

УДК 621.039

А.А. Добров, К.А. Мартынова, Ю.А. Фадеева, А.Е. Хробостов

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ CFD-КОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты моделирования теплогидравлических процессов потока в ТВС реактора типа PWR за перемешивающими дистанционирующими решётками, снабжёнными различными дефлекторами. Исследования данных процессов проводились в программном комплексе Ansys CFX. Анализ результатов исследования течения теплоносителя в пучках твэлов ТВС-КВАДРАТ позволяет выявить ряд особенностей, важных для оценки эффективности перемешивающих решёток. Полученные результаты используются для уточнения теплогидравлических характеристик потока теплоносителя при обосновании теплотехнической надёжности активных зон реакторов PWR.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, теплогидродинамика теплоносителя, перемешивающая дистанционирующая решётка.

Изучение структуры турбулентного потока и особенностей перемешивания теплоносителя в ТВС ядерных реакторов – важная и актуальная исследовательская задача. Необходимость в проведении данных исследований вызвана тем, что использование дистанционирующих и перемешивающих решёток (ДР и ПР) в ТВС приводит к созданию локальных возмущений потока, а это следует учитывать при обосновании теплогидравлики активной зоны реакторной установки. Важную роль в обосновании работоспособности активной зоны играет конструкция самой ТВС в целом и перемешивающих и дистанционирующих решёток в частности. Необходимо учитывать конструкцию решеток, приводящих к отклонению направлений составляющих скорости теплоносителя, изменению их турбулентных характеристик, а также локальных процессов переноса импульса и тепла. Все эти эффекты могут в значительной мере влиять как на величину критического теплового потока, а следовательно, на условия выбора мощности реакторной установки, так и на гидравлическое сопротивление ТВС.

Одним из эффективных инструментов, способных помочь конструкторам оптимизировать форму перемешивающих решеток ТВС еще до изготовления и тем самым сократить объем экспериментальных исследований, является вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics – CFD). Поэтому мировой опыт конструкторских организаций, связанных с разработкой ядерного топлива, показывает, что целесообразно использовать CFD-программы. В последнее десятилетие проведено значительное количество расчетов, посвященных изучению течения теплоносителя в ТВС с перемешивающими решетками. Связано это с доступностью проведения вычислений локальных характеристик теплоносителя в связи со стремительным ростом производительности компьютерной техники и повышением уровня ее доступности.

В то же время анализ статей, посвященных численному моделированию течения теплоносителя в ТВС, показал различный подход авторов к выбору критериев для оптимизации конструкции перемешивающих решеток.

Авторы данной работы попытались представить краткий обзор критериев, количественно оценивающих эффективность перемешивающих решеток, а также привели результаты моделирования течения потока теплоносителя во фрагменте тепловыделяющей сборки

реактора PWR с дистанционирующими и перемешивающими решетками. Получены численные значения критериев, характеризующих эффективность перемешивания для решеток с дефлекторами различной формы, и определена оптимальная конструкция ПР ТВС-КВАДРАТ.

Постановка цели и задач, решаемых при выполнении исследования

Постановка задач исследования:

- обзор научной литературы, посвящённой CFD моделированию гидродинамики и теплообмена теплоносителя в ТВС ядерных реакторов;
- численное моделирование течения теплоносителя в ТВС с перемешивающими решётками;
- оценка эффективности решёток различной конструкции на основе полученных данных.

Основными критериями эффективности дистанционирующих и перемешивающих решеток являются критическая тепловая мощность и запас до кризиса теплоотдачи, однако современный уровень трехмерного математического моделирования не позволяет напрямую определить эти величины. Большинство исследователей используют критерии, которые можно определить для однофазного потока теплоносителя:

- коэффициент местного гидравлического сопротивления решетки;
- коэффициент межъячеечного перемешивания;
- критерии вихревого воздействия дефлекторов;
- относительный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта);
- температура на поверхности твэла;
- температура теплоносителя по сечению ТВС;
- пульсации давления на стенке твэла, возникающие за перемешивающей решеткой;
- длина затухания гидродинамических возмущений.

