

Разработка полномасштабной теплогидравлической CFD модели первого контура реакторной установки АЭС-2006

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

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Настоящая статья посвящена расчетному моделированию процесса тепломассообмена в проточном тракте первого контура реакторной установки АЭС-2006, которая является современным проектом российской атомной станции поколения «3+». В статье представлена разработка теплогидравлической CFD модели реакторной установки АЭС-2006 и некоторые результаты расчетов, проведенных с использованием созданной модели. Продемонстрировано применение CFD технологий как для моделирования основных теплогидравлических характеристик первого контура РУ, так и для моделирования распределения теплогидравлических параметров, связанных со сложным пространственным течением теплоносителя в камерах смешения реактора. Сложность и масштабность разработанной CFD модели приводит к необходимости использования для расчетов высокопроизводительных вычислительных кластеров с распределенной оперативной памятью.

Ключевые слова: атомная энергетика, реакторная установка, вычислительная гидродинамика, CFD технологии, суперкомпьютерные технологии, процесс тепломассообмена.

1. Введение

При создании новых и модернизации существующих реакторных установок (РУ) необходимо располагать детальной информацией о протекании процесса тепломассообмена в рассматриваемых установках еще на стадии проектирования. Особый интерес представляют процессы гидродинамики и теплообмена, протекающие в первом контуре РУ в стационарных режимах работы, которые определяют теплогидравлические характеристики РУ и, следовательно, влияют на технико-экономические показатели установки. Основными теплогидравлическими характеристиками первого контура РУ для стационарных режимов работы являются расходы, подогревы и температуры теплоносителя в петлях РУ, реакторе и тепловыделяющих сборках (ТВС).

Также на стадии проектирования представляют интерес распределения теплогидравлических параметров напрямую связанные со сложным пространственным течением теплоносителя в проточном тракте РУ. К таким параметрам можно отнести: распределение расходов теплоносителя на входе и на выходе из активной зоны (АЗ) реактора и соответствующие им подогревы теплоносителя в ТВС; распределение температур в выходных патрубках реактора и связь локальных температур в месте установки термопар со среднемассовой температурой в этих патрубках; распределение расходов теплоносителя в опускном участке реактора и соответствующие ему коэффициенты обмена массой теплоносителя между петлями первого контура РУ.

В настоящее время для определения основных теплогидравлических характеристик первого контура РУ на стадии проектирования применяются контурные расчетные коды, использующие в качестве замыкающих соотношений экспериментальные данные, полученные на стендах и в натурных условиях на действующих блоках, к которым относятся коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) участков гидравлического тракта первого контура РУ, напорно-расходную характеристику главного циркуляционного насосного агрегата (ГЦНА) и коэффициенты теплоотдачи от теплообменных труб парогенератора ПГ к теплоносителям первого и второго контуров.

Для получения расчетным способом распределений теплогидравлических параметров в первом контуре РУ необходимо использовать CFD технологии (вычислительная гидродинамика), которые также незаменимы при определении основных теплогидравлических характеристик РУ при разработке новых установок, когда экспериментальные данные, используемые в контурных расчетных кодах в качестве исходных данных, ограничены или отсутствуют вовсе. Применение CFD технологий сопряжено с неопределенностью при задании условий однозначности – граничных условий на входе и на выходе из расчетной области, возникающей вследствие наличия взаимовлияния оборудования первого контура.

В работах [1-4], приведено расчетное моделирование теплогидравлических процессов в оборудовании АЭС с помощью CFD. В этих работах вводилось значительное упрощение расчетной области и использовалось недостаточное сеточное разрешение, приводящее к ошибкам даже в интегральном перепаде давления.

Разработка детальных CFD моделей оборудования РУ представлена в работах [5-6], где учет особенностей проточного тракта и детальная проработка конструкции позволила определить перепады давления и распределения расходов теплоносителя с погрешностью 5 - 15 %. Однако и в работах [1-4] и в работах [5-6] вопрос о распределения скоростей, температур и турбулентных характеристик потока теплоносителя на входе в расчетную область оставался открытым.

В настоящей работе рассмотрено создание CFD модели первого контура реакторной установки АЭС-2006 – типового проекта российской атомной станции нового поколения «3+» с улучшенными технико-экономическими показателями. Особенностью CFD модели является отсутствие граничных условий по входу и выходу из расчетной области, т.к. расчетная область представляет собой замкнутый циркуляционный контур теплоносителя. Созданная CFD модель имеет минимальный набор входных параметров, определяющих стационарный режим работы РУ, и состоящий из: мощности энерговыделения в активной зоне (с учетом неравномерности), частоты вращения рабочих колес ГЦНА, давления теплоносителя в компенсаторе давления (КД) и давления теплоносителя в ПГ по второму контуру.

Сложность и масштабность разработанной CFD модели обуславливает необходимость применения расчетных сеток размерностью порядка 1 млрд. ячеек. Это в свою очередь приводит к необходимости использовать для выполнения расчетов высокопроизводительный вычислительный кластер, установленный в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Вычислительный кластер насчитывает 2000 ядер (IntelXeon E5-2698 v4 2,2 Гц) и 5 Тб оперативной памяти.

Основная цель данной статьи – продемонстрировать возможности применения CFD технологии для моделирования теплогидравлических процессов в первом контуре в стационарных режимах работы на примере РУ АЭС-2006 и провести сравнение результатов расчета с проектными данными.

