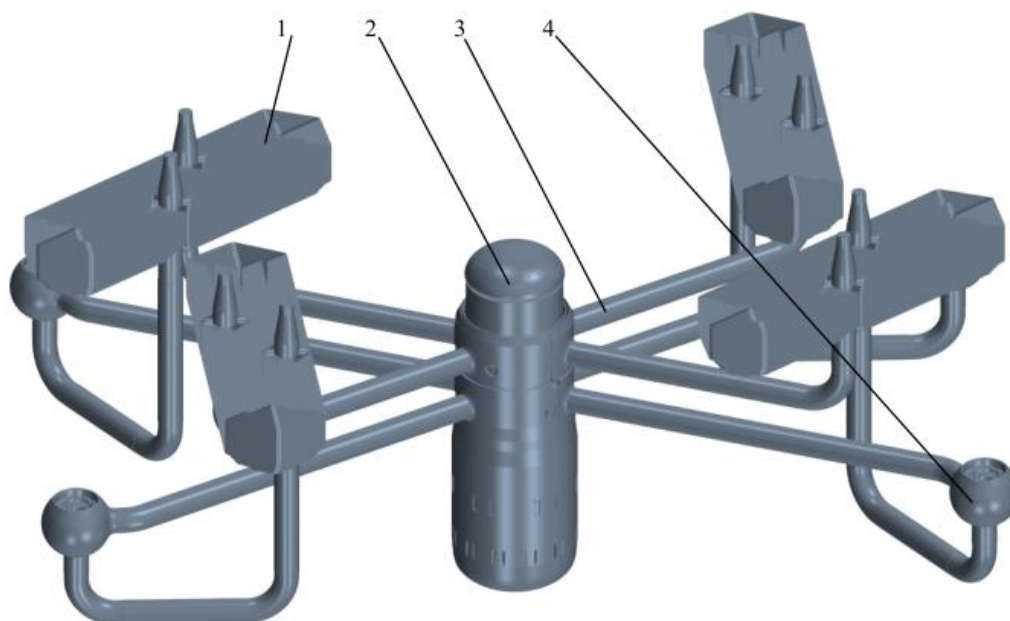


## РАЗРАБОТКА CFD-МОДЕЛИ ПЕРВОГО КОНТУРА РУ АЭС-2006

**В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков,  
О.В. Кудрявцев, Ю.Н. Надинский, А.П. Скибин**

В настоящей статье представлено создание CFD модели первого контура РУ АЭС-2006 – типового проекта российской атомной станции нового поколения «3+» с улучшенными технико-экономическими показателями. Особенностью данной CFD-модели является отсутствие граничных условий по входу и выходу из расчетной области, т.к. расчетная область представляет собой замкнутый циркуляционный контур теплоносителя. Следствием этого является минимальный набор входных параметров, необходимых для расчетного моделирования стационарного режима работы РУ: мощность энерговыделения в АЗ (с учетом неравномерности), частота вращения рабочих колес ГЦНА, давление теплоносителя в компенсаторе давления и давление теплоносителя в ПГ по второму контуру.

Расчетная область (рисунок 1) включает в себя проточные части следующего оборудования первого контура РУ: реактора, четырех ГЦНА, четырех ПГ и ГЦТ.



1 – парогенератор; 2 – реактор; 3 – ГЦТ; 4 – ГЦНА

Рис. 1 Расчетная область

Проточная часть реактора включает в себя напорную и сборную камеры реактора, а также АЗ, состоящую из 163 ТВС, каждая из которых включает хвостовик, твэльный пучок и головку. Твэльный пучок каждой ТВС состоит из 312 тепловыделяющих элементов, 18 направляющих каналов, 1 измерительного канала и 13 дистанционирующих решеток. Общее количество тепловыделяющих элементов в АЗ превышает 50000.

Для корректного моделирования напора ГЦНА в CFD-модели учтены особенности рабочего колеса, направляющего аппарата и др. Проточная часть каждого ПГ состоит из проточных частей горячего и холодного коллекторов теплоносителя первого контура и около 11000 теплообменных труб.

Сложность и масштабность разработанной CFD-модели обуславливает необходимость применения расчетных сеток размерностью порядка 1 млрд. ячеек, что приводит к необходимости использовать для выполнения расчетов высокопроизводительный вычислительный кластер, установленный в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Разработка CFD-модели первого контура РУ АЭС-2006 выполнена в коде STAR-CCM+. Размерность разработанной базовой модели составила ~760 млн. ячеек.

Сеточная модель учитывает все конструктивные особенности первого контура РУ, способные в значительной мере оказывать влияние на моделируемые параметры. Сеточная модель разработана с использованием комбинированного подхода, который заключается в использовании расчетных сеток различных типов. В представленной CFD-модели использовались расчетные сетки двух типов: многогранная, которая является основной, и гексаэдрическая. Подробность дискретизации расчетной области выбрана по результатам верификационных исследований и анализа сеточной сходимости для отдельного оборудования и отдельных элементов оборудования первого контура РУ. Общая сеточная модель первого контура РУ собрана из частей, которые разрабатывались отдельно. Для каждой части предусмотрена возможность локального изменения детализации сеточной модели, что обеспечивает большую универсальность CFD-модели с точки зрения дальнейшего развития. Перед сборкой общей модели была выполнена верификация отдельных элементов с использованием данных, полученных на экспериментальных стендах.

