

УДК 621.039.51

Численное моделирование течения теплоносителя в подводящем тракте водо-водяного реактора

Зенин В.В., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ядерные реакторы и установки»*

*Научные руководители: Марков П.В., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ядерные реакторы и установки»*

en7@power.bmstu.ru

Реакторы с водой под давлением в настоящее время являются основой развития инновационных ядерных систем IV поколения. Основным требованием к таким системам принято требование повышенного уровня безопасности, что предполагает ужесточение норм и правил при обосновании надежности реакторной установки. Для расчетного обоснования безопасности реакторных установок в основном используются расчетные коды, в которых теплогидравлические процессы описываются в одномерном приближении. Данные программы не могут в полной мере моделировать процессы, имеющие место при движении теплоносителя в реакторе, вследствие их трехмерного характера. Одним из возможных подходов к обоснованию безопасности ядерных систем является использование методов вычислительной гидродинамики для анализа процессов течения и тепломассообмена в трактах охлаждения оборудования реакторных установок.

Рассматривается течение в опускном тракте и напорном коллекторе водо-водяного ядерного реактора малой мощности. Такие реакторы могут быть использованы в составе наземных или плавучих АС малой и средней мощности, обеспечивающих энергоснабжение населенных пунктов в труднодоступных районах страны.

Расчетная область (рис.1) состоит из 4х цилиндрических патрубков подвода теплоносителя (1), расположенных радиально к оси реактора на угловых координатах 30, 150, 210, 330 градусов, опускного кольцевого диффузорного участка и кольцевого участка постоянного сечения (2), образованных наружной поверхностью шахты, внутренней поверхностью разделительной обечайки и корпуса реактора, эллиптического

коллектора с щелевым фильтром (3), напорного сборного коллектора (4), активной зоны (5), области выхода из активной зоны (6).

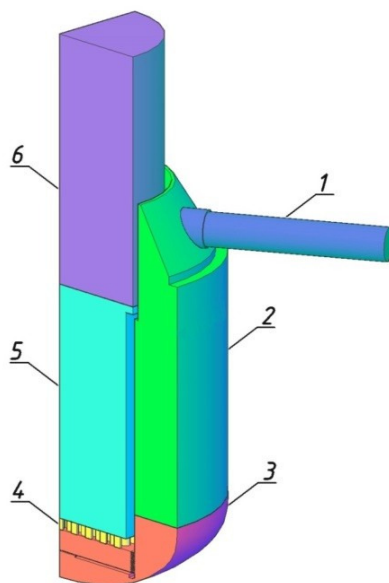


Рис. 1. Расчетная область тракта:

1 – входные напорные патрубки, 2 – кольцевой опускной коллектор, 3 – эллиптическая часть с фильтром, 4 – напорный коллектор, 5 – активная зона, 6 – область выхода

Выполнено численное исследование с использованием программного комплекса STAR-CCM+. При постановке задачи приняты следующие допущения: задача стационарная с турбулентным режимом течения; теплоноситель – несжимаемая, вязкая, ньютоновская жидкость, с постоянными теплофизическими свойствами; уравнения математической модели осреднены по Рейнольдсу. При решении задачи гидродинамики использовались балансные уравнения движения, массы [1]. Уравнение неразрывности для однородных несжимаемых жидкостей:

$$\sum_j \frac{\partial V_j}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

Уравнение количества движения для однородных несжимаемых жидкостей:

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + T_{ij} \right), \quad (2)$$

где T_{ij} – компоненты тензора турбулентных напряжений.

Для замыкания системы (2), согласно [6], выбрана квадратичная k-ε модель турбулентности, хорошо зарекомендовавшая себя при расчете сложных течений в узлах ядерных реакторов [3].