2. Постановка задачи

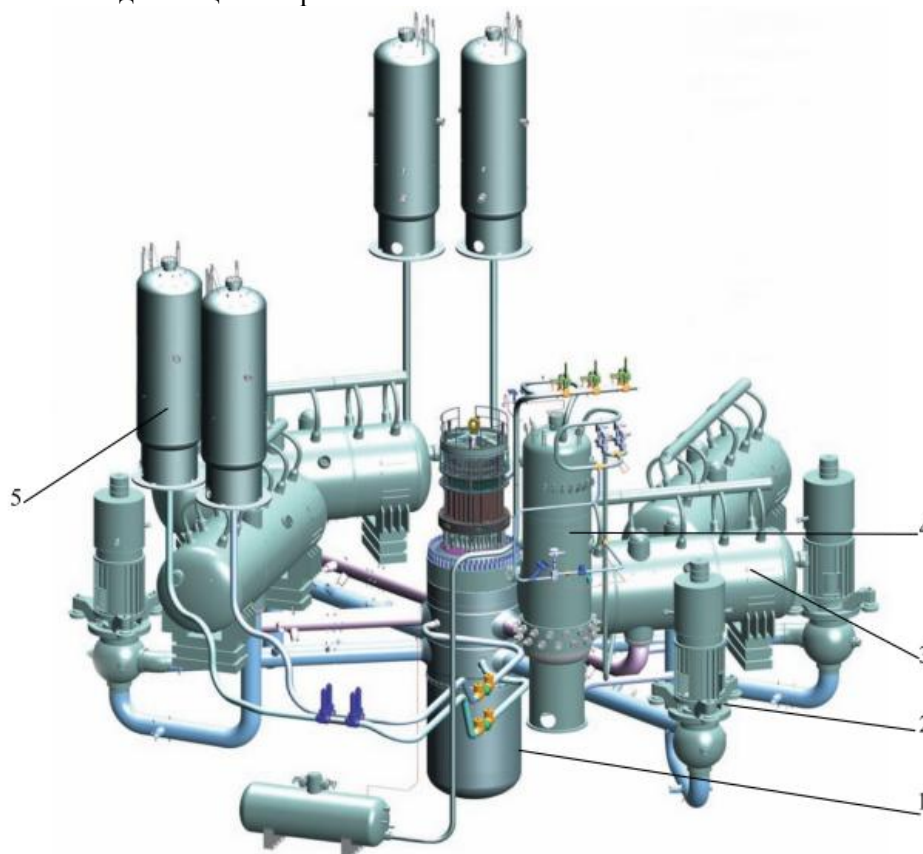
Представленная на рисунке 1 РУ АЭС-2006 представляет собой четырехпетлевую установку с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР), циркуляция теплоносителя в проточном тракте которой обеспечивается четырьмя ГЦНА, расположенными по одному на каждой петле. В качестве теплоносителя первого контура РУ, используется вода под давлением, нагрев и последующее охлаждение которой осуществляется в АЗ реактора и четырех горизонтальных ПГ соответственно. ПГ, так же как и ГЦНА, располагаются по одному на каждой петле. Реактор, ГЦНА и ПГ соединены главными циркуляционными трубопроводами (ГЦТ) и образуют замкнутый четырехпетлевой циркуляционный контур теплоносителя. Для поддержания заданного давления теплоносителя в первом контуре РУ предназначена система компенсации давления (КД).

В расчетную область Ω , изображенную на рисунке 2, включены проточные части оборудования первого контура РУ: реактора, четырех ГЦНА, четырех ПГ и ГЦТ. Проточная часть каждого ГЦНА учитывает особенности рабочего колеса и направляющего аппарата, также учтен зазор между роторной и статорной частями ГЦНА для учета обратного тока из напорной области во всасывающую. Проточная часть каждого ПГ состоит из проточных частей горячего и холодного коллекторов теплоносителя первого контура и около 11000 теплообменных труб. Про-

точная часть реактора включает опускной участок – кольцевой зазор между корпусом реактора и шахты внутрикорпусной, проточные части нижней камеры смешения, АЗ и верхней камеры смешения. АЗ реактора состоит из 163 ТВС, каждая из которых включает хвостовик, твэльный пучок и головку. Твэльный пучок ТВС состоит из 312 тепловыделяющих элементов, 18 направляющих каналов, 1 измерительного канала и 13 дистанционирующих решеток. Общее количество тепловыделяющих элементов в АЗ превышает 50000.

Минимальный набор параметров, определяющих стационарный режим работы РУ, состоит из мощности энерговыделения в активной зоне (с учетом неравномерности), частоты вращения рабочих колес ГЦНА, давления теплоносителя в компенсаторе давления (КД) и давления теплоносителя в ПГ по второму контуру.

Целевыми параметрами в данной работе являются основные теплогидравлические характеристики первого контура РУ: расходы, подогревы и температуры теплоносителя в петлях РУ, реакторе и тепловыделяющих сборках.



1 – реактор; 2 – ГЦНА; 3 – парогенератор; 4 – КД; 5 – емкость САОЗ.

Рис. 1. Реакторная установка АЭС-2006

3. CFD модель

В соответствии с поставленной задачей в коде STAR-CCM+ была разработана CFD модель первого контура РУ АЭС-2006. Основные допущения математической модели: теплоноситель считается ньютоновской и несжимаемой средой, течение теплоносителя стационарное, турбулентное, границы проточной части считаются гидравлически гладкими стенками, вибрации стенок отсутствуют.