В данной работе (как наиболее важные с точки зрения теплогидравлики) были выбраны следующие критерии:

1. *Относительный коэффициент гидравлического сопротивления* (ξ/ξ_0) – критерий, характеризующий изменение гидравлического сопротивления дистанционирующей решетки за счет установки на нее дефлекторов, где ξ – относительный коэффициент гидравлического сопротивления решётки с соответствующим типом дефлекторов (ПР); ξ_0 – относительный коэффициент гидравлического сопротивления решётки без дефлекторов (ДР);

2. *Относительное число Нуссельта* (Nu/Nu_0) – критерий, характеризующий изменение интенсивности теплоотдачи в ТВС, где Nu – относительное число Нуссельта решётки с соответствующим типом дефлекторов; Nu_0 – относительное число Нуссельта решётки без дефлекторов;

3. *Распределение температуры на поверхности твэла* – критерий, характеризующий неравномерность температуры стенки твэла.

Описание конструкции объекта и расчётной модели исследования

На рис. 1 приведен общий вид конструкции перемешивающей решётки с рассматриваемыми дефлекторами.

Для выявления оптимальной конструкции ПР ТВС-Квадрат целесообразно провести исследование формы дефлекторов, изменяя при этом следующие геометрические параметры (рис. 2):

- а) угол отгиба (α);
- б) высоту (H);
- в) угол наклона линии сгиба (β).

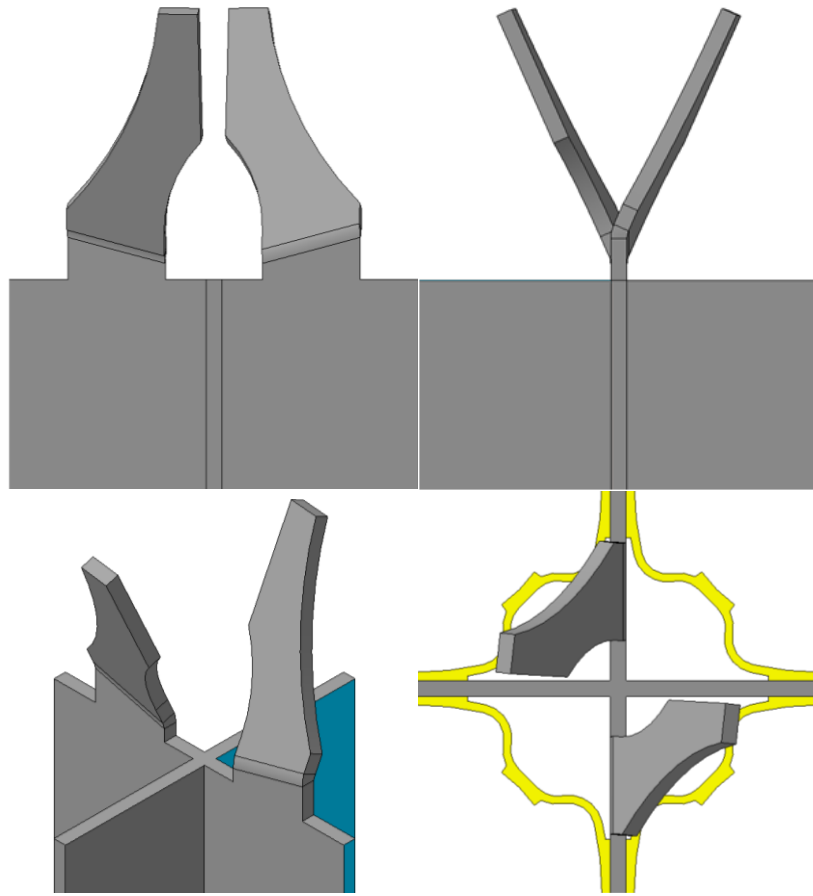


Рис. 1. Общий вид дефлекторов

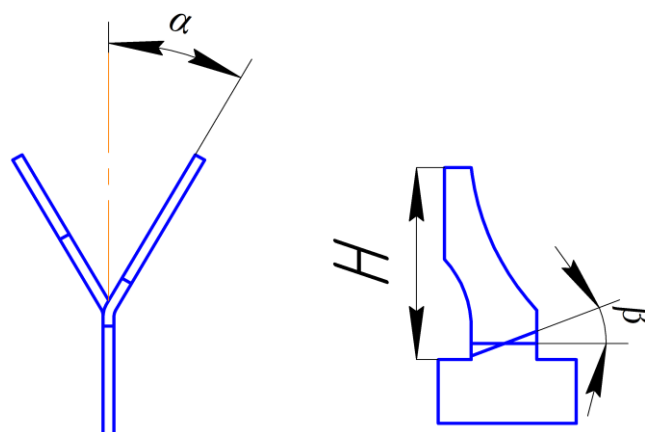


Рис. 2. Варьируемые геометрические параметры

На рис. 3 представлена расчётная модель фрагмента ТВС перемешивающей решетки. В поперечном сечении данная модель представляет собой расчетную область, образованную четырьмя гидравлическими ячейками ТВС. В длину она соответствует одному пролету меж-

