

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов

**РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ
РЕШЕТОК В ОБЛАСТИ НАПРАВЛЯЮЩЕГО КАНАЛА ТВС-КВАДРАТ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ ANSYS CFX**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен обзор критериев для количественной оценки эффективности перемешивающих решёток, приведены результаты численного моделирования теплогидравлических процессов в потоке теплоносителя для ячейки ТВС в области направляющего канала. Получены численные значения критериев, характеризующих эффективность перемешивания для решеток с дефлекторами различной геометрической формы.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, вычислительная гидродинамика, перемешивающая решетка, направляющий канал.

На протяжении нескольких лет важной и актуальной исследовательской задачей атомной энергетики является исследование структуры турбулентного потока и особенностей перемешивания теплоносителя в топливных сборках ядерных реакторов. В настоящее время для решения широкого круга прикладных задач проектирования объектов атомной энергетики активно используются программы трёхмерного теплогидравлического расчета (CFD), позволяющие помочь конструкторам оптимизировать форму перемешивающих решеток ТВС еще до изготовления и тем самым сократить объем экспериментальных исследований.

В результате проведенного аналитического обзора современных российских и международных публикаций, посвященных применению CFD-программ для исследования течения потока теплоносителя в ТВС с перемешивающими решётками [1-9] были отмечены основные моменты, необходимые для создания реалистичной модели ТВС и анализа эффективности перемешивающих решеток.

Многие исследователи придерживаются следующих требований к расчётным моделям:

1) расчётная область, чаще всего, представляет собой фрагмент ТВС, состоящий из нескольких твэлов. При этом на боковых границах расчетной области применяются периодические граничные условия или условия симметрии, позволяющие смоделировать либо бесконечно большой в поперечном сечении пучок твэлов, либо полное сечение ТВС;

2) поперечный размер сеточных элементов в большинстве случаев выбирается из условия равенства $1/25$ – $1/20$ диаметра твэлов, при этом авторы используют различные типы сеток: блочно-структурированная шестигранная, неструктурированная тетраэдрическая либо полиэдрическая, а также адаптивные декартовы сетки. Для описания «гладкого» пучка твэлов размеры элементов в длину выбираются из диапазона 100–150 от поперечного размера. Во всех расчётах с неструктурированными сетками строятся призматические пристеночные элементы, высота которых определяется требованиями моделей турбулентности;

3) весьма эффективными для моделирования турбулентных характеристик потока теплоносителя за перемешивающими решетками являются вихреразрешающие модели турбулентности типа LES, DES и SAS. Однако для сравнения различных конструкций решеток, оценки их эффективности и выбора оптимальных вариантов из большого набора многие авторы используют RANS модели. Такой подход значительно менее требователен к вычислительным ресурсам и позволяет быстро получить осреднённые характеристики течения, необходимые для расчёта критериев эффективности решёток с достаточной для инженерной практики точностью;

4) наиболее точными среди RANS-моделей по сравнению с результатами верифика-

ционных экспериментов оказываются SST-модель турбулентности при условии подробного разбиения пристеночных слоёв, а также модель Рейнольдсовых напряжений. Данная модель, построенная на базе $k-\omega$ модели, способна учесть анизотропию турбулентности и вторичные течения, возникающие как в «гладком» пучке твэлов, так и при протекании теплоносителя через перемешивающую решетку ТВС.

Основными критериями, характеризующими эффективность перемешивающих решеток, являются критическая тепловая мощность и коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи. Важно отметить, что текущий уровень трехмерного математического моделирования не позволяет напрямую определить эти величины с помощью CFD-программ. Поэтому современные расчетные исследования направлены на определение характеристик перемешивающих решеток для однофазного теплоносителя. Для анализа эффективности решеток различными авторами предлагаются следующие критерии эффективности:

- 1) относительный коэффициент местного гидравлического сопротивления решетки;
- 2) поперечная скорость в межтвэльных зазорах за решеткой;
- 3) коэффициент межъячеечного перемешивания;
- 4) величина локальных осевых скоростей теплоносителя за решеткой;
- 5) критерии, характеризующие вихревое воздействие дефлекторов;
- 6) относительный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта);
- 7) температура поверхности твэла;
- 8) температура теплоносителя по сечению ТВС;
- 9) неравномерность температуры по сечению ТВС;
- 10) увеличение статического давления на твэл;
- 11) пульсации давления на стенке твэла, возникающие за перемешивающей решеткой;
- 12) расстояние затухания гидродинамических возмущений, вызванных дефлекторами;
- 13) прочность конструкции перемешивающей решетки;
- 14) увеличение металлоёмкости конструкции дистанционирующей решетки за счет дефлекторов.

Настоящая работа является продолжением расчетных исследований, представленных в [10]. Расчетный анализ, основанный на оценке критериев относительного коэффициента гидравлического сопротивления (КГС), относительного числа Нуссельта, распределения температуры поверхности твэла и относительной поперечной скорости, позволил выбрать конструкции дефлекторов, наиболее эффективных с точки зрения теплогидравлики в рассмотренном в [10] фрагменте ТВС, состоящем из одинаковых (стандартных) межтвэльных ячеек.