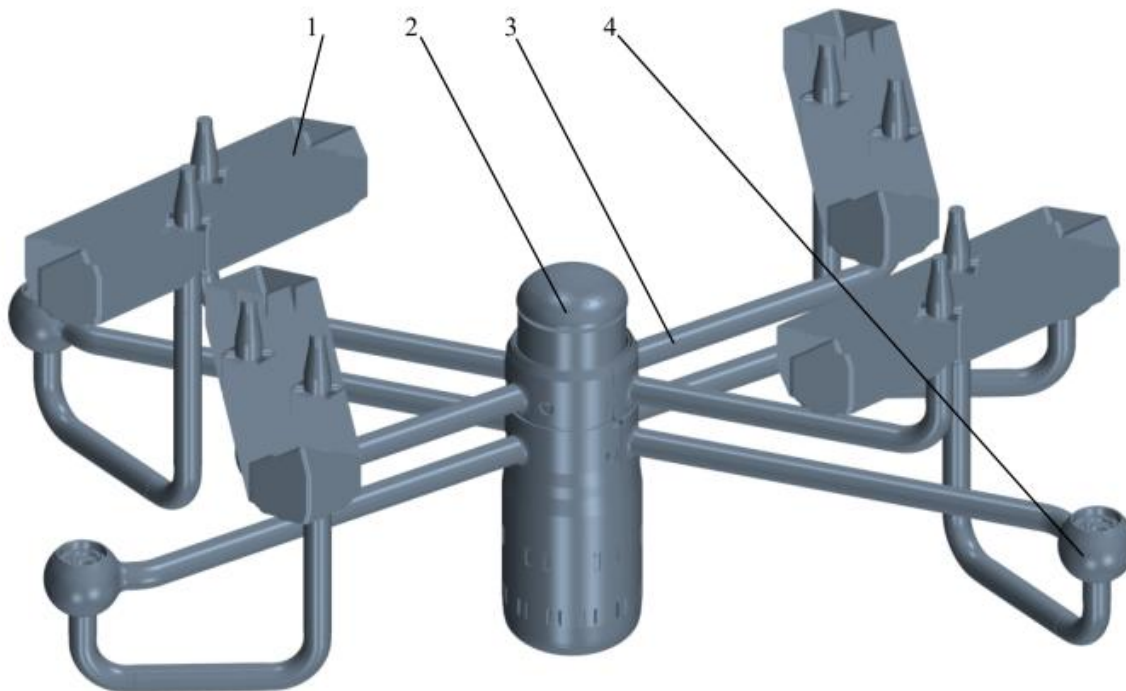
Теплогидравлические процессы в твэльном пучке АЗ реактора (подобласть Ω_1 , изображенная на рисунке 4) описываются с применением модели пористого тела [7] с эмпирическими замыкающими соотношениями, в объеме которого задается переменное по ТВС и по высоте АЗ энерговыделение.

Для учета вращательного движения рабочего колеса ГЦНА использована технология Moving Reference Frame (MRF) [7]: - движущаяся система координат, которая моделирует вра-

шение рабочего колеса путем добавления переносной скорости к скорости движения теплоносителя в области межлопаточных каналов рабочего колеса, а также учитывает центробежные силы и силы Кориолиса, действующие в потоке теплоносителя в указанной области (подобласть Ω_2 , изображенная на рисунке 4).

Течение теплоносителя первого контура в теплообменных трубах ПГ считается одномерным (подобласть Ω_3 , рисунок 5). 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).

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



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

Рис. 2. Расчетная область

Основные уравнения математической модели в тензорной записи [7]:

- – уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0. \quad (1)$$

– уравнения движения:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i, \quad (2)$$

где x_i - оси декартовой системы координат, u_i - компонента абсолютной скорости в направлении оси x_i , ρ - плотность теплоносителя, g_i - проекция вектора ускорение свободного падения на ось x_i , S_i - источник.

– уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j h - \left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h, \quad (3)$$

где h - энтальпия, μ и μ_t - динамическая и турбулентная вязкость, S_h - источник.

Давление теплоносителя:

$$p = p_s - \rho_0 g z, \quad (4)$$

где p_s - статическое давление, g - проекция вектора ускорения свободного падения на вертикальную ось, z - значение вертикальной координаты центра контрольного объема, ρ_0 - референсная плотность теплоносителя.

Тензор касательных напряжений:

$$\tau_{ij} = (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (5)$$

где k - кинетическая энергия турбулентных пульсаций, δ_{ij} - символ Кронекера.

Для определения турбулентной вязкости и кинетической энергии турбулентных пульсаций используется двухпараметрическая модель турбулентности k- ϵ Realizable [7].

Вектор абсолютной скорости определяется по следующей зависимости:

$$\bar{u} = \bar{u}' + \bar{\omega} \times \bar{r}, \quad (6)$$

где $\bar{u}'$ - вектор относительной скорости во вращающейся системе координат, $\bar{r}$ - радиус вектор центра контрольного объема во вращающейся системе координат.

Источник в уравнении энергии:

$$S_h = \begin{cases} Q/V, & \bar{r} \in \Omega_1 \\ 0, & \bar{r} \in \Omega \setminus \Omega_1 \end{cases}, \quad (7)$$

где Q - мощность энерговыделения в расчетных ячейках твэльного пучка АЗ, V - объем расчетных ячеек твэльного пучка АЗ.

Вектор угловой скорости (ось вращающейся системы координат совпадает с осью вращения рабочего колеса ГЦНА):

$$\bar{\omega} = \begin{cases} (0, 0, 2\pi n), & \bar{r} \in \Omega_2 \\ (0, 0, 0), & \bar{r} \in \Omega \setminus \Omega_2 \end{cases}, \quad (8)$$

где n - частота вращения рабочего колеса ГЦНА.

Источник в уравнении движения:

$$S_i = \begin{cases} \frac{\lambda \rho v}{2d_1} u_i, & \bar{r} \in \Omega_3 \\ 0, & \bar{r} \in \Omega \setminus \Omega_3 \end{cases}, \quad (9)$$

где v - модуль вектора скорости теплоносителя в сечении теплообменной трубы ПГ, d_1 - внутренний диаметр теплообменной трубы.