ду дистанционирующими решетками. На рис. 3 и рис. 4 показан общий вид расчётной сетки и её конфигурация в поперечном сечении канала.

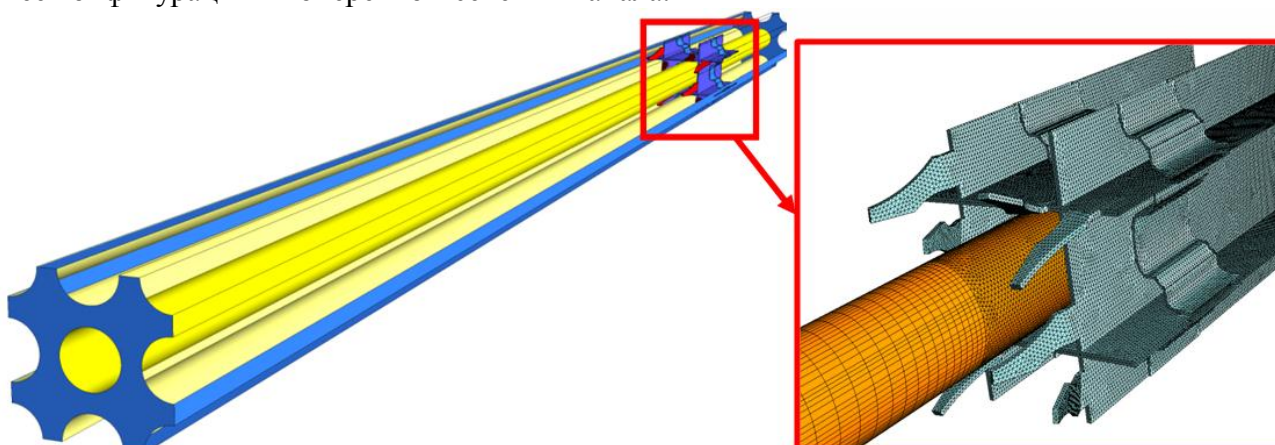


Рис. 3. Расчетная модель фрагмента ТВС и общий вид расчётной сетки

В табл. 1 указаны основные характеристики расчётной сетки, которые были применены при выполнении данного исследования.

Таблица 1
Характеристики расчётной сетки

| | |
|---------------------------------------------------|-----|
| Максимальный размер элемента, мм | 0,4 |
| Число элементов, млн. | 8 |
| Число призматических слоев | 20 |
| Значение безразмерного расстояния от стенки y^+ | 1÷3 |