Примененная в настоящем расчетном исследовании математическая модель основана на следующих допущениях: теплоноситель считается ньютоновской и несжимаемой средой, течение теплоносителя стационарное, турбулентное, границы проточной части считаются гидравлически гладкими стенками, вибрации стенок отсутствуют.

Теплофизические свойства теплоносителя (плотность, динамическая вязкость, удельная теплоемкость и теплопроводность) зависят от температуры.

Теплогидравлические процессы в твэльном пучке АЗ реактора описываются с применением модели пористого тела с эмпирическими замыкающими соотношениями. В АЗ задается переменное по ТВС и по высоте энерговыделение.

Течение теплоносителя первого контура в теплообменных трубах ПГ считается одномерным. Соответственно, также одномерным считается процесс теплопередачи от теплоносителя первого контура к теплоносителю второго контура через стенки теплообменных труб. В данном случае одномерность заключается в постоянстве теплогидравлических параметров в поперечном сечении теплообменной трубы и учете изменения теплогидравлических параметров только в продольном направлении (по длине теплообменных труб).

В результате, выполненных расчетов получены пространственные распределения давления, компонент вектора скорости и температуры теплоносителя первого контура РУ АЭС-2006 при номинальном режиме работы (тепловая мощность реактора 100%, работают четыре ГЦНА).

На рисунке 2 представлено распределение температуры теплоносителя первого контура АЭС-2006 за исключением напорной камеры реактора (участок проточного тракта от входных патрубков реактора до входа в АЗ).

Особенности течения теплоносителя видны при визуализации траекторий движения теплоносителя. Особенности течения в напорной и сборной камерах реактора определяют так называемое «межпетлевое перемешивание потоков», которое наглядно представлено на рисунке 3.

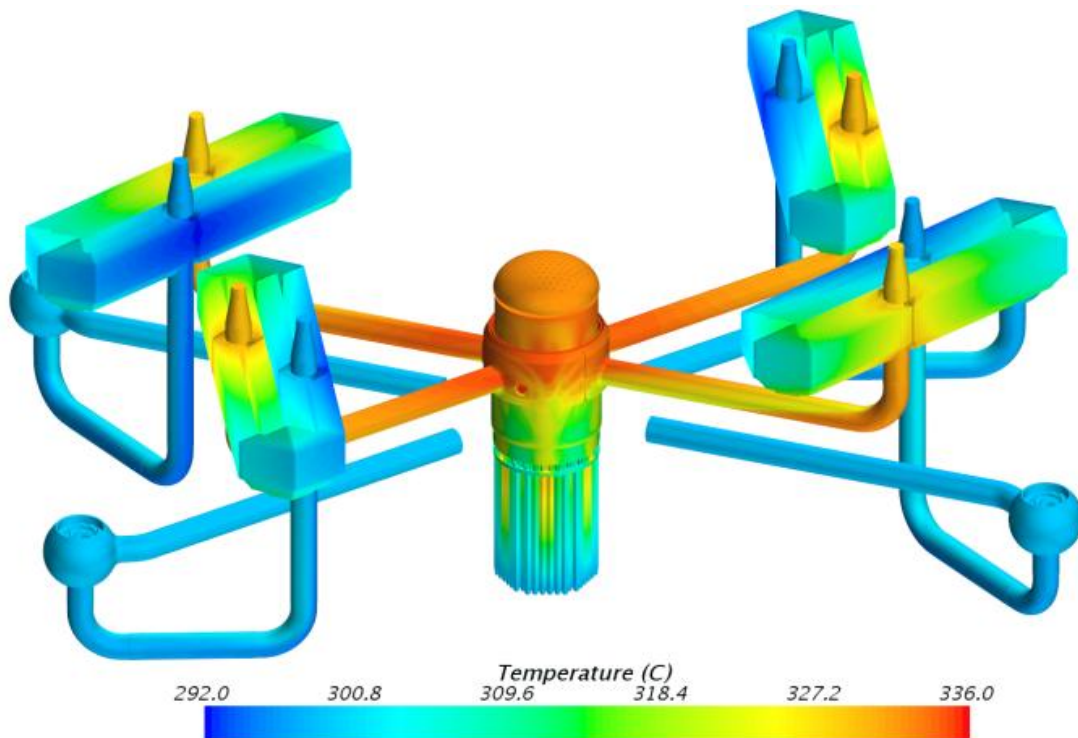


Рис. 2 Распределение температуры теплоносителя первого контура РУ АЭС-2006 (напорная камера реактора не показана)