Коэффициент гидравлического трения для гладких труб [8]:

$$\lambda = 1 / (1,8 \lg \text{Re} - 1,64)^2, \quad (10)$$

где Re - число Рейнольдса в сечении теплообменной трубы ПГ.

Для замыкания системы дифференциальных уравнений записываются граничные условия для стенок расчетной области. Для стенок теплообменных труб ПГ (подобласть Ω_3) заданы условия скольжения для уравнений движения и удельный тепловой поток для уравнения энергии. Для остальных стенок расчетной области заданы условия прилипания для уравнений движения и адиабатические условия теплообмена для уравнения энергии:

$$\begin{aligned} u_i &= 0, \quad q = 0 \quad \text{для границ подобласти } \Omega \setminus \Omega_2 \setminus \Omega_3, \\ u'_i &= 0, \quad q = 0 \quad \text{для границ подобласти } \Omega_2, \\ \tau_{ij} &= 0, \quad u_n = 0, \quad q = \alpha(T_1 - T_2) \quad \text{для границ подобласти } \Omega_3, \end{aligned} \quad (11)$$

где T_1 - температура теплоносителя первого контура в сечении теплообменной трубы ПГ, T_2 - температура теплоносителя второго контура – температура на линии насыщения при давлении в корпусе ПГ.

Коэффициент теплопередачи от теплоносителя первого контура к теплоносителю второго контура через стенку теплообменной трубы ПГ:

$$\alpha = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{d_1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_2 + 2\delta}{d_2} + \frac{d_1}{\alpha_2 (d_2 + 2\delta)} \right)^{-1}, \quad (12)$$

где d_2 - наружный диаметр теплообменной трубы ПГ, δ - толщина отложений на теплообменной трубе ПГ, λ_1 - коэффициент теплопроводности материала теплообменных труб ПГ, λ_2 - коэффициент теплопроводности материала отложений.

Для определения коэффициента теплоотдачи α_1 от теплоносителя первого контура к внутренней стенке теплообменной трубы и для коэффициента теплоотдачи α_2 от наружной стенки теплообменной трубы к теплоносителю второго контура используются критериальные зависимости приведенные в [9].

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.

На рисунке 3 изображены элементы сеточной модели проточной части реактора в области нижней камеры смешения, входа и выхода из АЗ. Также на рисунке 3 пунктирной линией отмечена подобласть твэльного пучка АЗ – подобласть Ω_1 . На рисунке 4 представлена сеточная модель проточной части ГЦНА с выделением подобласти проточной части рабочего колеса Ω_2 . На рисунке 5 представлена сеточная модель проточной части первого контура ПГ с выделением подобласти теплообменных труб ПГ Ω_3 .

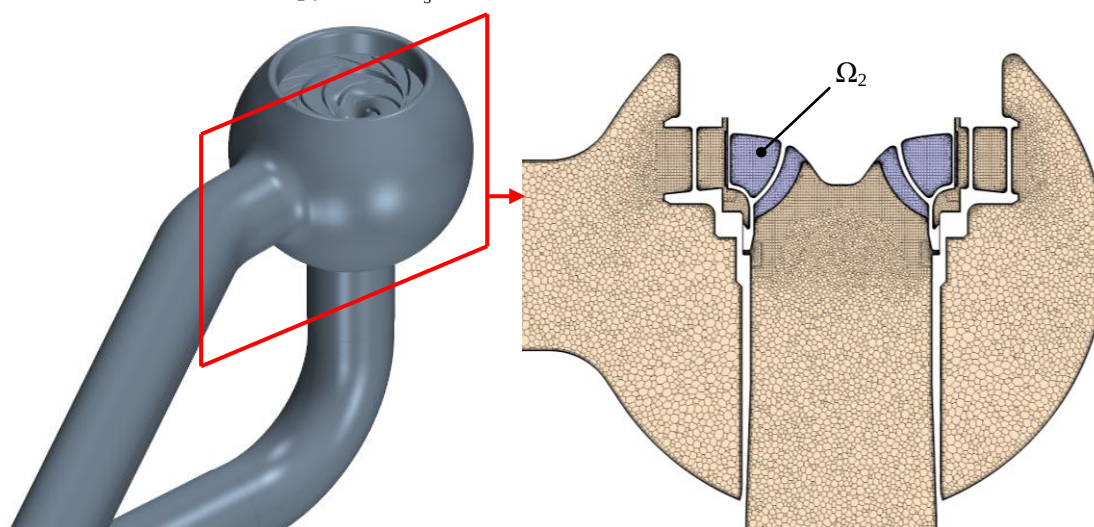


Рис. 3. Сеточная модель проточной части ГЦНА

Реализация математической модели включает в себя дискретизацию дифференциальных уравнений математической модели с помощью метода контрольного объема и итерационную

SIMPLE-подобную процедуру решения полученной линейаризованной системы алгебраических уравнений. Для дискретизации конвективных членов по пространству используется схема 2-го порядка точности. Для получения решения системы алгебраических уравнений на каждой итерации используется алгебраический многосеточный метод (AMG) [7].

Сложность и масштабность разработанной CFD модели обуславливает необходимость применения расчетных сеток размерностью порядка 1 млрд. ячеек. При этом разработанная модель может быть адаптирована для более детального исследования теплогидравлических процессов в отдельном оборудовании первого контура, либо его элементов. В настоящей статье представлена демонстрационная задача с минимальной размерностью, которая составила ~760 млн. расчетных ячеек.

Следует также отметить, что при увеличении размерности сеточной модели и усложнении геометрии расчётной области увеличивается соответственно и количество итераций, необходимых для получения решения. Например, для задачи с одним реактором требуется от 3000 до 5000 итераций, а для задачи всего первого контура целиком уже примерно 10000 итераций, что обуславливает высокие требования к производительности вычислительного кластера.

