

УДК 621.039

С.М. Дмитриев¹, А.А. Добров¹, Г.Ш. Иксанова², К.А. Мартынова¹, А.Е. Хробостов¹**РАСЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ВО ВХОДНОМ УЧАСТКЕ ТВС РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ РИТМ-200**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
АО «ОКБМ Африкантов» (г. Нижний Новгород)²

Приведены результаты численного моделирования гидродинамических процессов, протекающих во входном участке модели ТВС реактора РИТМ-200. Получены значения относительных осевых скоростей в нескольких сечениях на входе в пучок твэлов, а также величина коэффициента гидравлического сопротивления всего входного участка модели ТВС.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, хвостовик ТВС, гидродинамика теплоносителя.

Введение

Особенностью установки РИТМ-200, разработанной в АО «ОКБМ Африкантов» для универсального атомного ледокола, является инновационная активная зона кассетного типа. Кассетная ТВС отличается от ТВС канальных ледокольных активных зон и ТВС ВВЭР конструкцией и структурой. ТВС заключены в шестигранные чехлы, внутри которых размещены центральный вытеснитель с поглощающим стержнем СУЗ, пучок твэлов и стержни с выгорающим поглотителем [1-2].

Конструктивные особенности ТВС кассетной активной зоны обусловили необходимость определения отдельных важных гидродинамических характеристик, в частности, коэффициентов гидравлического сопротивления элементов кассеты и исследование влияния конструкции входного участка на распределение расхода теплоносителя на входе в пучок твэлов.

В НГТУ на аэродинамическом стенде ФТ-50 [3] были проведены подобные исследования на увеличенной модели входного участка ТВС. Однако в связи с внедрением программ вычислительной гидродинамики (CFD) в практику теплогидравлических расчетов активных зон ядерных реакторов [4-7] авторами данной работы была предпринята попытка проведения численного моделирования процессов локальной гидродинамики потока теплоносителя во фрагменте тепловыделяющей сборки реактора РИТМ-200 с использованием CFD-программы Ansys CFX. Результаты расчетов сравнивались с данными, полученными в процессе экспериментального исследования, с целью оценки применимости выбранной модели и использованных настроек программы к проведению подобных исследований.

Описание расчётной модели входного участка ТВС

Расчётная модель кассетной ТВС, построенная в том же масштабе, что и экспериментальная модель, включала входной участок и фрагмент активной части ТВС до первой дистанционирующей решётки. При этом в силу условий симметрии рассматривалась половина указанной конструкции, полученная рассечением её плоскостью вдоль центральной оси.

В состав входного участка модели входили: цилиндрический хвостовик, дроссельная шайба, устройство фиксации ТВС в нижней плите реактора и диффузор, служащий элементом перехода из круглого сечения хвостовика в шестигранное сечение пучка твэлов.

Для проведения расчётного исследования была сгенерирована автоматическая расчётная сетка. При этом в области входного участка была использована тетраэдральная сетка с

призматическими пристеночными элементами, которая затем вытягивалась вдоль фрагмента активной части тепловыделяющей сборки. Размер сеточных элементов для отдельных областей модели был различным и выбирался из условий равенства его 1/20 гидравлического диаметра конкретной области (сечения) со сгущением сетки для описания более мелких деталей геометрии. В пристенной области высота призм подбиралась из условия равенства безразмерного расстояния от стенки $y^+ 1 \div 5$. Сетка такого качества соответствует требованиям RANS-моделей турбулентности и моделей рейнольдсовых напряжений, вычисляющих значение переменных в пограничном слое. На рис. 1 представлен общий вид расчетной сетки, содержащий ~22 млн сеточных элементов.