Однако необходимо рассмотреть эффективность выбранных дефлекторов применительно к гидравлическим ячейкам вблизи направляющего канала (НК) ТВС, поскольку в данной области нарушается структура расположения дефлекторов, вызванная установкой НК, имеющего больший диаметр по сравнению с твэлами.

Расчетная область и методика проведения расчетов

Рассмотренная расчетная модель фрагмента ТВС-КВАДРАТ (рис. 1) представляла собой твэльный пучок 4×4 твэла с дистанционирующей перемешивающей решеткой. В длину модель соответствовала одному пролету между ДР. В центральной части пучка имитировался один направляющий канал, имеющий диаметр больше, чем у твэлов. Перемешивающая дистанционирующая решетка в районе направляющего сконструирована таким образом, что на каждую гидравлическую ячейку вблизи НК приходится только по одному дефлектору.

В процессе поиска оптимальной конструкции проводилось исследование формы дефлекторов посредством изменения представленных геометрических параметров:

- угла отгиба α ;
- высоты H ;
- угла наклона линии сгиба β .

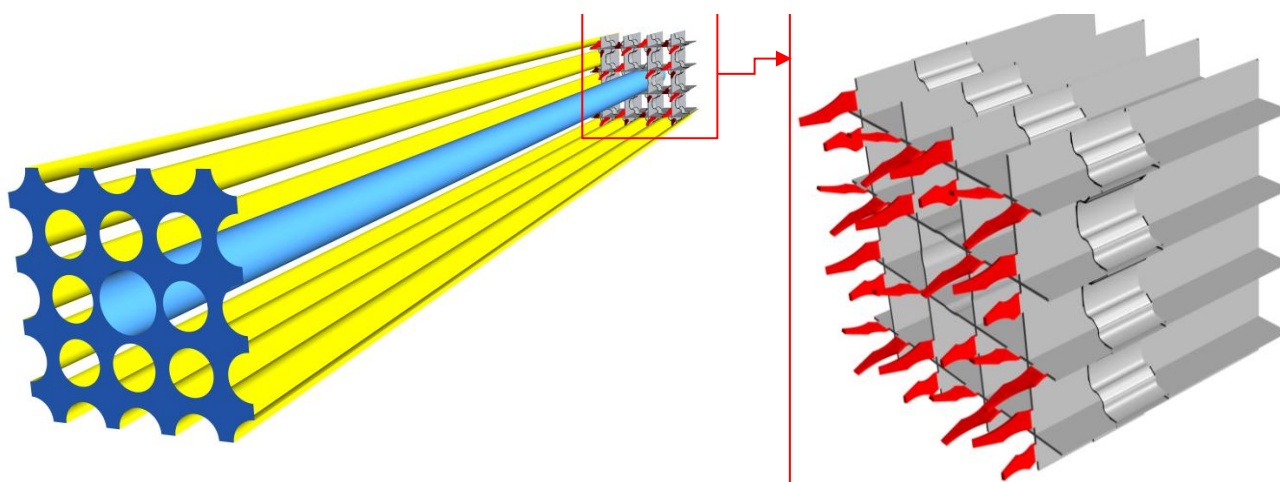


Рис. 1. Общий вид расчетной модели

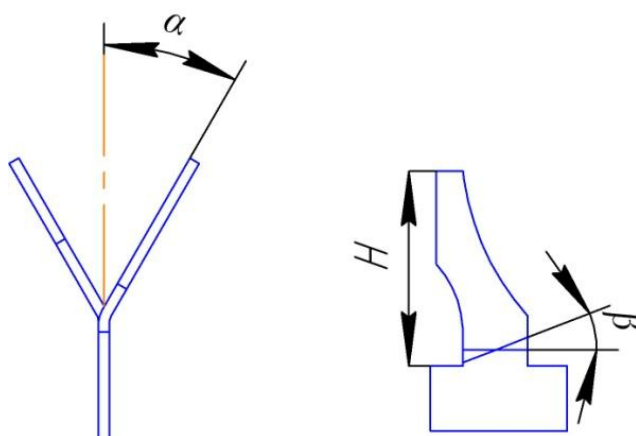


Рис. 2. Геометрические характеристики deflectоров

В области дистанционирующих решёток генерировалась тетраэдрическая сетка с призматическими слоями на поверхностях.

Таблица 1

Основные характеристики расчётной сетки

Параметр	Величина
Максимальный размер элемента в поперечном сечении, мм	0,5
Общее число сеточных элементов, млн	25
Число призматических слоев	15
Значение безразмерного расстояния от стенки y^+	1÷3
Максимальный продольный размер, мм	10
Коэффициент роста продольных элементов	1,1
Высота первого пристеночного элемента, мм	0,002
Коэффициент роста призматических слоёв	1,25

Размер элемента в поперечном сечении выбирался из условия равенства его $1/20$ гидравлического диаметра, высота первого пристеночного элемента подбиралась исходя из требований модели турбулентности y^+ в диапазоне от 1 до 3. Далее эта сетка выдавливалась методом нормальной экструзии вдоль твэлов. Максимальный продольный размер сеточного элемента при этом соответствовал гидравлическому диаметру. Общий вид расчетной сетки представлен на рис. 3.