Компьютерное время, требуемое для одного теплогидравлического расчета с применением представленной в статье CFD модели на доступном высокопроизводительном вычислительном кластере, составляет порядка 7 суток. При этом используется 2000 вычислительных ядер и около 3 Тб оперативной памяти.

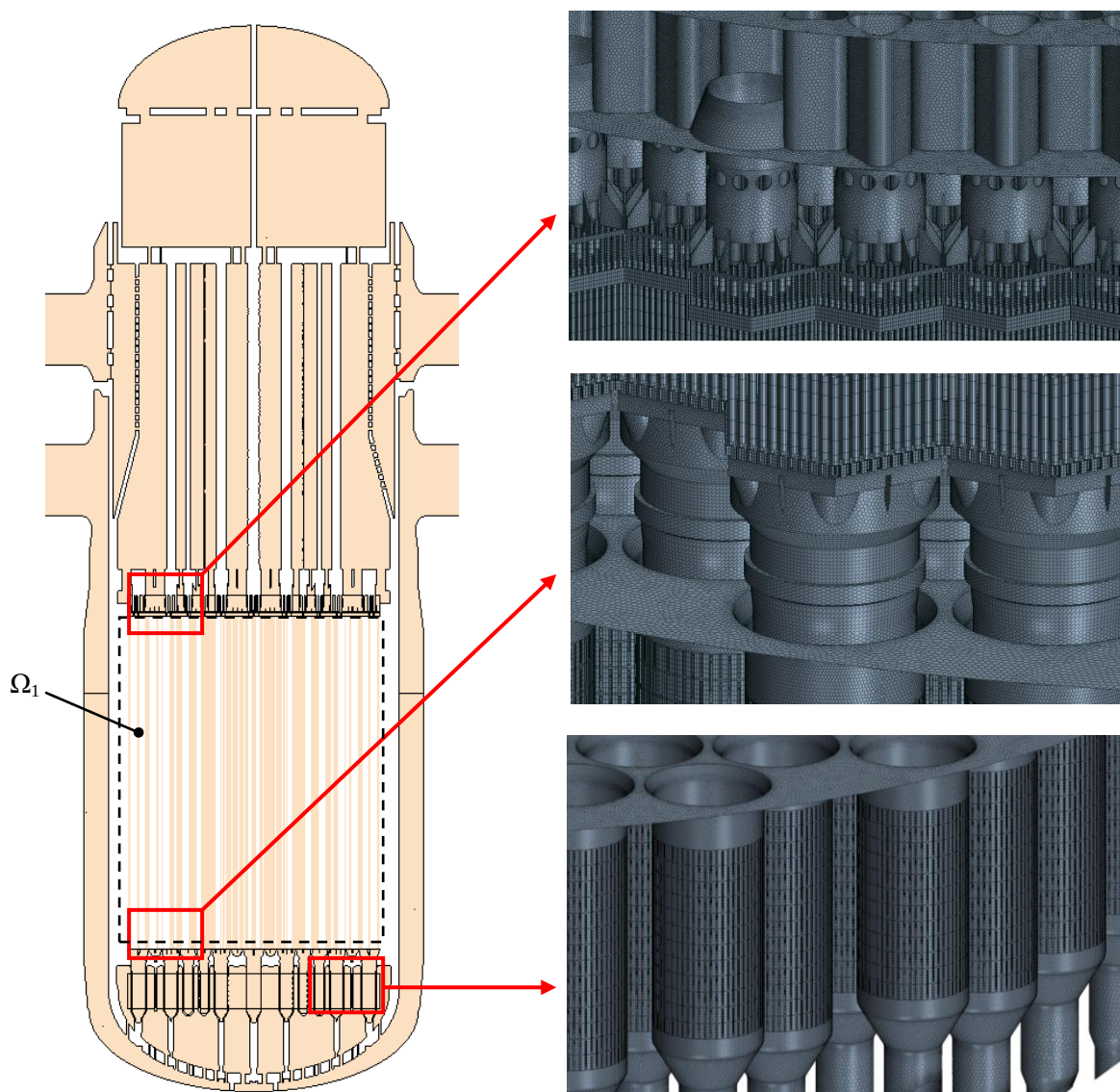


Рис. 4. Сеточная модель проточной части реактора

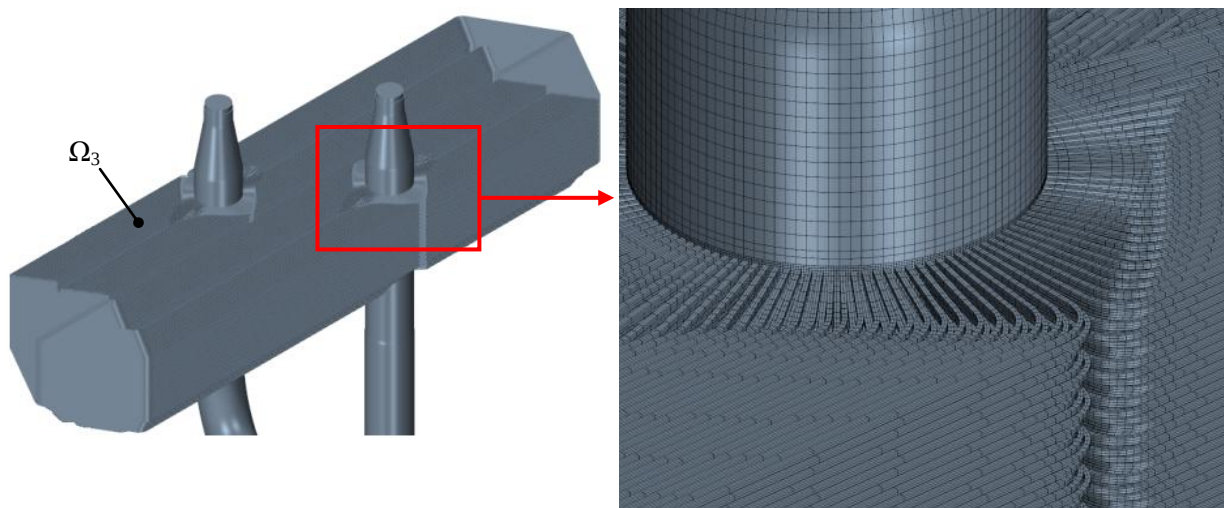


Рис. 5. Сеточная модель проточной части первого контура ПГ

Из приведенного на рисунке 6 графика невязок численного решения следует, что, не смотря на сложность геометрии расчетной области и большую размерность сеточной модели, уровень невязок (за исключением невязки уравнения энергии) составил величину менее 10^{-4} (применена автоматическая нормализация невязок, используемая по умолчанию в коде STAR CCM+). На рисунке также видны некоторые особенности численной сходимости, которые обусловлены процедурой проведения стационарного расчета.

Помимо этого, сходимость численного решения контролировалась по значениям расчетных параметров в точках, соответствующих местам расположения отборов давления и термопар, а также по интегральным величинам (расходы, подогревы и температуры теплоносителя в петлях РУ, реакторе, ТВС и др.). Всего во время решения контролируется более 500 параметров.

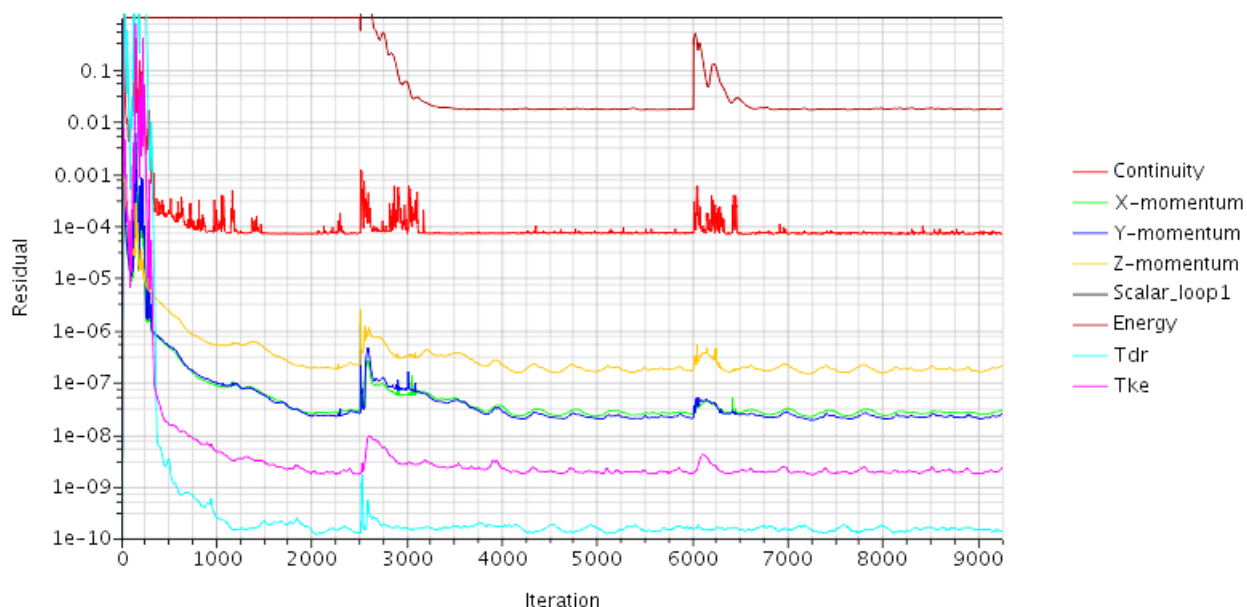


Рис. 6. График невязок численного решения

4. Верификация и валидация

Методология расчетного моделирования тепломассобмена в первом контуре РУ и его отдельных элементах разрабатывалась в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» на протяжении нескольких лет.

