Разномасштабные задачи тепломассообмена в атомной энергетике

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

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Данная статья посвящена обзору результатов, полученных в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» с учетом наработанного опыта в области численного моделирования тепломассообмена в различных объектах атомной энергетики. Представлен ряд задач, для решения которых были использованы современные численные методы вычислительной гидродинамики с применением высокопроизводительной вычислительной техники. Показаны новые возможности расчетного моделирования при использовании современных суперкомпьютерных вычислительных технологий, а также сопутствующие вычислительные сложности и проблемы анализа результатов. Приведены примеры использования рассматриваемой технологии для моделирования экспериментальных стендов и натурных объектов при различных режимах работы. Показана автоматическая обработка результатов, позволяющая проводить анализ больших задач размерностью до 1 млрд. контрольных объемов по интегральным параметрам, характеризующим работу реакторной установки, таким как распределение расходов на входе и на выходе из активной зоны, распределение подогревов в тепловыделяющих сборках активной зоны, и т.д.

Ключевые слова: атомная энергетика, вычислительная гидродинамика, суперкомпьютерные технологии, тепломассообмен.

1. Введение

За время развития атомной отрасли были использованы различные экспериментальные и расчетные методы изучения течения и теплообмена теплоносителя в установках: масштабные и полномасштабные экспериментальные стенды, данные с действующих блоков, расчеты с помощью системных и ячейковых кодов. Однако каждый из приведенных способов исследования имеет свои особенности, например при создании масштабных стендов практически невозможно добиться соответствия по всем критериям подобия, учесть все конструктивные детали реальной установки и смоделировать натурные теплотехнические условия (давление, температура). С другой стороны данные с действующих блоков жестко ограничены проектом по количеству и месторасположению измерительной аппаратуры.

Результаты в области применения численного моделирования для исследования тепломассообмена, достигнутые за последние годы в ОКБ «ГИДРОПРЕСС», связаны с применением и развитием высокопроизводительных суперкомпьютеров (кластерных систем). В связи с ростом компьютерных ресурсов за последние 15 лет одним из главных инструментов по расчетному изучению тепломассобмена для однофазного течения стала вычислительная гидродинамика (CFD). Польза от применения CFD-технологий при проектировании реакторных установок (РУ) заключается в возможности на базе ограниченного количества экспериментальных данных детально исследовать процессы тепломассообмена в установке с целью подтверждения или модернизации конструкторских решений на передовом научно-техническом уровне. Фактически, CFD-модель представляет собой виртуальный аналог моделируемого объекта исследования (экспериментальный стенд, реактор и т.д.). Важно также отметить, что применение CFD-технологий на этапе планирования эксперимента позволяет более эффективно проводить физическое моделирование. Однако стоит отметить, что временные затраты на получение численного решения, стоимость расчета и наличие нормативных ограничений на применение вычислительной гидродинамики в атомной отрасли, ограничивают использование CFD-технологии для расчетного обоснования РУ.

В настоящее время типичная размерность сеточной модели для большинства реакторных задач атомной энергетики составляет более 200 млн. расчетных ячеек, для решения которых требуется проведение расчетов на суперкомпьютерах с количеством ядер от нескольких сотен до нескольких тысяч (указаны основные ресурсы, используемые в ОКБ «ГИДРОПРЕСС»). Для моделирования процессов гидродинамики и тепломассообмена, в основном, используются к-ε и к-ω модели турбулентности, иногда используется масштабно-адаптивная модель (SAS), а в ряде случаев моделирование проводится при помощи метода крупных вихрей (LES).

В данной статье приведены некоторые решенные в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» ресурсоемкие задачи, требующие высокопроизводительной вычислительной техники, для решения которых применялись CFD-технологии.

В настоящее время в ОКБ «ГИДРОПРЕСС» CFD-технологии применяются для подтверждения имеющихся технических решений, и оптимизации элементов конструкции. Это позволяет значительно сократить сроки проведения конструкторских работ, а также выявить и устранить ошибки проектирования на ранних стадиях (на стадии разработки технического проекта РУ). Ниже представлены характерные задачи проектирования и задачи вычислительной гидродинамики и теплообмена.