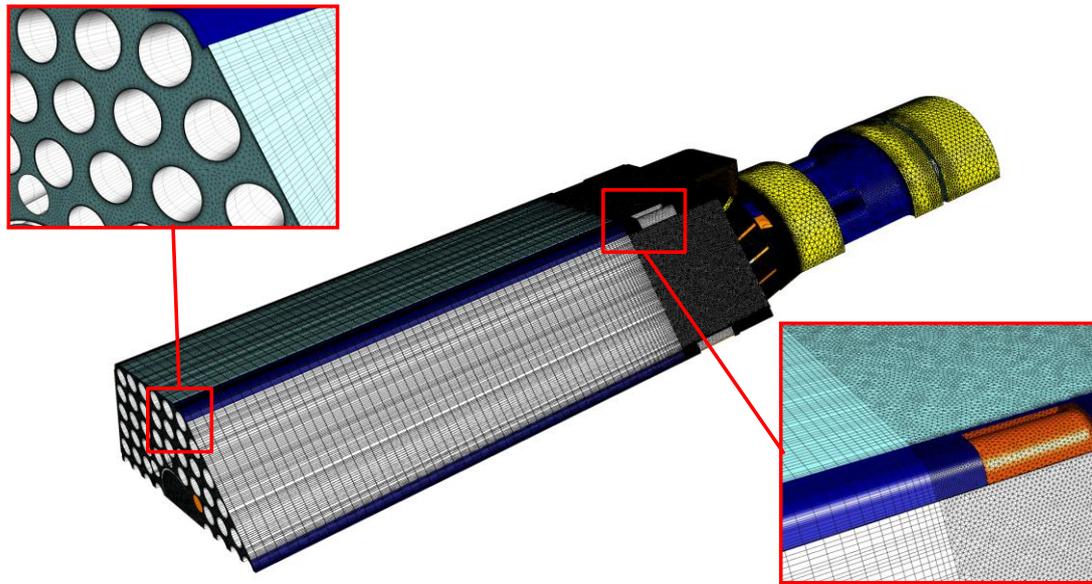


Рис. 1. Расчётная сеточная модель

Методика проведения расчётного исследования

Методика проведения численного моделирования гидродинамических процессов во входном участке ТВС реактора РИТМ-200 была разработана при условии соответствия параметров расчёта параметрам эксперимента, а именно:

- 1) среднерасходная скорость рабочей среды (воздуха) на входе соответствует числу Рейнольдса 61000, определенного по сечению активной части;
- 2) температура 25 °С (нагрев имитаторов твэлов отсутствовал);
- 3) абсолютное давление на выходе из модели 101,325 кПа;
- 4) свойства рабочей среды, соответствующие заданным температуре и давлению.

Для замыкания системы уравнений Навье-Стокса в качестве моделей турбулентности были выбраны: модель переноса касательных напряжений ($k-\omega$ SST), автоматически переключающая способ построения пристеночной функции в зависимости от величины параметра y^+ ; модель рейнольдсовых напряжений (BSL-RSM), позволяющая учесть анизотропию турбулентности, которая может быть обусловлена сложной конструкцией входного участка модели ТВС.

Величина коэффициента гидравлического сопротивления (КГС) рассматриваемого участка, отнесенная к сечению активной части, определялась следующим образом:

$$\xi_{\text{вх.уч}} = \frac{2\Delta P_{\text{вх.уч}}^{\text{tot}}}{\rho w_{\text{ач}}^2}, \quad (1)$$

где $\xi_{\text{вх.уч}}$ – КГС входного участка; $\Delta P_{\text{вх.уч}}^{\text{tot}}$ – потери полного давления при прохождении входного участка ТВС, Па; $w_{\text{ач}}$ – среднерасходная скорость, определенная в сечении пучка твэл, м/с; ρ – плотность рабочей среды, кг/м³.

$$\Delta p_{\text{вх.уч}}^{\text{tot}} = \left(P_1 + \frac{\rho w_{\text{вх}}^2}{2} \right) - \left(P_2 + \frac{\rho w_{\text{вч}}^2}{2} \right), \quad (2)$$

где P_1 – статическое давление, определенное во входном сечении 1 (рис. 2) расчётной модели, Па; P_2 – статическое давление, определенное в сечении 2, расположенном на входе в активную часть ТВС, Па; $w_{\text{вх}}$ – среднерасходная скорость, определенная во входном сечении 1, м/с;