При создании методологии, разработке и отладке CFD модели контура были учтены требования различных рекомендаций и стандартов [100-122]. В рамках процедуры разработки модели первого контура были выполнены предусмотренные методологией верификационные и валидационные исследования, для чего было проведено 4 основных расчёта и 4 дополнительных (варьируемые параметры: модели турбулентности, параметры модели и т.д.). На отдельных тестовых задачах проводилось исследование достаточности сеточной модели и влияния используемых моделей турбулентности на результаты расчета.

Верификация с использованием данных полученных на экспериментальных стендах выполнялась для отдельных элементов CFD модели.

В таблице 1 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.

Таблица 1. Сравнение результатов расчета с проектными данными

Параметр	Расчет	Проект	Отклонение, %
Расход теплоносителя через реактор, м ³ /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.

5. Результаты расчета

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 7 представлено распределение абсолютного давления теплоносителя первого контура РУ АЭС-2006. Наблюдается падение давления теплоносителя в реакторе и в теплообменных трубах ПГ, а также локальное падение давления на галтелях подводящих патрубков, возникающее вследствие отрыва потока. Повышение абсолютного давления наблюдается в ГЦНА.

На рисунке 8 представлено распределение температуры теплоносителя первого контура АЭС-2006 за исключением напорной камеры реактора (участок проточного тракта от входных патрубков реактора до входа в АЗ). На рисунке наглядно продемонстрирован основной цикл работы РУ – нагрев теплоносителя первого контура в АЗ и его последующее охлаждение в ПГ. Также на рисунке представлена неравномерность температур теплоносителя (соответствующая неравномерности энерговыделения и расхода теплоносителя в АЗ) на выходе из АЗ, в сборной камере реактора (участок проточного тракта от выхода из АЗ до выходных патрубков реактора) и в выходных патрубках реактора.