2. Математическое моделирование течения в пучках твэл и ТВС

С целью дальнейшего повышения мощности РУ с ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) внедряются различные новые конструктивные решения, например, интенсификаторы теплообмена в тепловыделяющих сборках (ТВС). Они приводят к усложнению структуры потоков в активной зоне и, следовательно, повышают требования к расчетам локальных параметров потока.

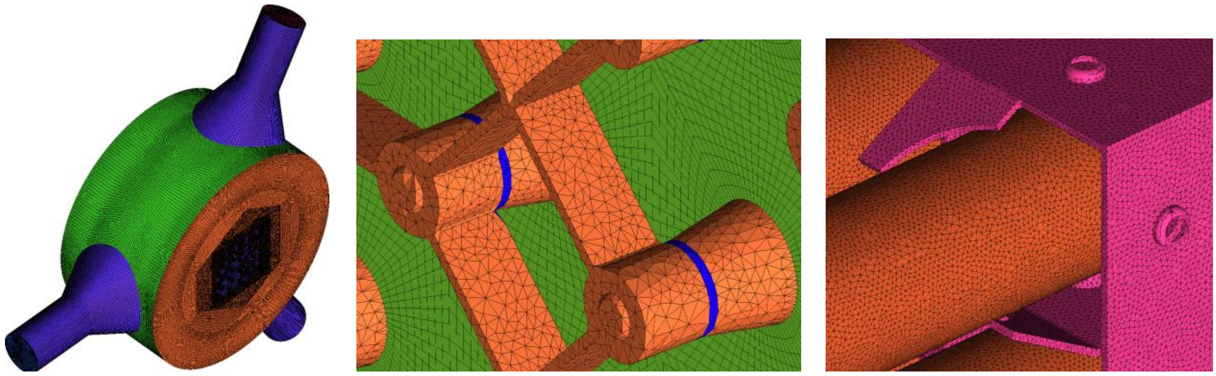
Современные вычислительные технологии позволяют моделировать структуру потока в пучках стержней с перемешивающими устройствами с высоким уровнем детализации. Однако, применение CFD-кодов к этому классу течений все ещё весьма ограниченно из-за сложной структуры течения в дистанционирующих и перемешивающих решетки, анизотропии турбулентности в пучках твэл и большой размерности задач.

В рамках международной работы по верификации CFD-моделей и разработке расчетных методик в 2011-2012 гг OECD (организация экономического сотрудничества и развития) проводился бенчмарк OECD/NEA─MATiS-H BENCHMARK [1]. Целью данной задачи было подробное моделирование структуры турбулентного потока после перемешивающих устройств с применением CFD-кодов. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными для нескольких сечений после перемешивающей решётки, полученными методом LDV (лазерная допплеровская анемометрия).

Экспериментальный участок стенда MATiS-H состоит из пучка стержней 5x5, установленного в горизонтальном положении, внешний диаметр стержня составляет 25,4 мм. Сетка расчётной области, полученная соединением сеток для всех областей вместе, состоит из 13 млн. узлов и 22,5 млн. элементов. Для моделирования использовался программный комплекс CFX 14. Фрагменты сетки представлены на рисунке 1. Результаты по моделированию пульсаций скорости (интенсивности турбулентности) представлены на рисунке 2. Сравнение полученных численных результатов с экспериментальными данными показало, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментом.