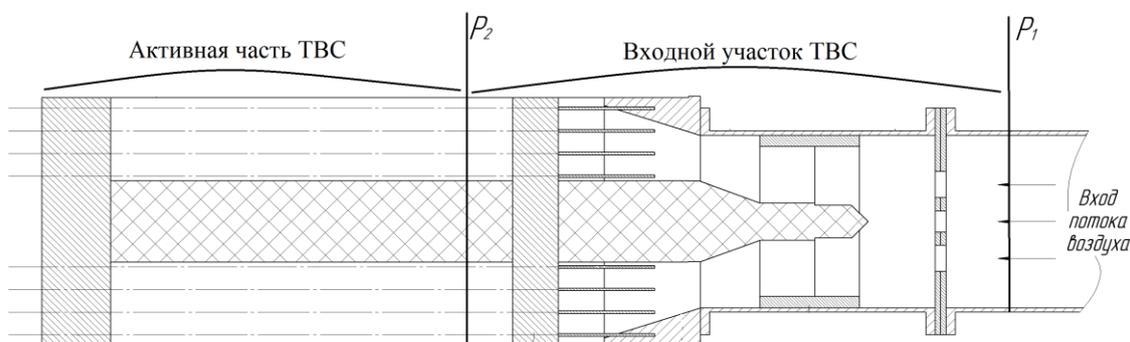


Рис. 2. Схема расположения сечений измерения статического давления по длине расчётной модели

Результаты исследований

В результате численных исследований было смоделировано течение потока теплоносителя во входном участке ТВС РИТМ-200 и получены данные о распределении аксиальной скорости в различных сечениях твэльного пучка, а также вычислен коэффициент гидравлического сопротивления входного участка.

Для учёта неравномерности распределения профиля скорости теплоносителя по поперечному сечению, а также возможности переноса полученных результатов на натурные условия работы штатной ТВС полученные данные целесообразно представить в виде относительных значений скорости, определяемых как отношение абсолютного значения осевой составляющей скорости в точке $w_{\text{абс}}$ к среднерасходной скорости в данном сечении $w_{\text{вч}}$:

$$w_{\text{отн}} = \frac{w_{\text{абс}}}{w_{\text{вч}}}. \quad (3)$$

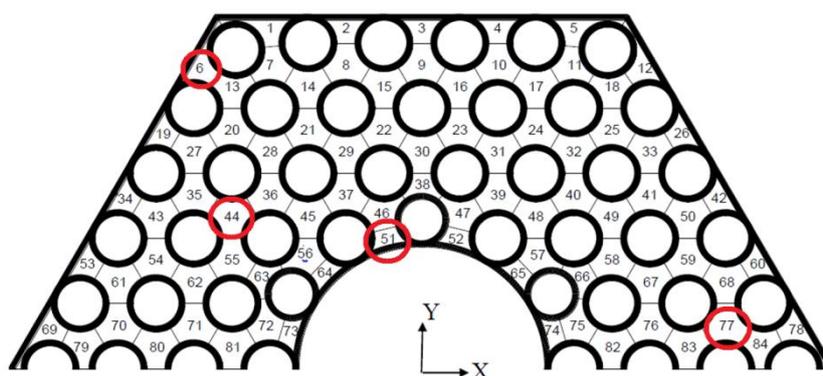
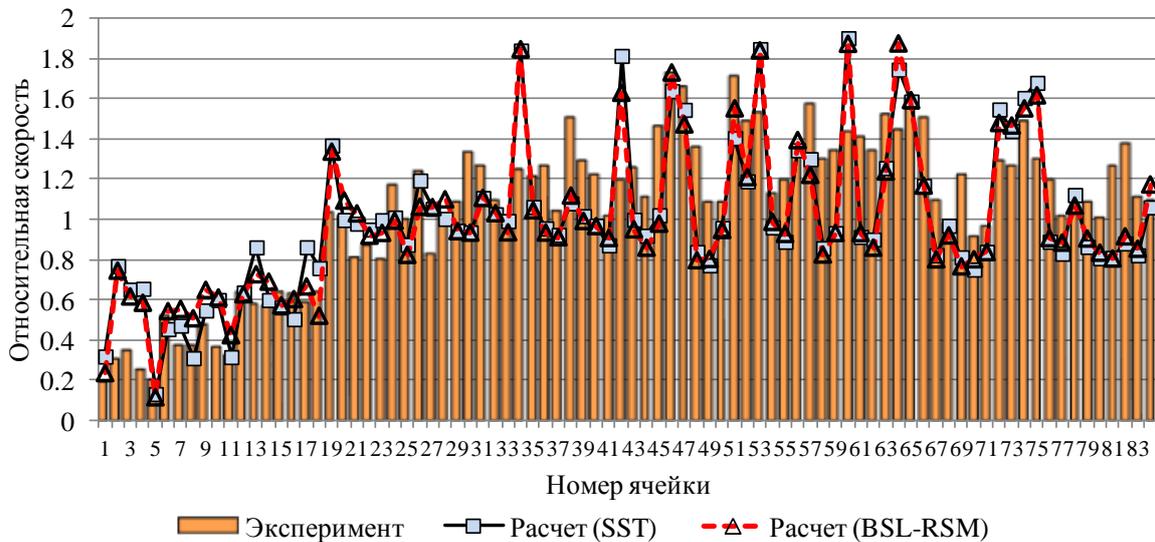