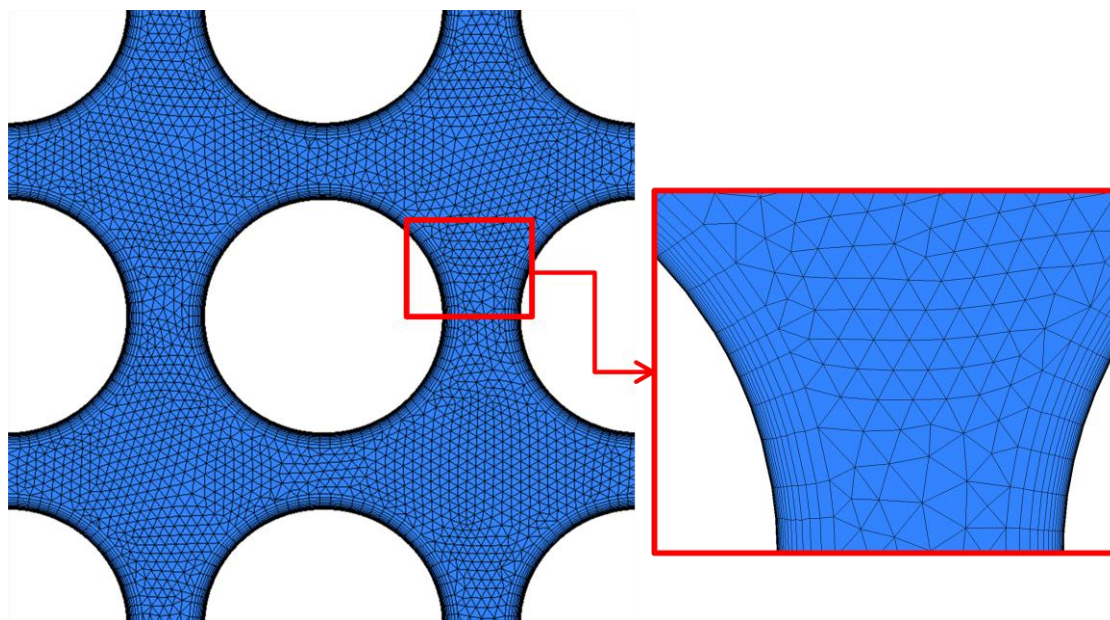


Рис. 4. Вид расчётной сетки в поперечном сечении

Рассмотрим методику проведения CFD-моделирования. В качестве граничных условий задавались:

- 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;
- давление в модели 15,7 МПа;
- тепловой поток на поверхности твэлов 657000 Вт/м²;
- свойства теплоносителя, соответствующие заданным температуре и давлению.

В расчётах в качестве модели турбулентности использовалась модель реynoльдсовых напряжений BSL-RSM, так как она позволяет учесть анизотропию турбулентности. Кроме того, согласно схеме на рис. 5, задавались периодические граничные условия. Это позволило смоделировать бесконечно большой в поперечном сечении пучок твэлов. Для получения значений расчетных теплогидравлических характеристик использовались компоненты программного комплекса Ansys CFX.