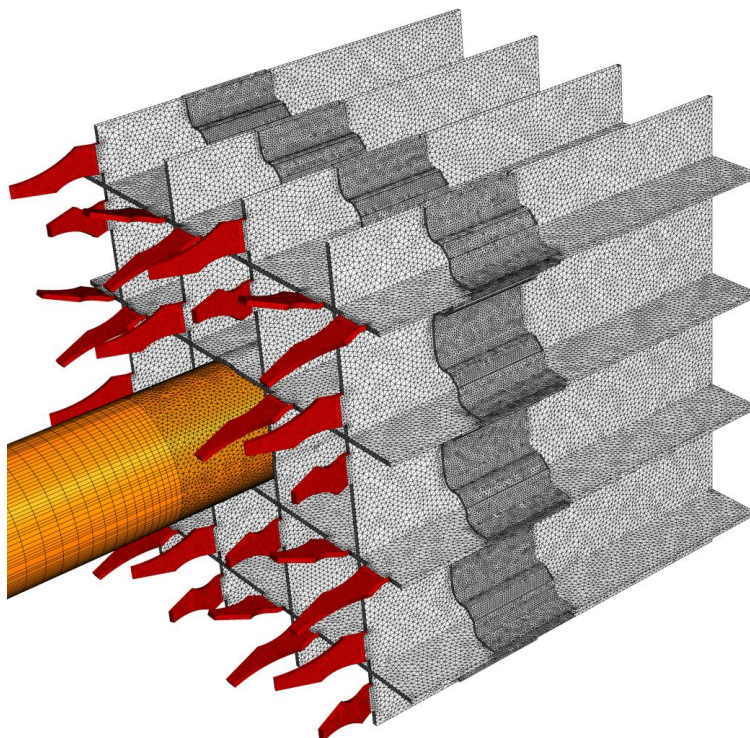


Рис. 3. Общий вид расчётной сетки

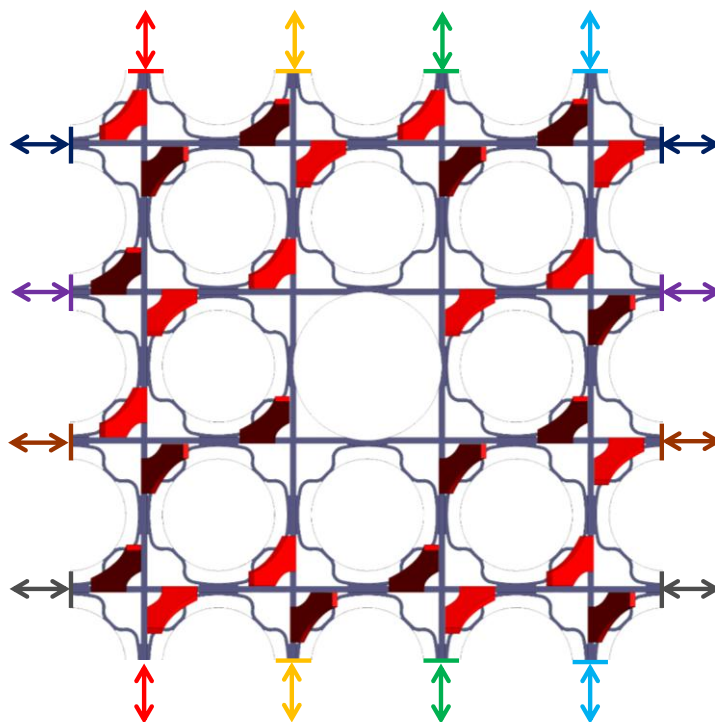


Рис. 4. Схема расположения поверхностей с граничными условиями периодичности

Настраиваемые параметры решателя Ansys CFX 14.0 следующие:

- тип расчёта – стационарный;
- модель жидкости – сплошная несжимаемая среда;
- свойства жидкости – неизменные;
- модель турбулентности – модель Рейнольдсовых напряжений BSL-RSM (поскольку она позволяет учесть анизотропию турбулентности, вызванную дефлекторами).

В качестве граничных условий задавались режимные параметры теплоносителя, характерные для активных зон реакторов PWR:

- среднерасходная скорость теплоносителя на входе в модель – 4,46 м/с (задавался профиль скорости, соответствующий стабилизированному течению теплоносителя в пучке стержней);
- температура теплоносителя на входе – 308°С;
- нулевое статическое избыточное давление на выходе из модели;
- тепловой поток на поверхности ТВЭЛов – 657000 Вт/м²;
- поверхности (ТВЭЛов, направляющего канала, дистанционирующей решётки) – адиабатические гладкие без проскальзывания (условие прилипания).