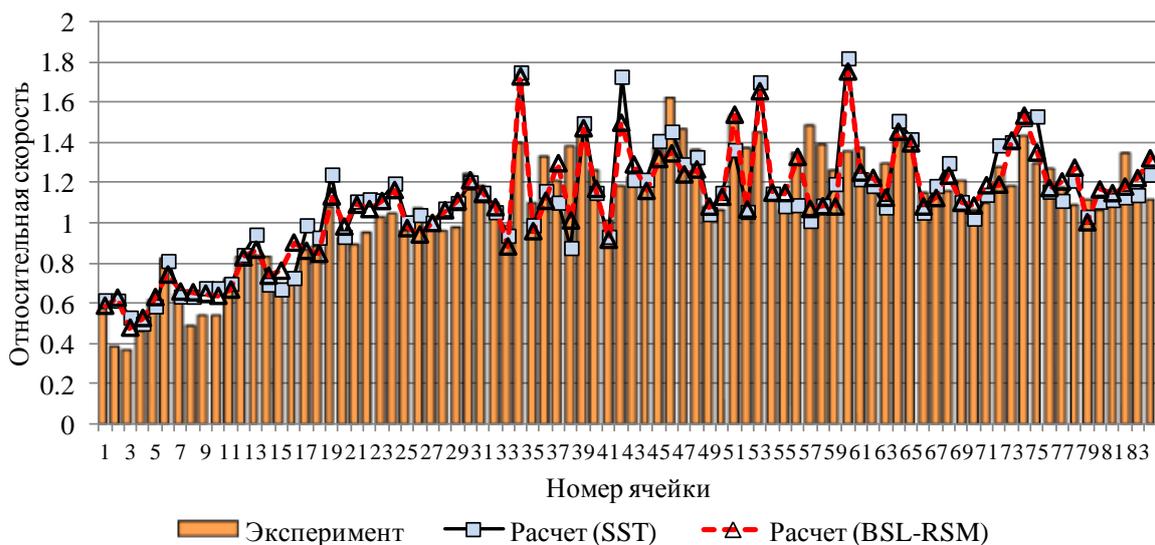
Рис. 3. Схема разбиения поперечного сечения расчётной модели на ячейки:
О - ячейки, выбранные для исследования изменения аксиальной скорости по высоте ТВС

Количественное сравнение расчетных значений относительной скорости проводилось для точек, расположенных в центрах условных ячеек поперечного сечения активной части ТВС. Схема разбиения сечения на ячейки представлена на рис. 3. Результаты расчета по обеим моделям турбулентности приведены на рис. 4. На рис. 4 даны значения относительной скорости в центрах ячеек ТВС, полученные в результате численного моделирования и в результате экспе-

риментального исследования для нескольких поперечных сечений активной части ТВС. На схеме отмечены ячейки, для которых на рис. 5 приведены графики распределения относительной скорости по длине твэльного пучка до первой дистанционирующей решетки.



а)



б)

Рис. 4. Распределение относительной аксиальной скорости:

а – сечение, расположенное на входе в твэльный пучок;

б – сечение, расположенное перед первой дистанционирующей решеткой

Комплексный анализ полученных результатов расчетного исследования продольной составляющей вектора скорости по длине пучка имитаторов твэлов модели ТВС позволил определить основные закономерности течения потока теплоносителя. На входе в твэльный пучок поле осевой скорости теплоносителя неоднородно, что обусловлено сложной геометрией проточной части входного участка ТВС. Максимальные расчетные значения относительной скорости в отдельных ячейках достигают величины 1,8. В эксперименте таких значений не наблюдалось, и максимум относительной скорости составлял 1,55. Следует отметить, что основное расхождение расчета с экспериментом приходится на ячейки, расположенные по периферии сечения ТВС вблизи шестигранного чехла. Такое отличие может быть обусловлено значительным влиянием близко расположенной стенки на показания измерительного зонда в эксперименте, что будет учтено в дальнейших исследованиях.