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 9. На данном рисунке используется четыре цвета для обозначения траекторий движения теплоносителя, соответствующие четырем ГЦНА. Траектории начинаются на выходе из ГЦНА, а заканчиваются на входе в ГЦНА каждой петли. Из рисунка видно, что из ГЦНА выходят траектории одного цвета, а на вход в ГЦНА приходят траектории разных цветов, что указывает на наличие межпетлевого перемешивания.

Помимо этого, из приведенных рисунков видно, что учитывается пространственный характер процесса теплообмена в первом контуре РУ, а именно: неравномерный подогрев теплоносителя в активной зоне, сложная картина течения в напорной и сборной камерах реактора, вращение теплоносителя на участках ГЦТ соединяющих ГЦНА и реактор, а также реактор и ПГ, неравномерность температуры теплоносителя в ГЦТ на участке между реактором и ПГ.

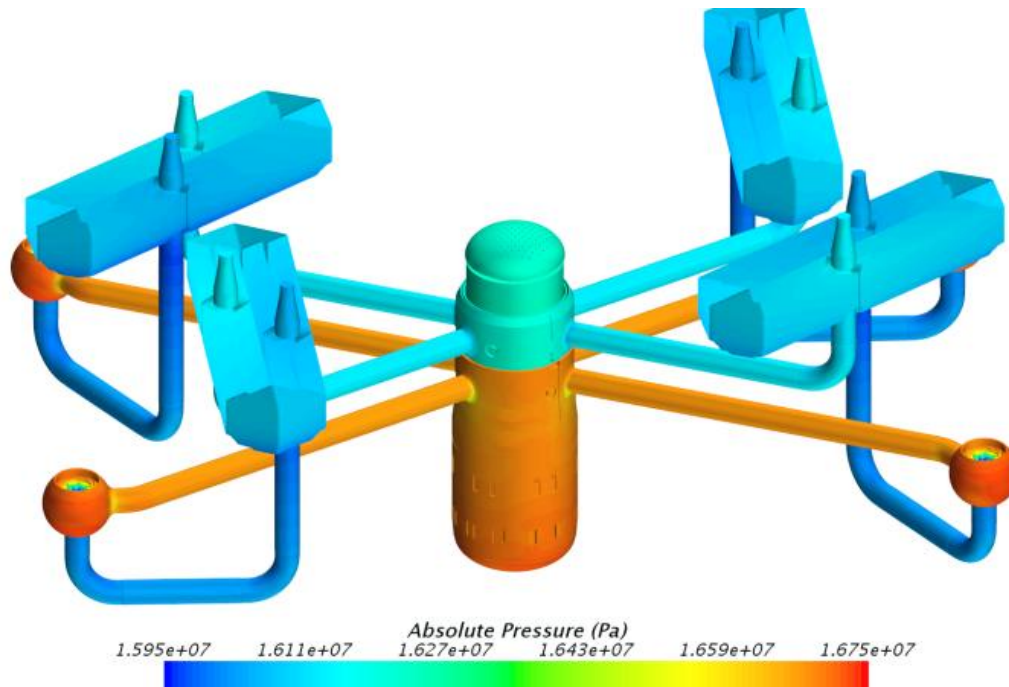


Рис. 7. Распределение абсолютного давления теплоносителя первого контура РУ АЭС-2006

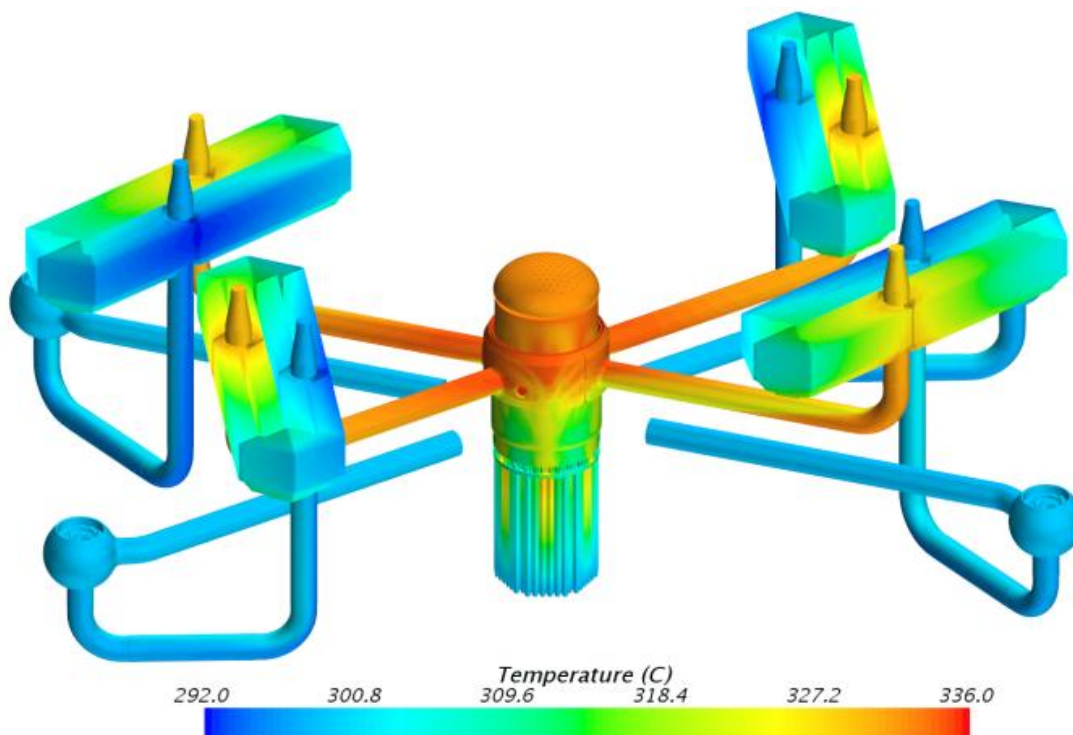


Рис. 8. Распределение температуры теплоносителя первого контура РУ АЭС-2006 (напорная камера реактора не показана)