С целью увеличения представительности результатов был проведён начальный расчёт модели с дистанционирующей решёткой без дефлекторов потока для получения стабилизированных профилей граничных условий. Полученные в процессе начального расчёта данные – профиль скорости, реинольдсовых напряжений и температуры на расстоянии пяти калибров после дистанционирующей решётки – экспортировались в качестве граничного условия на входе для расчётов с дефлекторами.

Кроме того, согласно схеме на рис. 4, задавались периодические граничные условия на противоположных гранях, что позволило смоделировать бесконечно большой в поперечном сечении пучок ТВЭЛов.

Результаты

В данной работе теплогидравлическая эффективность дефлекторов перемешивающей-дистанционирующей решетки оценивается с точки зрения следующих критериев:

- *относительное число Нуссельта* (Nu/Nu_0) – критерий, характеризующий изменение интенсивности теплоотдачи в ТВС, где Nu – относительное число Нуссельта дистанционирующей решётки с соответствующим типом дефлекторов; Nu_0 – относительное число Нуссельта дистанционирующей решётки без дефлекторов;
- *распределение температуры по поверхности твэла* – критерий, позволяющий оценить степень неравномерности температуры стенки твэла;
- *неравномерность локальных осевых скоростей за решёткой* – критерий, характеризующий изменение локальной осевой скорости теплоносителя при протекании через дистанционирующую решетку с дефлекторами.

Сравнительный анализ распределения поперечных скоростей теплоносителя в моделях ТВС с НК и без него (рис. 5), позволяющий оценить, как НК влияет на теплогидравлические характеристики ТВС, показал:

- отсутствие четырех дефлекторов перемешивающей решетки в районе НК оказывает влияние на гидродинамику потока в прилегающих ячейках, а также на части ячеек второго ряда (на рисунке выделены две ячейки второго ряда, при сравнении которых с аналогичными результатами ячеек регулярной области делается вывод о степени влияния направляющего канала);
- измененная структура течения потока теплоносителя в районе НК ТВС приводит к изменению условий охлаждения четырех ТВЭЛ, находящихся в непосредственной близости к НК;
- условия охлаждения остальных ТВЭЛ соответствуют регулярной области ТВС и совпадают с результатами расчета модели пучка ТВЭЛ без НК.

Для дальнейшего анализа был выбран твэл, отмеченный на рис. 5, условия охлаждения которого являются ухудшенными. На рис. 6 представлено распределение относительного числа Нуссельта по поверхности исследуемого твэла в нескольких сечениях по высоте для стандартного дефлектора с высотой 9 мм и углом отгиба 25 град. Под относительным числом Нуссельта в данном случае понимается отношение числа Нуссельта для моделей области НК с дефлекторами к числу Нуссельта для модели области НК без дефлекторов. В целях упро-

щения визуализации на рис. 6 и на последующих двух прочерчена утолщённая линия окружности с единичным радиусом, совпадающая с образующей твэла.