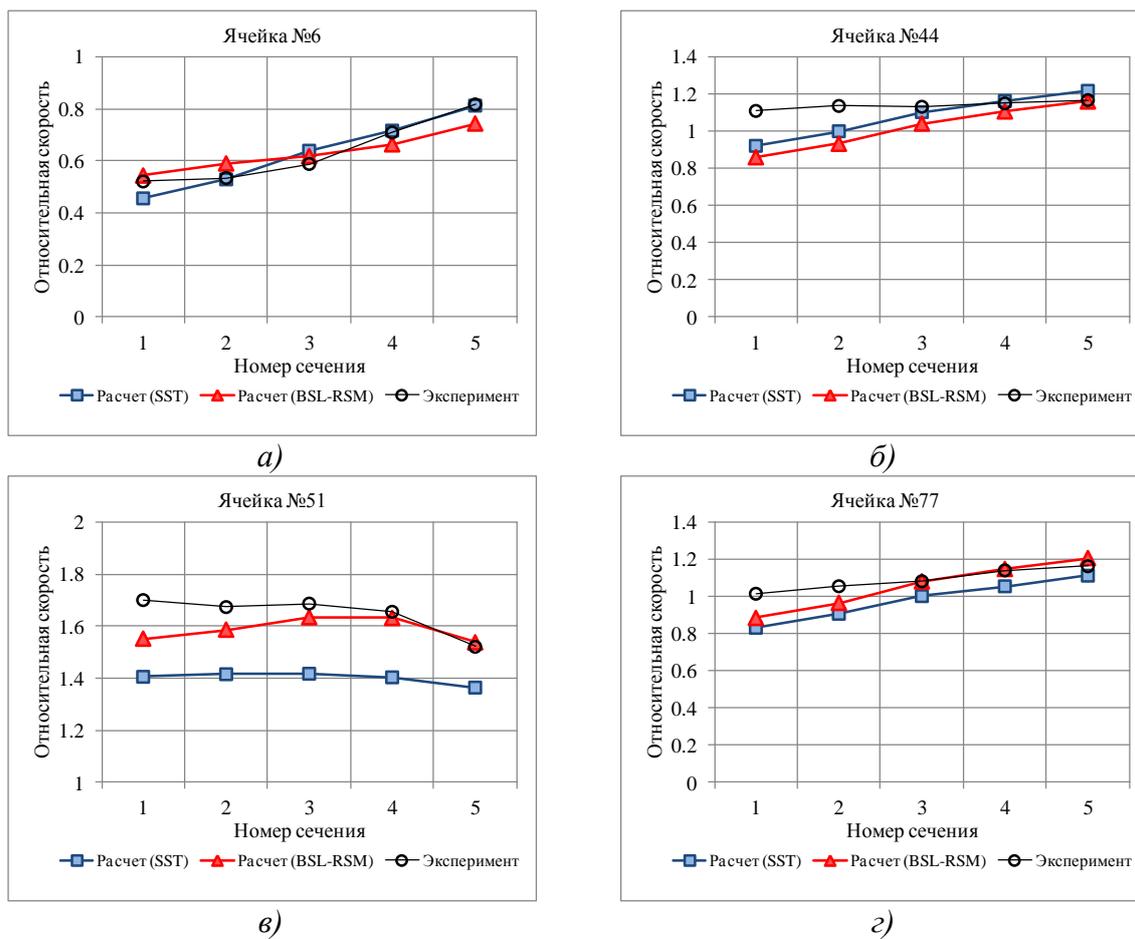


Рис. 5. Графики изменения относительной аксиальной скорости по высоте фрагмента ТВС: а – ячейка № 6; б – ячейка № 44; в – ячейка № 51; з – ячейка № 77

Анализ влияния выбранной модели турбулентности на результаты расчета показал, что с качественной и количественной точки зрения модель рейнольдсовых напряжений BSL-RSM имеет незначительное преимущество перед SST моделью, однако требует больших вычислительных затрат и имеет худшую сходимость.