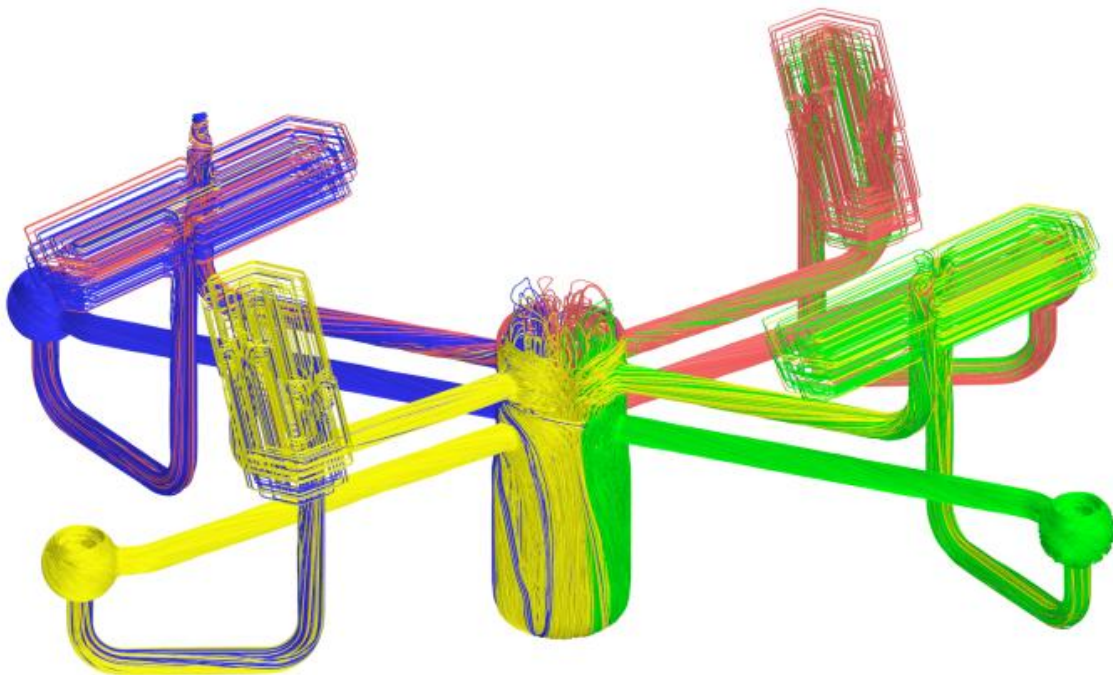


Рис. 3 Траектории движения теплоносителя первого контура РУ ВВЭР (ГЦНА каждой петли соответствует свой цвет)

Проведено сравнение результатов CFD расчета с проектными данными при работе установки на номинальном режиме (тепловая мощность реактора равна 100%, работают четыре ГЦНА). По итогам сравнения показано соответствие расчетных данных проектным в пределах технических допусков и погрешностей, что подтверждает корректность моделирования.

В таблице представлено сравнение результатов расчета с проектными данными, из которого видно, что по всем интегральным параметрам отклонение составляет величину не более 3,3 %, и находится в пределах технологических допусков.

#### **Сравнение результатов расчета с проектными данными**

Параметр	Расчетное значение	Проектное значение	Отклонение, %
Расход теплоносителя через реактор, м <sup>3</sup> /ч	86860	88000	-1,3
Мощность ПГ (средняя по петлям), МВт	804,7	803,0	0,2
Мощность ГЦНА (средняя по петлям), МВт	4,7	4,6	1,9
Среднемассовая температура теплоносителя на входе в реактор (средняя по петлям), °С	298,7	298,2	1,7
Среднемассовая температура теплоносителя на выходе из реактора (средняя по петлям), °С	329,6	328,6	3,3
Подогрев теплоносителя в реакторе, °С	30,9	30,4	1,6

Также было выполнено сравнение расчётных и проектных значений среднего по петлям абсолютного давления в проточном тракте первого контура. Отклонение расчетных и проектных значений составляет не более 7,2 %. При этом важно отметить, что нормировка выполнялась на перепад давления, создаваемый ГЦНА.

Важно отметить, что после проведения дополнительного верификационного исследования разработанная CFD-модель позволит получать достоверные локальные распределения теплогидравлических параметров теплоносителя, недоступные для прямого измерения на АЭС и моделирования другими расчетными методами.

По итогам выполненной работы следует отметить, что в настоящей статье представлено применение CFD-технологии в поддержку конструирования для подтверждения основных технических решений, принятых для проекта РУ АЭС-2006 в части исследования вопросов гидродинамики и теплообмена.

#### **ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ**

АЗ	–	активная зона
АЭС	–	атомная электрическая станция
ВВЭР	–	водо-водяной энергетический реактор
ГЦНА	–	главный циркуляционный напорный агрегат
ГЦТ	–	главный циркуляционный трубопровод
ПГ	–	парогенератор
РУ	–	реакторная установка
ТВС	–	тепловыделяющая сборка
CFD	–	Computational Fluid Dynamics (вычислительная гидро-газодинамика)