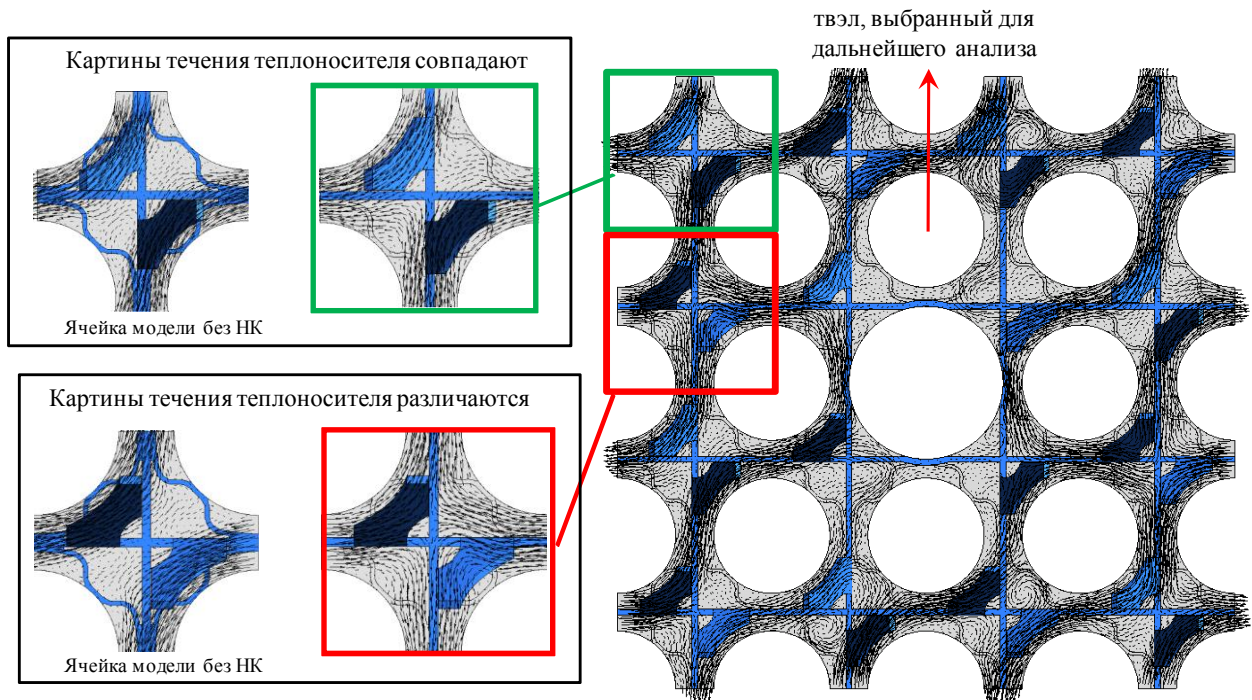
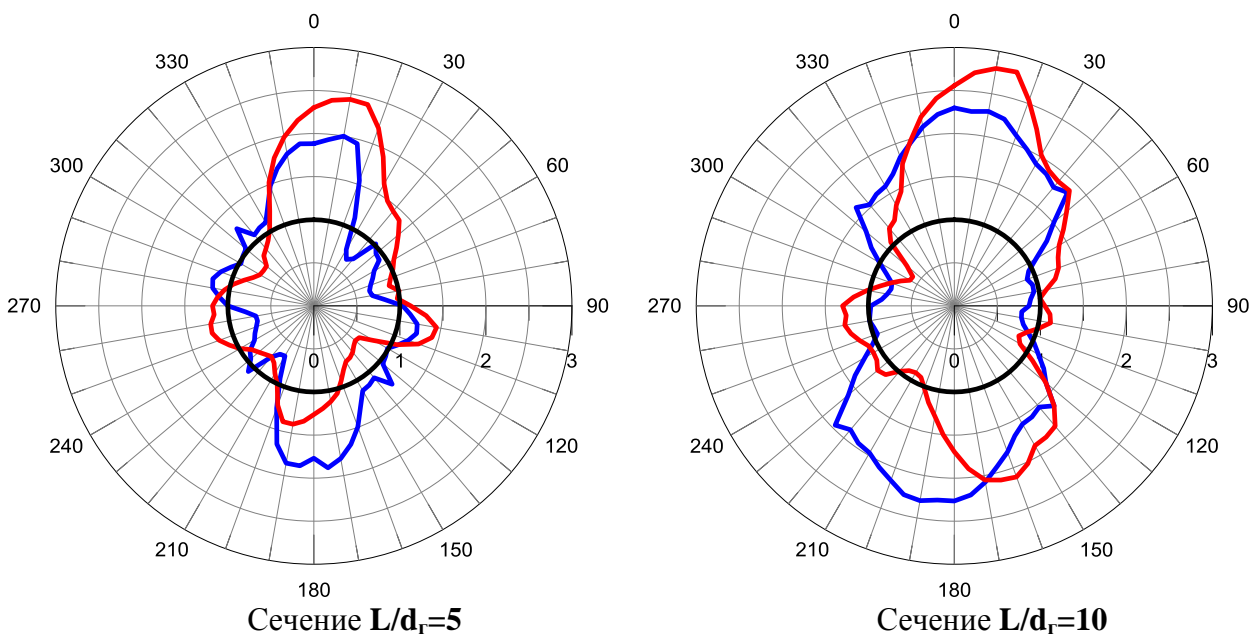


Рис. 5. Сравнительный анализ распределения поперечных скоростей теплоносителя в моделях ТВС с НК и без него

Данные из рис. 6 показывают, что существуют области, в которых относительное число Нуссельта меньше единицы, что свидетельствует о том, что установка стандартных дефлекторов на решётке привела к отрицательному эффекту с точки зрения теплоотдачи по сравнению со случаем без дефлекторов.

Для детального анализа в дальнейшем рассматривается распределение относительного числа Нуссельта по периметру твэла, прилегающего к НК, в сечении, расположенном за решёткой на расстоянии пяти гидравлических диаметров (рис. 7).