Кинетическая энергия турбулентности определяется из уравнения:

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_T \cdot P - \rho \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{\mu_T} \cdot \sum_i \sum_j T_{ij} \cdot \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$$

Уравнение для скорости диссипации кинетической энергии:

$$\rho \cdot \sum_j V_j \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \sum_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} \cdot (C_{\varepsilon 1} \cdot \mu_T \cdot P - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho \cdot \varepsilon), \quad (4)$$

Предполагается, что турбулентная вязкость связана с кинетической энергией турбулентности и величиной диссипации следующим соотношением:

$$\mu_T = \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Значения k и ε вычисляются из дифференциальных уравнений, описанных выше. Активная зона моделируется анизотропным пористым телом, пористость и гидравлические характеристики которого были эквивалентны пористости и гидравлическим характеристикам бесконечного пучка гладких стержней, размещенных в узлах правильной треугольной упаковки с относительным шагом 1,44.

Уравнение движения в пористом теле включает член, отвечающий за потери:

$$f_p = -P \cdot v; \quad (6)$$

Тензор сопротивлений для пористого тела имеет вид:

$$P = P_v + P_i \cdot |v|; \quad (7)$$

где P_v и P_i вязкое и инерционное сопротивление пористой среды, v – скорость фильтрации.

На входе в подводящие патрубки задавалось постоянство скорости, интенсивность турбулентности, равная 5%, и масштаб турбулентности, составляющих примерно 10% от

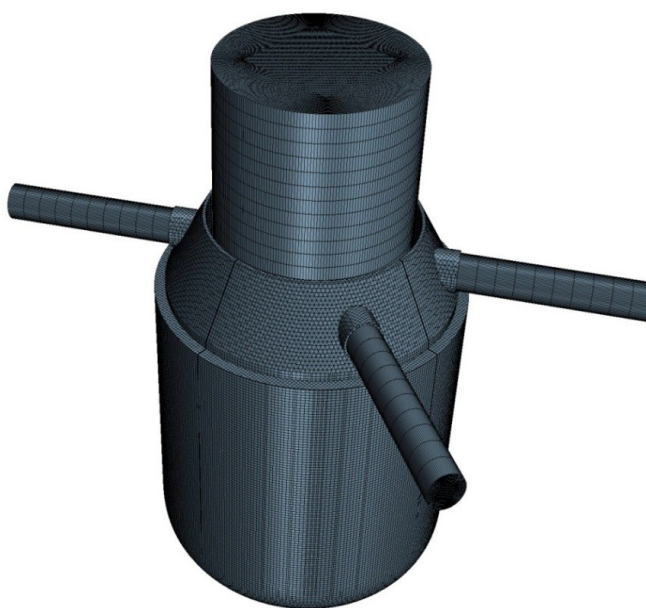
внутреннего диаметра патрубков [4,5]. Вектор скорости на выходе из расчетной области определялся из граничного условия типа «outlet» следующим соотношением:

