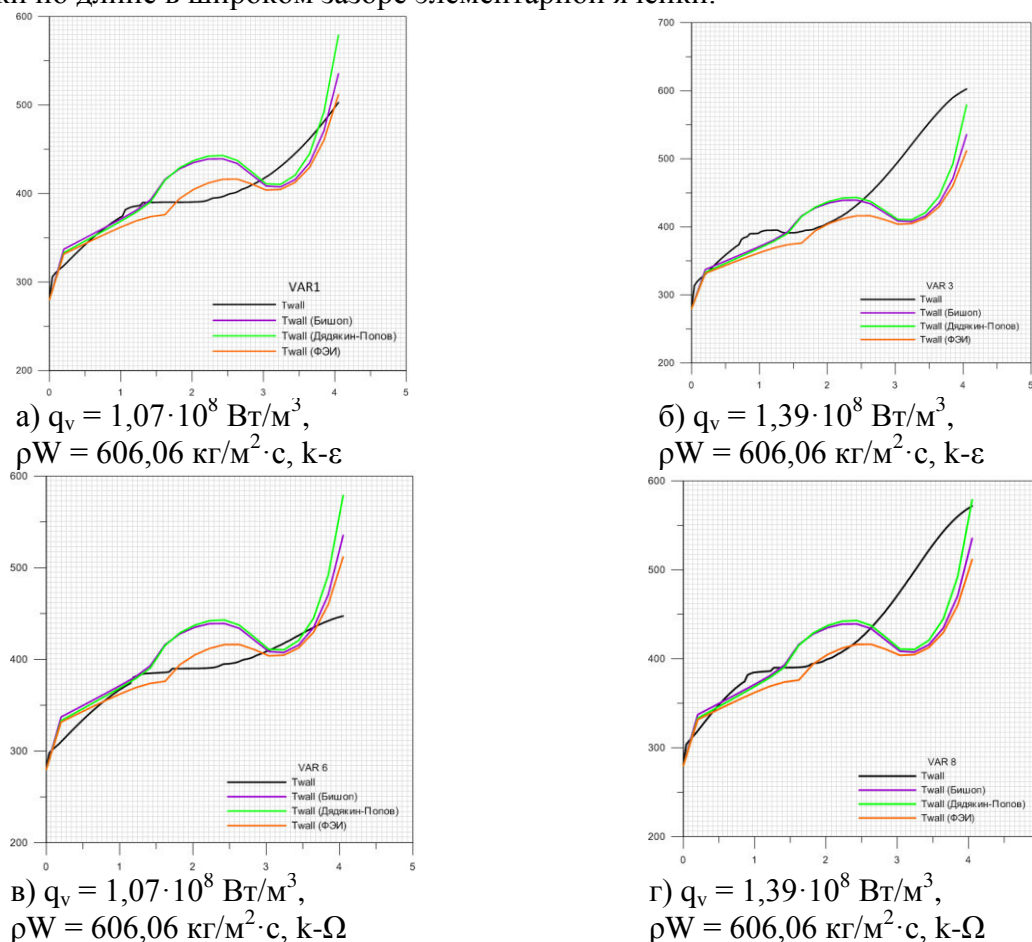


Рис. 4. Распределения температуры стенки по длине

Хорошее совпадение результатов расчета по коду ANSYS-CFX и экспериментальных данных наблюдается в первой зоне, которая характеризуется малым изменением свойств теплоносителя.

Различия результатов расчета и экспериментальных данных на втором и третьем участках, по всей видимости, связано с крупной расчетной сеткой. Для детального описания процессов тепломассообмена в этой области необходимо использовать более мелкую сетку.

С учетом погрешности в экспериментах, которая составляет $\pm 20-25\%$ по определению критериев Нуссельта, результаты расчета являются вполне приемлемыми. В ходе анализа результатов расчета выявлена сеточная зависимость решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана расчетная модель, которая состоит из 6 регулярных элементарных ячеек, образованных семью ТВЭЛами. Модель разработана на основе тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-СКД, конструкция которой предложена ОКБ «Гидропресс». Длина энерговыделения составляет 4050 мм, относительный шаг решетки $S/d = 1,12$. Расчет проводился для различных режимов при вариации энерговыделения и с использованием двух моделей турбулентности $k-\epsilon$ и $k-\Omega$.