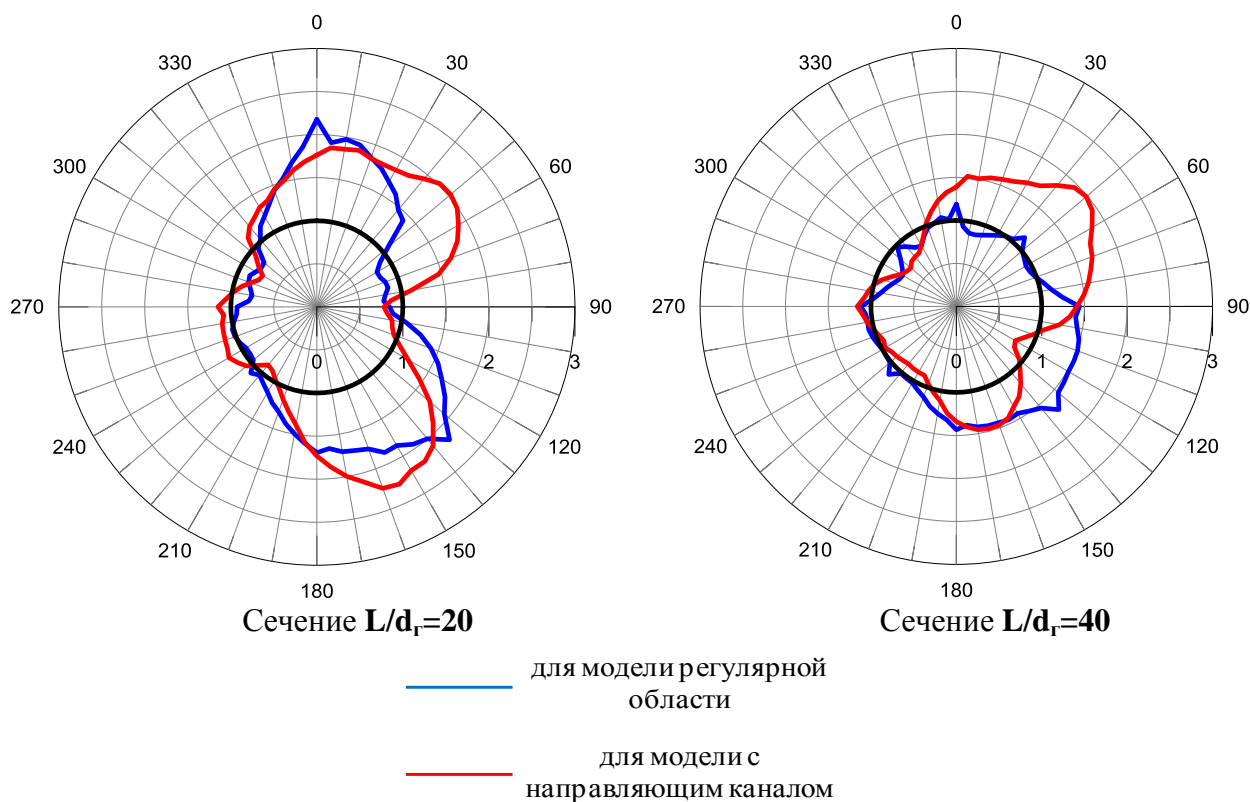


Рис. 6. Распределение относительного числа Нуссельта по поверхности исследуемого твэла в нескольких сечениях по высоте для стандартного дефлектора

Оказалось, несмотря на то, что стандартный дефлектор в регулярных ячейках обеспечивал высокую интенсификацию теплообмена, в области НК он явился не столь эффективным. Из рис. 7 видно, что установка дефлекторов такого типа не обеспечивает положительный эффект на всей поверхности твэла, существуют области в которых происходит снижение эффективности теплоотдачи.

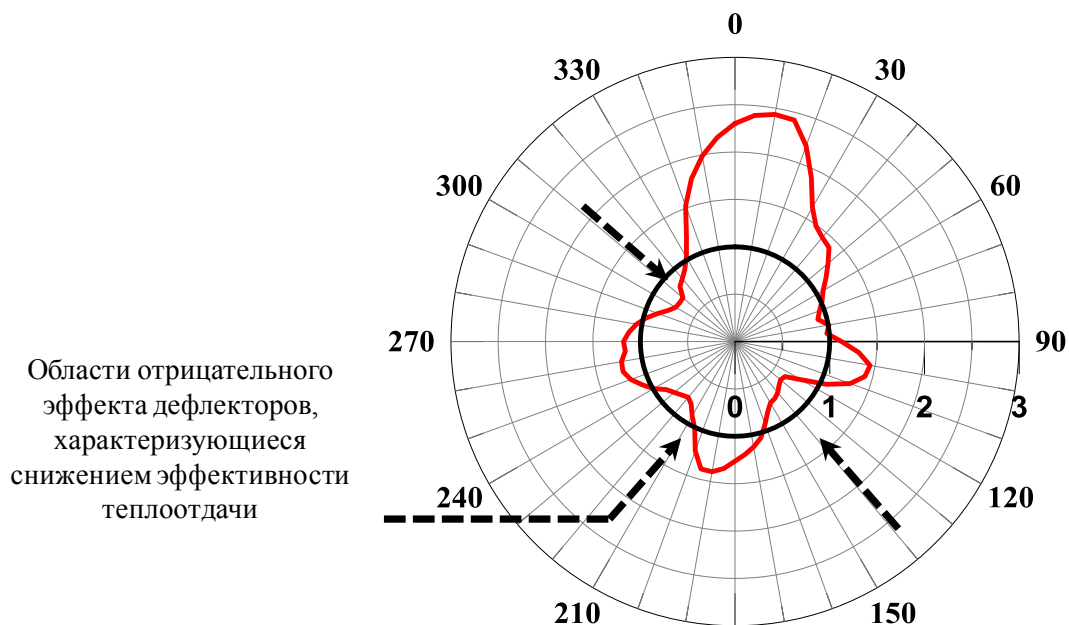


Рис. 7. Распределение относительного числа Нуссельта по поверхности исследуемого твэла в сечении, расположенном а решёткой на расстоянии пяти гидравлических диаметров