$$v_f = v_0^r + \frac{\chi_i \cdot a}{\rho_f \cdot |a|} \quad (8)$$

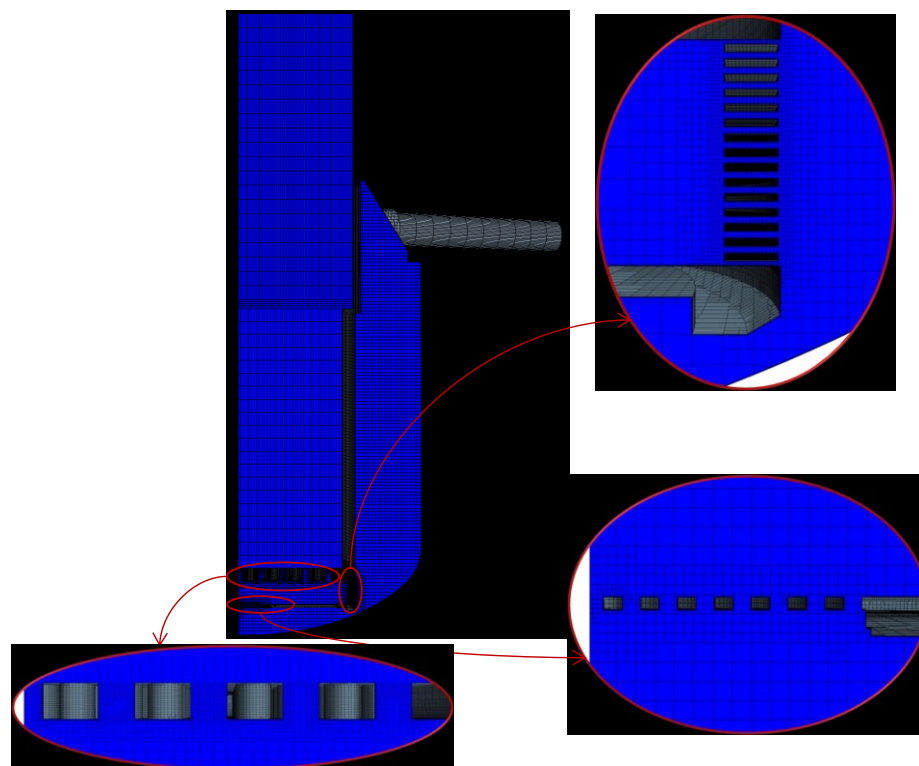
где v_0^r - скорость экстраполированная с соседней ячейки, $\frac{a}{|a|}$ - наружная нормаль.

Давление экстраполируется по соседней ячейке с помощью метода Гаусса.

Проанализировав геометрию расчетной области и имеющиеся вычислительные ресурсы, была разработана сеточная модель на основе гексаэдральных элементов, содержащая 6 721 176 ячеек (рис. 2).



а)



б)

Рис. 2. Сеточная модель тракта: а) – общий вид, б) – продольное сечение

Анализ течения в опускном кольцевом тракте показал, что поток, выходящий из патрубков, ударяется о стенку шахты, образуя при этом веерные струи. Число струй равно числу промежутков между патрубками, через каждый из которых подавался одинаковый расход. Эти струи формируют опускной кольцевой поток имеющий значительные неравномерности распределения скорости. Максимальные значения скорости при этом наблюдаются между патрубками. Ширина струи и максимальная скорость в ней зависит от расстояния между патрубками. Так, для «узкой» струи, где угловое расстояние между патрубками составляет 60° , максимальная скорость выше, чем в «широкой», где угловое расстояние – 120° . На рисунке 4 можно наблюдать, что неравномерность скорости по высоте сглаживается. Качественно, эти результаты подтверждаются [2] и результатами гидравлических экспериментов на модели реактора ВВЭР-1000, проводимых в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Ядерные реакторы и установки».