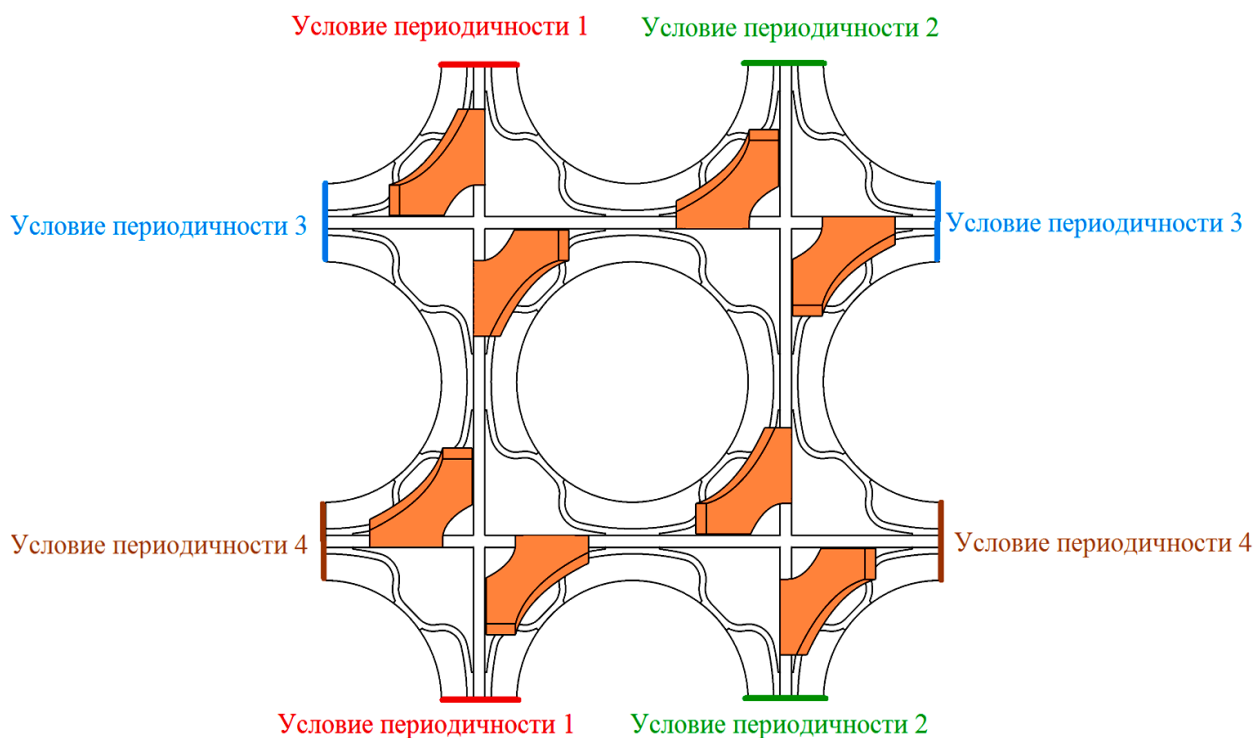


Рис. 5. Схема расположения условий периодичности

Результаты исследований

В результате исследований были получены данные о влиянии изменений варьируемых геометрических параметров на все критерии, выбранные для теплогидравлической оценки различных конструкций решеток.

Значения относительного коэффициента гидравлического сопротивления ПР с рассмотренными типами дефлекторов приведены в табл. 2, на рис. 6 продемонстрированы зависимости КГС от каждого из изменяемых параметров.

Таблица 2

Значения относительного КГС для различных конструкций дефлекторов

| Тип дефлектора | ξ/ξ_0 |
|---------------------------|-------------|
| H9 α 25 β 0 | 1,382 |
| H9 α 20 β 0 | 1,332 |
| H9 α 30 β 0 | 1,458 |
| H10 α 25 β 0 | 1,388 |
| H8 α 25 β 0 | 1,382 |

| | |
|----------------------------|-------|
| H9 α 25 β 15 | 1,365 |
| H9 α 25 β -15 | 1,352 |

Согласно представленным графикам, наибольшее увеличение сопротивления соответствует решетке с дефлекторами, имеющими угол отгиба 30 град., наименьшее – угол отгиба 20 град. При высотах дефлекторов 8, 9 и 10 мм КГС ПР отличается незначительно. При изменении угла наклона линиигиба от нуля происходит уменьшение сопротивления.