Результаты определения КГС модели входного участка с использованием CFD-программы сведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения КГС модели входного участка ТВС

| Параметры | SST-модель | BSL-RSM | Эксперимент |
|-----------------------------|------------|---------|-----------------------------------|
| Значение КГС | 11,75 | 11,63 | 11,9 |
| Расхождение с экспериментом | -1,26% | -2,27% | ±4% (погрешность эксперимента) |

Заключение

Проведено численное моделирование процесса течения теплоносителя во входном участке ТВС РИТМ-200, исследовано поле аксиальной скорости на входе в твэльный пучок до первой дистанционирующей решетки, а также определён коэффициент гидравлического сопротивления рассматриваемой области. Полученные данные сравнивались с результатами экспериментального исследования. Среднеквадратичное отклонение относительной скорости от эксперимента, определенное по всем 84 ячейкам выходного сечения модели, составило 15,9% для SST-модели турбулентности и 14,6% для BSL-RSM модели. Основное расхождение расчета с экспериментом приходится на ячейки, расположенные по периферии сечения ТВС вблизи шестигранного чехла.

Расхождение расчетных и экспериментальных значений общего КГС входного участка составило не более 2,3% для обеих моделей турбулентности, что меньше экспериментальной погрешности измерений.

Результаты компьютерного моделирования, проведенного в данной работе, могут быть использованы для формирования входных граничных условий для программ поячейкового расчета активной зоны реактора РИТМ-200 с целью учета неравномерности расхода теплоносителя по ячейкам на входе в твэльный пучок, обусловленного конструкцией входного участка ТВС.

Библиографический список

1. **Вешняков, К.Б.** Проектные решения реакторной установки РИТМ-200, предназначенной обеспечить экологически безопасную и экономически эффективную эксплуатацию универсального атомного ледокола на арктических трассах / К. Б. Вешняков [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2014. – №3(15). – С. 86–91.
2. **Самойлов, О.Б.** Исследование распределения потоков тепловых и эпитепловых нейтронов в ТВС универсального атомного ледокола / О.Б. Самойлов [и др.] // Атомная энергия. – 2016. Т.121. – №6. – С. 307–313.
3. **Бородин, С.С.** Расчетно-экспериментальные исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике – 2015. – № 4. – С. 177–182.
4. **Добров, А.А.** Применение современных CFD-кодов для моделирования теплогидравлических процессов в ТВ-КВАДРАТ реактора PWR / А.А. Добров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016.– № 3. – С. 55–63.
5. **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: сб. трудов, 2013. – 253 с.
6. **Дмитриев, С.М.** Моделирование течения потока теплоносителя в топливной сборке реактора плавучей АЭС с использованием CFD-программы ЛОГОС / С.М. Дмитриев [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 5. – С. 1253–1259.
7. **Дмитриев, С.М.** Применение программы ЛОГОС для исследования особенностей гидродинамики в тепловыделяющей сборке реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев [и др.] // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 57. – № 3.2. – С. 232–236.

*Дата поступления
в редакцию 02.02.2017*

S.M. Dmitriev¹, A.A. Dobrov¹, G.Sh. Iksanova², K.A. Martynova¹, A.E. Khrobostov¹

NUMERICAL STUDY OF COOLANT HYDRODYNAMICS IN INLET NOZZLE OF RITM-200 NUCLEAR REACTOR FUEL ASSEMBLY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev¹,
JSC «Afrikantov OKBM»²

Purpose: Numerical simulation of coolant flow in inlet nozzle of RITM-200 fuel assembly using CFD-program Ansys CFX.

Design/methodology/approach: Computational domain is a fragment of RITM-200 fuel assembly, which consists of inlet nozzle, hexagonal case and fuel rods simulators.

Results: As a result, the distribution of axial velocity of coolant behind inlet nozzle was received. Pressure drop and hydraulic resistance coefficient were calculated. These data were compared with the experimental results.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, inlet nozzle, coolant hydrodynamics.