Дальнейшей задачей был поиск взаимосвязи гидродинамических характеристик и температурного состояния стенки твэла. На рис. 8 представлено наложение контурного графика относительной осевой скорости, векторного поля поперечной скорости, а также распределения относительного числа Нуссельта по периметру твэла для сечения, расположенного после ПР на расстоянии пяти гидравлических диаметров.

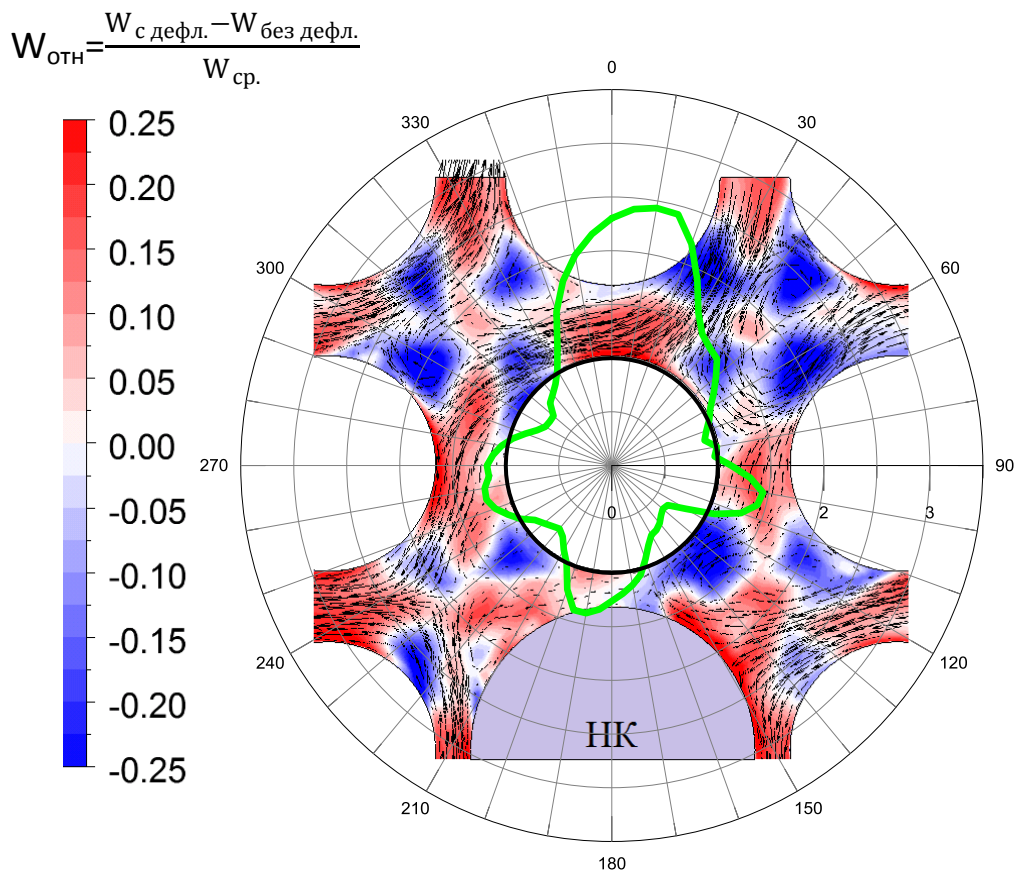


Рис. 8. Наложение контурного графика относительной осевой скорости, векторного поля поперечной скорости, а также распределения относительного числа Нуссельта по периметру твэла для сечения, расположенного после ПР на расстоянии пяти гидравлических диаметров

Под относительной скоростью в данном случае понимается увеличение или уменьшение осевой скорости по сравнению со случаем без дефлекторов в долях от среднерасходной скорости. Соответственно положительные значения свидетельствуют об увеличении локальной скорости, отрицательные – об уменьшении. Из рис. 8 можно видеть, что области периметра твэла, в которых происходит ухудшение теплосъёма, соответствуют зонам снижения осевой скорости потока теплоносителя вблизи стенки твэла. При этом возникновение поперечных скоростей в этих зонах не компенсирует данный отрицательный эффект.

В дальнейшем представленная методика была применена к нескольким конструкциям дефлекторов. Анализ полученных данных позволил установить, что дефлектор с высотой 8 мм, углом отгиба 30 град. и углом линии сгиба 15 град., является лучшим из рассмотренного диапазона геометрических параметров, поскольку при его установке на дистанционирующую решётку практически отсутствуют области на поверхности твэла, на которых значения относительного числа Нуссельта меньше единицы.