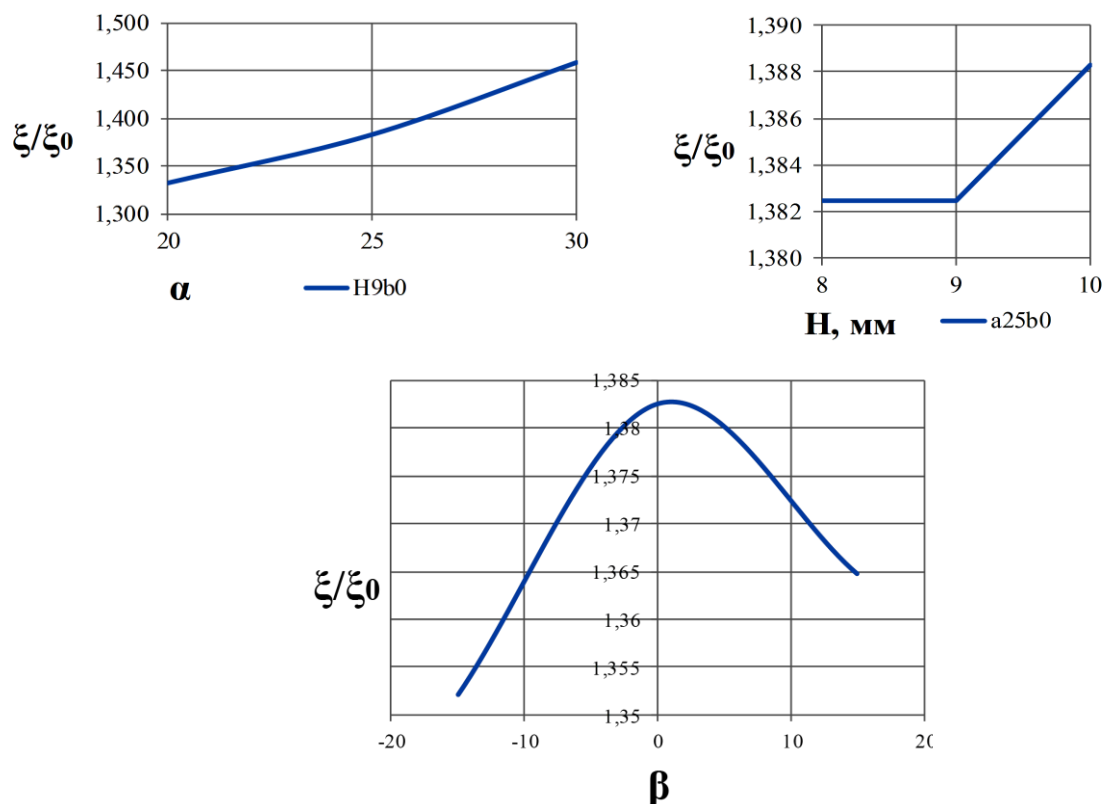


Рис. 6. Графики изменения относительного КГС от варьируемых параметров

На рис. 7 показан график изменения относительного числа Нуссельта по высоте ТВС за ПР, значения данного критерия для решеток с различными типами дефлекторов приведены в табл. 3. В качестве базового уровня принято число Нуссельта для ДР без дефлекторов.

Таблица 3

Значения относительного числа Нуссельта для различных конструкций дефлекторов

| Тип дефлектора | Nu/Nu_0 |
|----------------------------|-----------|
| H9 α 25 β 0 | 1,178 |
| H9 α 20 β 0 | 1,109 |
| H9 α 30 β 0 | 1,170 |
| H10 α 25 β 0 | 1,167 |
| H8 α 25 β 0 | 1,169 |
| H9 α 25 β 15 | 1,145 |
| H9 α 25 β -15 | 1,119 |

Для всех рассмотренных конструкций дефлекторов наблюдается рост интенсивности теплоотдачи сразу за перемешивающим устройством, причем максимум приходится на расстояние от 3 до 5 гидравлических диаметров, после чего начинается снижение эффективности теплоотдачи.

Наибольшее значение данного критерия соответствует решетке с дефлекторами, имеющими угол отгиба 30 град., однако снижение интенсивности теплоотдачи происходит на меньшем расстоянии, чем для других типов. По данному критерию наиболее оптимальными являются дефлекторы высотой 8 и 9 мм и углом отгиба 25 град.