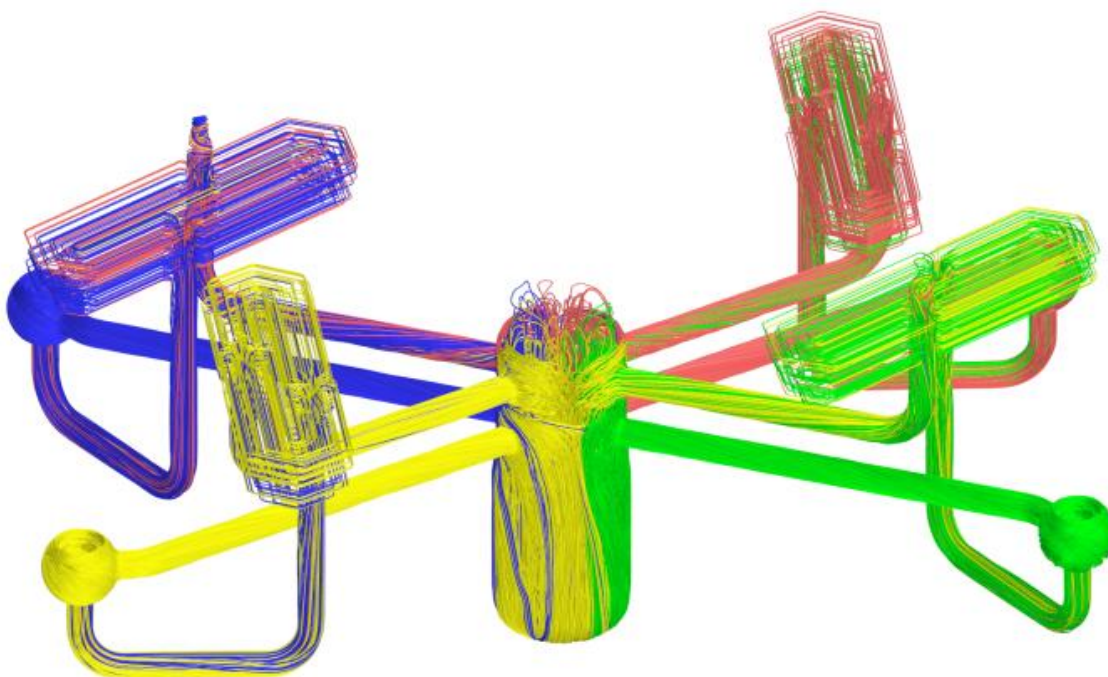


Рис. 9. Траектории движения теплоносителя первого контура РУ ВВЭР (ГЦНА каждой петли соответствует свой цвет)

5. Заключение

Разработана трёхмерная полномасштабная теплогидравлическая CFD модель проточного тракта первого контура реакторной установки АЭС-2006, состоящая из модели реактора ВВЭР-1200, четырёх моделей ПГ и ГЦНА, а также из соединяющей их в единый контур модели ГЦТ. Созданная CFD модель выполнена по модульной схеме, и может быть легко модернизирована в случае необходимости.

Представленное в настоящей статье расчетное исследование выполнено в среде ПК STAR-CCM+.

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 результате проведенных расчетов получены распределения давления, температуры и компонент вектора скорости в проточном тракте РУ. После дополнительной верификации разработанная CFD-модель позволит получать локальные распределения теплогидравлических параметров теплоносителя, недоступные для прямого измерения на АЭС и моделирования другими расчетными методами.

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.

Литература

1. Bieder, U., Fauchet, G., B'etin, S., Kolev, N., Popov, D., 2007. Simulation of mixing effects in a VVER-1000 reactor. Nuclear Engineering and Design 237, 1718–1728.
2. Böttcher M. Detailed CFX-5 study of the coolant mixing within the reactor pressure vessel of a VVER-1000 reactor during a non-symmetrical heat-up test // Nuclear Engineering and Design. 2008. Vol. 238, № 3. P. 445–452.

3. Böttcher M., Krüßmann R. Primary loop study of a VVER-1000 reactor with special focus on coolant mixing // Nuclear Engineering and Design. 2010. Vol. 240, № 9. P. 2244–2253.
4. Cheng J.-P., Yan L.-M., Li F.-C. CFD simulation of a four-loop PWR at asymmetric operation conditions // Nuclear Engineering and Design. 2016. Vol. 300. P. 591–600.
5. Разработка CFD модели реактора проекта АЭС-2006. Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А., Кудрявцев О.В., Надинский Ю.Н., Скибин А.П. В сборнике: Суперкомпьютерные дни в России. Труды международной конференции. 2016. С. 556-565.
6. Разномасштабные задачи тепломассообмена в атомной энергетике. Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А., Кудрявцев О.В., Надинский Ю.Н., Нечаев А.Т., Скибин А.П. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2017. Т. 6. № 4. С. 60-73.
7. Siemens. Theory guide STAR-CCM+ Version 12.02, 2017.
8. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. -3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
9. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 316 с.
10. Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications / NEA/CSNI/R (2014)11, 175 p.
11. Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems /NEA/CSNI/R (2007)13, 180 p.
12. Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer/ An American national standard. The American national standard ASME V&V 20-2009. 2009. 82 p.