Заключение

Комплексный анализ результатов численного моделирования течения потока теплоносителя во фрагменте ТВС-КВАДРАТ с перемешивающей дистанционирующей решёткой позволили сделать следующие выводы:

1. Отсутствие четырех дефлекторов перемешивающей решетки в районе НК оказывает влияние на два прилегающих ряда гидравлических ячеек ТВС
2. В зависимости от конструкции дефлекторов на поверхностях твэлов могут возникать области, в которых происходит снижение эффективности теплоотдачи.
3. Из рассмотренных вариантов формы дефлекторов предпочтительным является дефлектор с высотой 8 мм, углом отгиба 30° и углом наклона линии сгиба 15° .

Предложенная методика оценки теплогидравлической эффективности различных перемешивающих решёток позволяет ускорить процесс поиска оптимальных вариантов конструкции, а также сократить объём экспериментальных исследований. Кроме того, данная методика может быть адаптирована для анализа конструкций других ТВС.

Библиографический список

1. **Peña-Monferrer, C.** CFD Turbulence Study of PWR Spacer-Grids in a Rod Bundle : research article / C. Peña-Monferrer, J. L. Muñoz-Cobo, S. Chiva // Hindawi Publishing Corporation Science and Technology of Nuclear Installations. – 2014. – V. 2.
2. **Chang, S.K.** Turbulent mixing in a rod bundle with vaned spacer grids: OECD/NEA–KAERI CFD benchmark exercise test / S.K. Chang, S. Kim, C.H. Song // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – № 279. – P. 19–36.
3. **Dongil Chang, Stavros Tavoularis** Hybrid simulations of the near field of a split-vane spacer grid in a rod bundle / Department of Mechanical Engineering, University of Ottawa // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2014. – P. 42–54.
4. **Song, K.N.** Performance Evaluation Of New Spacer Grid Shapes For Pwrs / K.N. Song, Soo-Bum Lee, Sang-Hoon Lee // Nuclear Engineering And Technology. – 2007. – V. 39 – № 6. – P. 737–746.
5. **Khan, M. O.** CFD Study of Single Phase Flow in a PWR Spacer Grid // Proceedings of 2013 10th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST). – Islamabad (Pakistan). – 2013. – P. 243–248.
6. **Kazuo, I.** CFD application to advanced design for high efficiency spacer grid // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – P. 10.
7. **Byung, S. S.** Experimental study on the effect of angles and positions of mixing vanes on CHF in a 2×2 rod bundle with working fluid R-134a / S. S. Byung, Soon Heung Chang // Nuclear Engineering and Design. – 2005. – № 235. – P. 1749–1759.
8. **Матюшенко, А. А.** Расчет течения вдоль пучка цилиндров при наличии локальных завихрителей потока / А. А. Матюшенко, А. В. Гарбарук // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических технологиях : XIX школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А. И. Леонтьева. – Орехово-Зуево, 2010. – С. 20–24.
9. **Носков, А. С.** Применение CFD кода для анализа эффективности смесительных дефлекторов решеток ТВС / А. С. Носков, А. А. Фальков, Д. Л. Шипов // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы 8-й Междунар. научно-технич.й конф. – Подольск, 2013.
10. **Добров, А.А.** Применение современных CFD-кодов для моделирования теплогидравлических процессов в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR / А.А. Добров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2016. – № 3. – С. 55–63.

Дата поступления
в редакцию 15.06.2018

S.M. Dmitriev, A.A. Dobrov, M.A. Legchanov

NUMERICAL ANALYSIS OF MIXING GRID EFFICIENCY IN THE CONTROL ROD AREA OF THE TVS-KVADRAT FUEL ASSEMBLY USING ANSYS CFX

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Numerical simulation of coolant flow in the TVS-KVADRAT fuel assembly with mixing grid using ANSYS CFX program.

Design/methodology/approach: Computational domain was the fragment of TVS-KVADRAT fuel assembly with mixing grid and control rod. The main characteristics of the mesh properties applied are maximum size of element (0,5 mm), number of elements (25 million) and number of prism layers (15). As boundary conditions inlet flow velocity, temperature of coolant, pressure in the model, the rate of heat transfer have been used. Reynolds stress turbulence model (BSL-RSM) has been chosen as it considers the anisotropy of turbulence.

Results: Application of vanes has led to distortion of temperature profile, at that, there are areas where temperature has increased compared to the spacer grid without mixing vanes. It probably happens due to the local speed reduction of coolant in these areas.. The maximum value of Nusselt number corresponds to vanes with the maximum angle of bending, however decreasing of the heat transfer efficiency occurs at shorter distance than at all others. Based to data obtained vanes with construction which allows to minimize both the average temperature and the fuel rod perimeter temperature unevenness have been chosen.

Key words: reactor core, nuclear reactor, fuel assembly, coolant hydrodynamics, spacing grid, mixing grid, computational fluid dynamics.