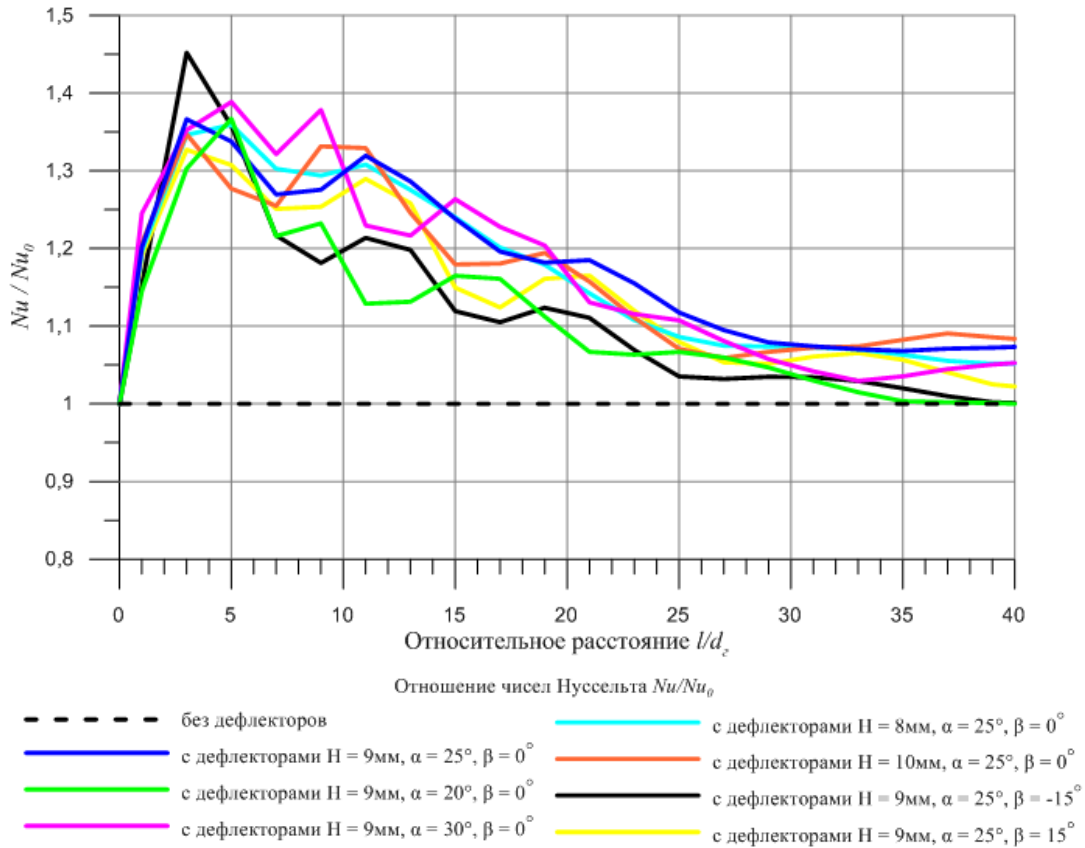


Рис. 7. График относительного числа Нуссельта по высоте ТВС за решёткой

На рис. 8 представлено распределение температуры по периметру твэла в середине пролета между ПР (на расстоянии 20 гидравлических диаметров за решеткой), на котором температура для случая ДР без дефлекторов обозначена штриховой линией.

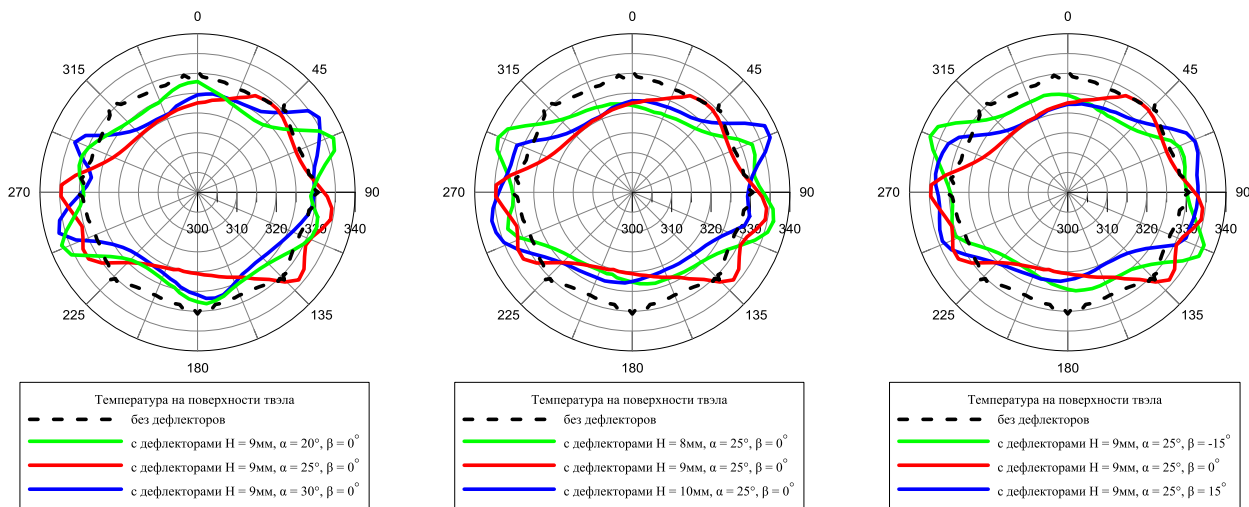


Рис. 8. Распределение температуры по периметру твэла в сечении $l/d_г=20$

Графики зависимостей наглядно демонстрируют, что дефлекторы приводят к искажению профиля температуры, при этом часть периметра твэла становится менее нагретой относительно решетки без дефлекторов, но в то же время существуют области, где температура становится выше, что, вероятнее всего, связано с локальным уменьшением скорости теплоносителя в этих областях. Необходимо отметить, что средняя температура твэла уменьшается по сравнению с решеткой без дефлекторов.

Наилучшими с точки зрения этого критерия из рассмотренных являются дефлекторы высотой 8 и 9 мм и углом отгиба 25 градусов. В этих случаях как средняя температура, так и неравномерность температуры по периметру твэла минимальны.

Заключение

Комплексный анализ приведённых расчётных исследований позволил сделать следующие выводы:

1. Наибольшее увеличение гидравлического сопротивления соответствует ПР с дефлекторами углом отгиба 30 град., наименьшее – 20 град. Изменение высоты дефлекторов оказывает незначительное влияние на КГС решеток. При изменении угла наклона линии сгиба от нуля происходит уменьшение сопротивления.