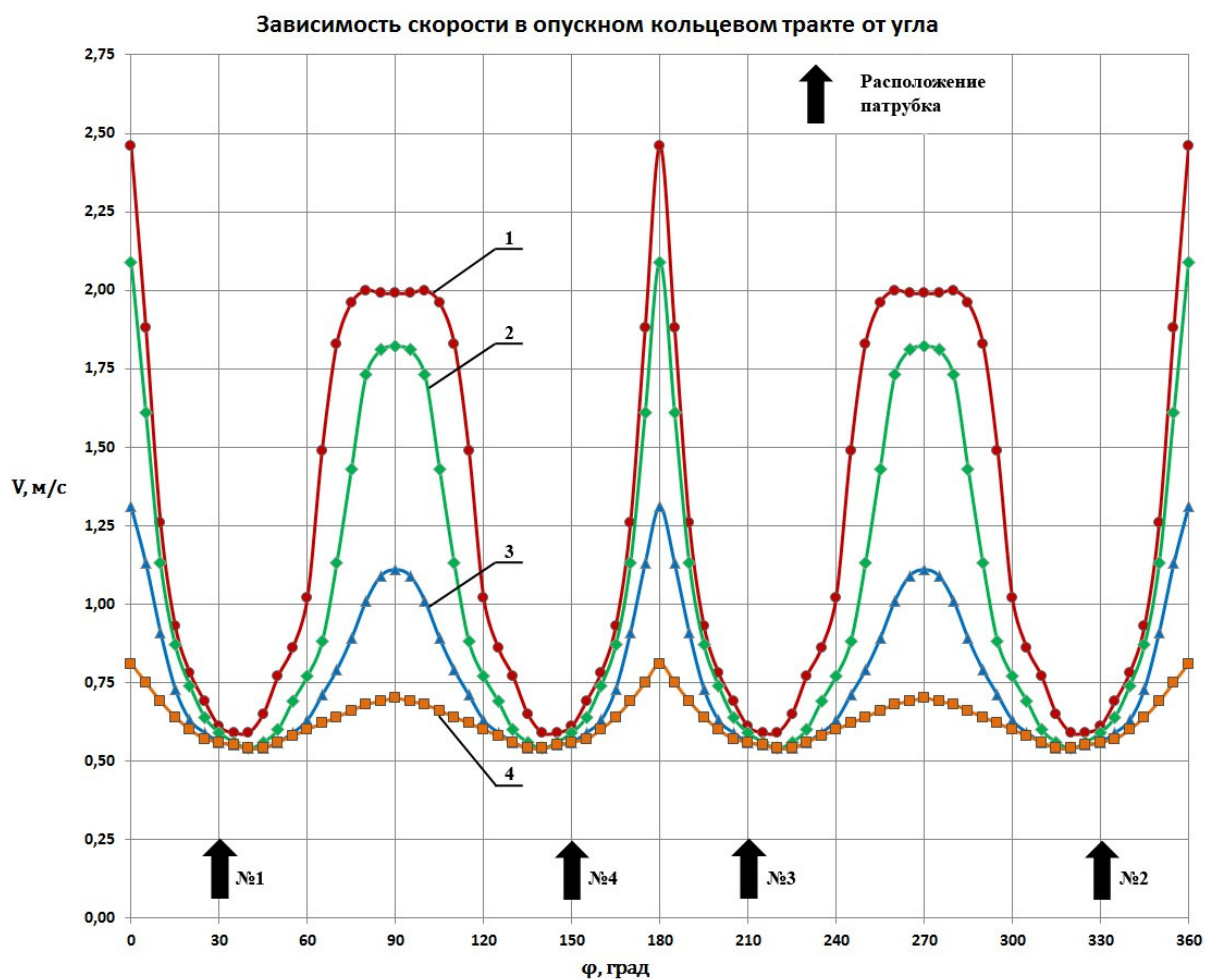


Рис. 3. Зависимость скорости от угла в различных по высоте сечениях:
база – ось симметрии подводящих патрубков
1 – 245 мм; 2 – 775 мм; 3 – 1305 мм; 4 – 1835 мм.

Определяющее влияние на распределение локальных скоростей в опорных стояках оказывает предыстория потока. Течение в центральных стояках формируется нижним фильтром, а течение в периферийных стояках – боковым щелевым фильтром. Отчетливо видна асимметрия потока в сечении стояков, нарастающая от центра к периферии. Вследствие бокового подвода в опорных стояках периферийной области образуются вихри, смещенные от оси стояков в направлении к шахте реактора (рис. 4), и приводящие к существенной неравномерности скорости в них (рис.5). Помимо неравномерности скорости на выходе из отдельных стояков имеется макроскопическая скоростная неравномерность, связанная с уменьшением скорости на входе в активную зону при приближении к оси реактора (рис.5). По оценкам, эта неравномерность может достигать величины 10%. Качественно, сравнение с экспериментальными данными [2] скоростей, подтверждает полученные результаты.