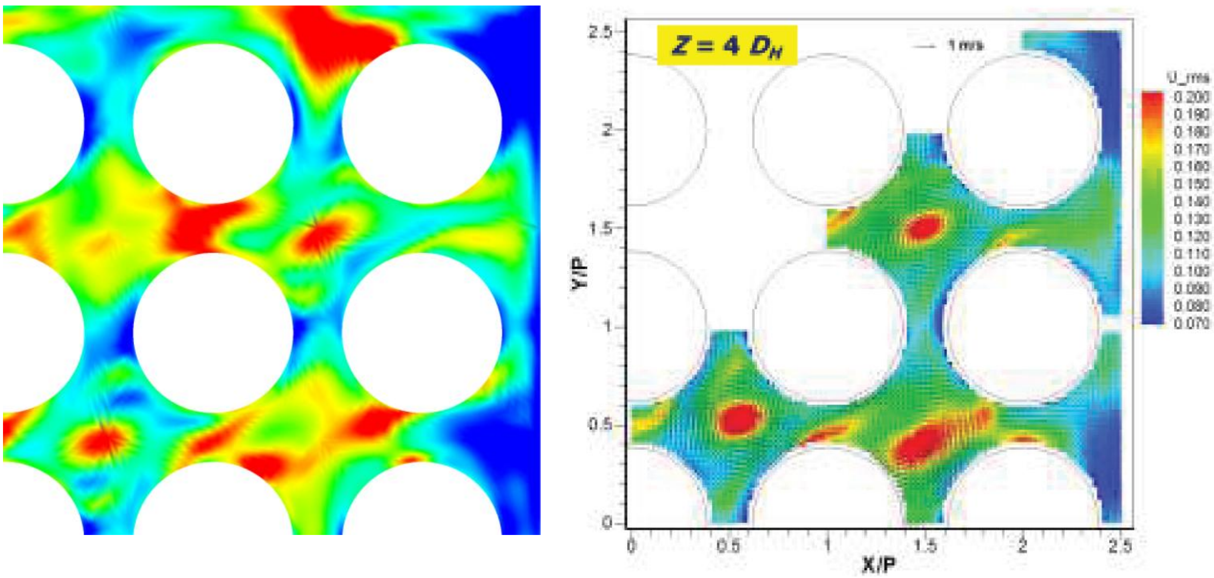
Конструкция ТВС РУ ВВЭР состоит из следующих частей: головки, пучка из 312 твэлов (тепловыделяющих элементов) и твэгов (тепловыделяющих элементов с уран-гадолиниевым топливом), хвостовика. Каркас ТВС собран из 18 направляющих каналов, 13 дистанционирующих решеток, инструментального канала и нижней решетки. При этом высота ТВС более 4,5 метров, а шаг между твэлами (твэгами) 12,75 мм. Таким образом, при моделировании процессов тепломассообмена в ТВС, при построении сетки необходимо разрешать миллиметровые зазоры на масштабе нескольких метров.

В ОКБ «ГИДРОПРЕСС» разработана модель ТВС, размерностью около 1 млрд. расчетных ячеек. При этом для получения стабильного численного решения используются двухпараметрические к-ε и к-ω модели турбулентности. Применение подобных моделей приводит к тому, что в численном расчете температура стенки может быть несколько завышена относительно реального значения. Применение двухпараметрических моделей турбулентности позволяет проводить расчеты на сеточных моделях с соотношением сторон до 1:10. Применение моделей рейнольдсовых напряжений или моделей крупных вихрей позволяет изучить детальнее структуру потока с наличием вторичных течений в ТВС. Однако для применения данных моделей требуются изотропные сетки с соотношением сторон близким 1:1, а также более детальное измельчение сетки, что приведет к увеличению количества расчетных ячеек на несколько порядков. Такой подход применяется для изучения процессов тепломассообмена в отдельных элементах ТВС.



а) выходной коллектор б) опорная решетка в) перемешивающая решетка

Рис. 1. Фрагменты расчетной сетки



а) расчет б) эксперимент

Рис. 2. Поля пульсаций продольной компоненты скорости в сечении за решеткой

В ОКБ «ГИДРОПРЕСС» подобные расчеты выполняются с применением суперкомпьютерных вычислительных систем, одна из которых насчитывает 40 вычислительных узлов. На каждом узле установлено 2 процессора Intel Xeon E5-2698 v4 2.2 Гц и 128 Мб оперативной памяти. Общее количество вычислительных ядер – 1600, общее количество оперативной памяти – 5 Тб. Характерное время счета 5000 итераций модели ТВС составляет около 5 суток. Занимаемый объем оперативной памяти – 3 Тб. Следует отметить, что расчетная сетка модели ТВС в области дистанционирующих решеток состоит из многогранных ячеек с выделением призматических слоев вблизи стенок расчетной области. В области твэльного пучка, вдали от дистанционирующих решеток, расчетная сетка состоит из призматических слоев, полученных методом экструзии.