В результате расчета были получены распределение температур в ТВС и поле скоростей теплоносителя. Было проведено сравнение значений температуры оболочки тепловыделяющего элемента, рассчитанной в программе ANSYS-CFX, с температурой оболочки, рассчитанной по эмпирическим зависимостям. В ходе анализа результатов расчета выявлена сеточная зависимость решения. С учетом погрешности в экспериментах, которая составляет $\pm 20-25\%$ по определению критериев Нуссельта, результаты расчета являются вполне приемлемыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов, П.Л. Сверхкритические параметры – будущее реакторов с водяным теплоносителем и АЭС [Текст] / П.Л. Кириллов // Атомная техника за рубежом. – 2001. – №6.
2. Васильченко, И.Н. и др. Концепция активной зоны ВВЭР-СКД; выбор конструкционных материалов и конструкция ТВС. Годовой отчет «Об основных научно-технических работах ОКБ «Гидропресс» за 2007 год» [Текст] / И.Н. Васильченко, С.Н. Кобелев, В.М. Махин и др. // Научно-технический и рекламный сборник №8. – Подольск, 2008.
3. Grahm Richards, Igor Pioro, Glenn Harvel, Alexsei Shelegov, Pavel Kirillov. Temperature Profiles of a Vertical, 7-Element Bundle Cooled with Supercritical Freon-12 // Journal of Energy and Power Engineering. – 2013. – №2. – Volume 7.
4. Кириллов, П.Л. и др. Справочник по теплогидравлическим расчетам [Текст] / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Ривкин, С.Л. и др. Теплофизические свойства воды и водяного пара [Текст] / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М., 1975.

Numerical Simulation of Heat Transfer Characteristics of SCWR Fuel Assembly

D.S. Grusintsev*, A.S. Shelegov**

*Obninsk Institute of nuclear power engineering the Branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,
1 Studgorodok, Obninsk, Kaluzhskaya region, Russia 249040
* e-mail: gruzintsev.d@gmail.com ; ** e-mail: a_shelegov@mail.ru*

Abstract – The article is devoted to the results of numerical simulation of heat transfer characteristics of a fuel assembly cooled by a water of super critical parameters. It also corresponds about the calculation done for verification of ANSYS CFX code. The authors tell about the verification carried out with the use of empirical correlations for Nusselt criterion. The flow velocity field and temperature distribution are obtained. The results of a simulation in a whole are in agreement with experimental data.

Keywords: supercritical parameters, coolant, fuel assembly, heat transfer, numerical simulation code.

REFERENCES

- [1] Kirillov P.L. Sverkhkriticheskiye parametry – budushcheye reaktorov s vodyanym teplonositelem i AES [Supercritical parameters is the future of the water heat transfer reactors and the NPP]. Atomnaya tekhnika za rubezhom [Nuclear equipment abroad]. 2001, №6, ISSN 0320-9326 (in Russian)
- [2] Vasilchenko I.N., Kobelev S.N., Makhin V.M. Kontsepsiya aktivnoy zony VVER-SKD; vybor konstruktsionnykh materialov i konstruktsiya TVS [Concept of active zone WWER-SCP; choice of constructional materials and fuel assembly construction.]. Godovoy otchet «Ob osnovnykh nauchno-tekhnicheskikh rabotakh OKB «Gidropress» za 2007 god» [The annual report "About the main scientific and technical works of experimental design bureau of "Gidropress" for 2007"]. Nauchno-tekhnicheskyy i reklamnyy sbornik №8 [Scientific, technical and advertizing collection № 8]. Podolsk, 2008. (in Russian)
- [3] Richards G., Pioro I., Harvel G., Shelegov A., Kirillov P. Temperature Profiles of a Vertical, 7-Element Bundle Cooled with Supercritical Freon-12. Journal of Energy and Power Engineering. 2013, №2, Volume 7, ISSN 1934-8975 (in English)
- [4] Kirillov P.L., Yuryev Yu.S., Bobkov V.P. Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam [Heathydraulic calculations reference book]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1990. (in Russian)
- [5] Rivkin S.L., Aleksandrov A.A. Teplofizicheskiye svoystva vody i vodyanogo para [Heatphysical properties of water and water vapor]. M. 1975. (in Russian)