2. Для всех рассмотренных типов дефлекторов максимум интенсивности теплоотдачи приходится на расстояние от 3 до 5 гидравлических диаметров, после чего начинается ее уменьшение. Наибольшее значение критерия Nu/Nu_0 соответствует конструкциям решеток с дефлекторами углом отгиба 30 град., однако снижение эффективности теплоотдачи в таком случае происходит на меньшем расстоянии, чем у остальных типов ПР. По данному критерию наиболее оптимальными являются дефлекторы высотой 8 и 9 мм и углом отгиба 25 град.

3. Дефлекторы приводят к искажению профиля температуры, при этом часть периметра твэла становится менее нагретой относительно решетки без дефлекторов, однако существуют области, где температура становится выше, что, вероятнее всего, связано с локальным уменьшением скорости теплоносителя. Наилучшими с точки зрения этого критерия из рассмотренных являются дефлекторы высотой 8 и 9 мм и углом отгиба 25 град. В этих случаях как средняя температура, так и неравномерность температуры по периметру твэла минимальны.

4. По совокупности всех рассматриваемых критериев наиболее оптимальными с точки зрения теплогидравлики являются дефлекторы высотой 8 и 9 мм, имеющие угол отгиба 25 град. и нулевой угол наклона линии сгиба.

В проведенной работе была рассмотрена возможность применения программы вычислительной гидродинамики для оценки теплогидравлической эффективности перемешивающих решеток ТВС, предложены критерии для такой оценки и получены их численные значения для дефлекторов различной конструкции. Таким образом, вычислительная гидродинамика является эффективным инструментом, способным помочь конструкторам оптимизировать форму перемешивающих решеток еще до изготовления и тем самым сократить объем экспериментальных исследований.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 03 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Библиографический список

1. **Арсенов, П.В.** Исследования закономерностей течения теплоносителя за перемешивающей решеткой с различными типами дефлекторов в области направляющего канала ТВС-Квадрат / П.В. Арсенов [и др.] // Труды НГТУ. – 2015. – №4(111). – С. 126–135

2. **Варенцов, А.В.** Особенности течения теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов / А.В. Варенцов [и др.] // Труды НГТУ. – 2015. – №3(110). – С. 134–143.
3. **Дмитриев, С.М.** Исследование массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВБЭР-300 с целью обоснования их эффективности / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ – 2013. – №5(102). – С. 197–205
4. **Любимов, А.К.** Методы построения расчетных сеток в пакете ANSYS ICEM CFD: электрон. метод. пособие / А.К. Любимов, Л.В. Шабарова. – Н. Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2011. – 25 с.
5. **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 акад. А. И. Леонтьева, г. Орехово-Зуево, Московская область, 20-24 мая 2013. – СПб.: СПб. гос. политех. ун-т, 2013.
6. **Носков, А.С.** Применение CFD кода для анализа эффективности смесительных дефлекторов решеток ТВС / А.С. Носков, А.А. Фальков, Д.Л. Шипов. – Нижний Новгород, 2013. – 18 с.
7. **Самойлов, А.Б.** Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик ТВСА с перемешивающими решетками / А. Б. Самойлов [и др.] // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – Вып. 1.
8. **Agbodemegbe, V.Y.** Correlation for cross-flow resistance coefficient using STAR-CCM+ simulation data for flow of water through rod bundle supported by spacer grid with split-type mixing vane / V.Y. Agbodemegbe // Nuclear Engineering and Design. – 2015. – № 285. – С. 134–149.

*Дата поступления
в редакцию 22.06.2016*

A. A. Dobrov, K. A. Martynova, Y. A. Fadeeva, A. E. Khrobostov

APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS WITH THE PURPOSE OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF MIXING GRIDS IN FUEL ASSEMBLIES

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

Purpose: Numerical simulation of coolant flow in FA with mixing grids and estimation of the various design grids effectiveness based on the obtained data have been carried out in the present study.

Design/methodology/approach: The main characteristics of the mesh properties applied are maximum size of element (0.4 mm), number of elements (8 million) and number of prism layers (20). 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 flow resistance coefficient decreases with changing of zero angle of the bending line. 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: nuclear reactor, fuel assembly, coolant heat hydrodynamics, spacing grid.