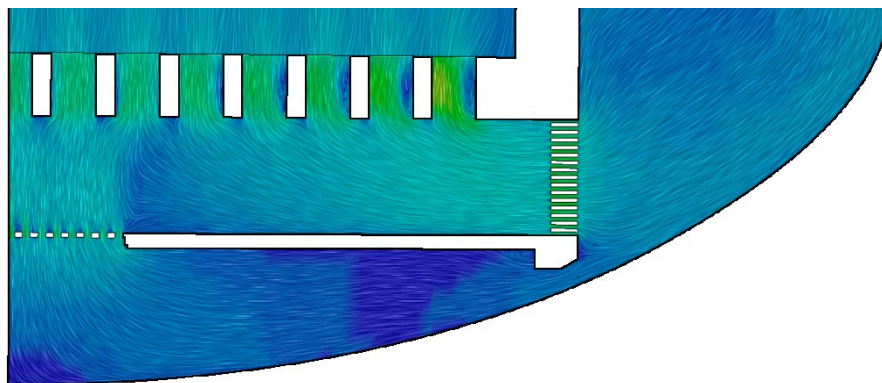


Рис. 4. Вектора скорости в эллиптическом коллекторе

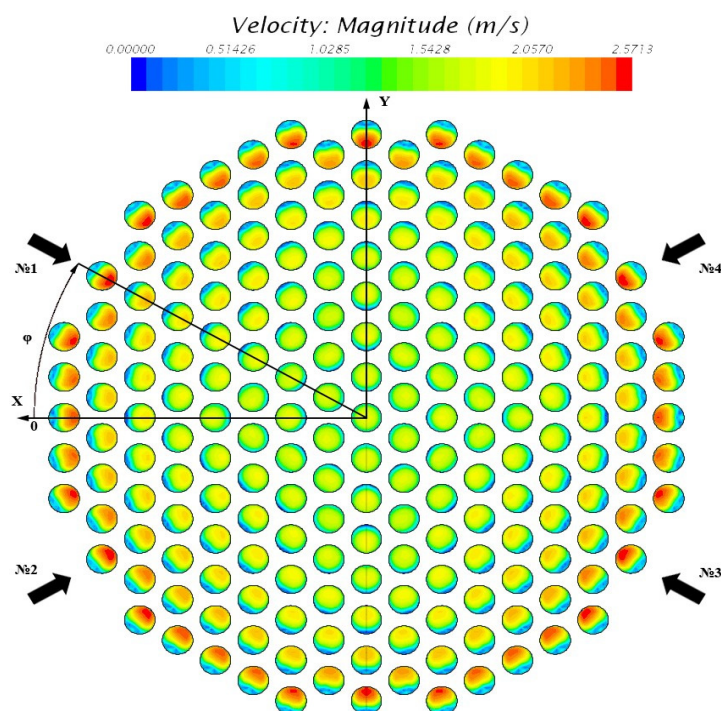


Рис. 5. Распределение скорости на выходе из опорных стояков

В ходе проведенной работы были получены, приведены и проанализированы результаты численного моделирования течения в опускном тракте водо-водяного реактора; показана эффективность использования CFD-моделирования для выяснения закономерностей сложных гидродинамических процессов; показано, что результаты расчета качественно соответствуют экспериментальным данным, полученным из гидравлических экспериментов на модели реактора ВВЭР-1000, проводимых в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Ядерные реакторы и установки».

Данные численного моделирования, выполненного в настоящей работе, могут быть использованы для отработки расчетных методик, используемых в отраслевых одномерных теплогидравлических расчетных кодах.

Список литературы

1. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. Учеб. пособие. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.
2. Крапивцев В.Г., Кудрявцев О.В., Солонин В.И. Моделирование течения на входе в активную зону реакторов ВВЭР. Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. "Машиностроение". 2012 .№ 2 . С. 70-79
3. Солонин В.И., Марков П.В. Гидродинамика сотовой решетки-интенсификатора, создающей конвективный перенос, для реакторных установок с водой под давлением. Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". 2011. № 3. С. 18-25.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
5. Патанкар С.В., Сполдинг Д.Б. Тепло- и массообмен в пограничных слоях. М.: Энергия, 1971. 128 с.
6. User Guide. Star-CCM+Version 8.06. CDadapcoю, New York: Melville, 2013. 13302 с.