Пример определения гидравлического сопротивления дистанционирующих решеток по длине ТВС в безразмерных координатах представлен на рисунке 3.

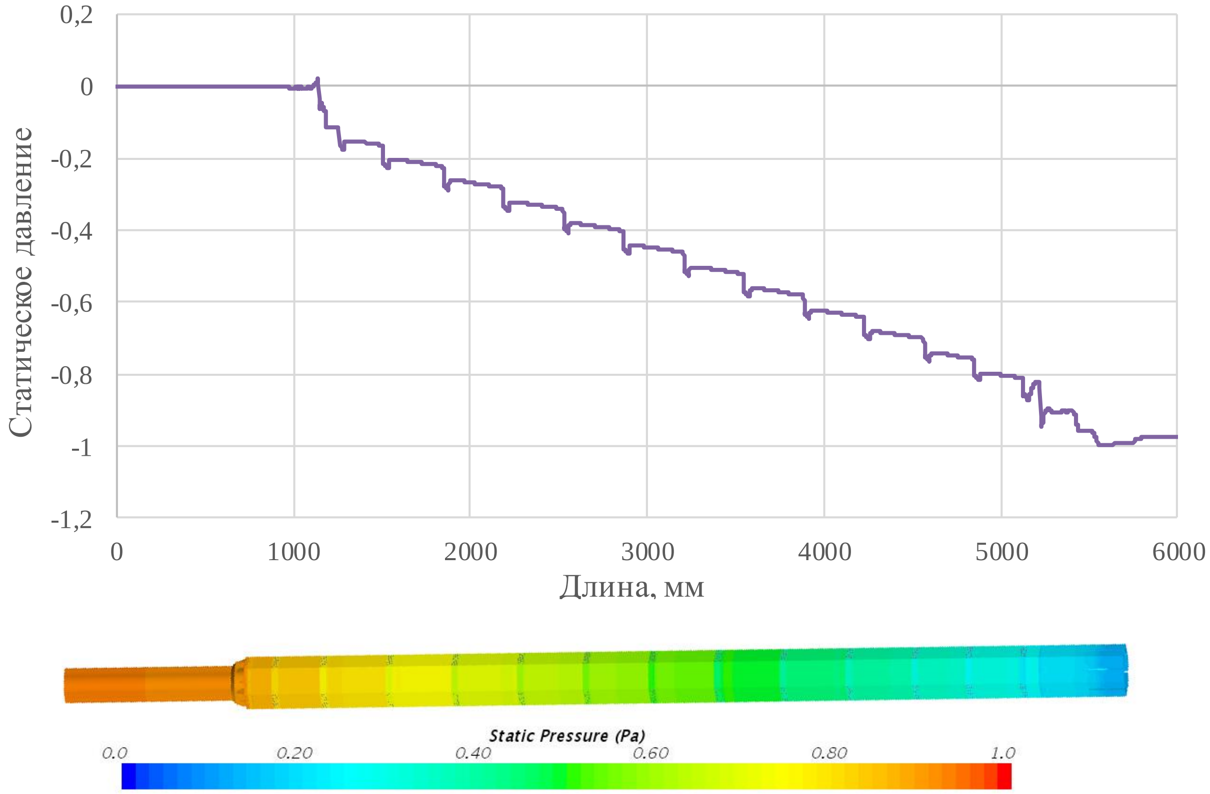


Рис. 3. Изменение статического давления по длине ТВС (значения приведены в нормированном виде)

3. Математическое моделирование процессов тепломассоообмена в оборудовании РУ

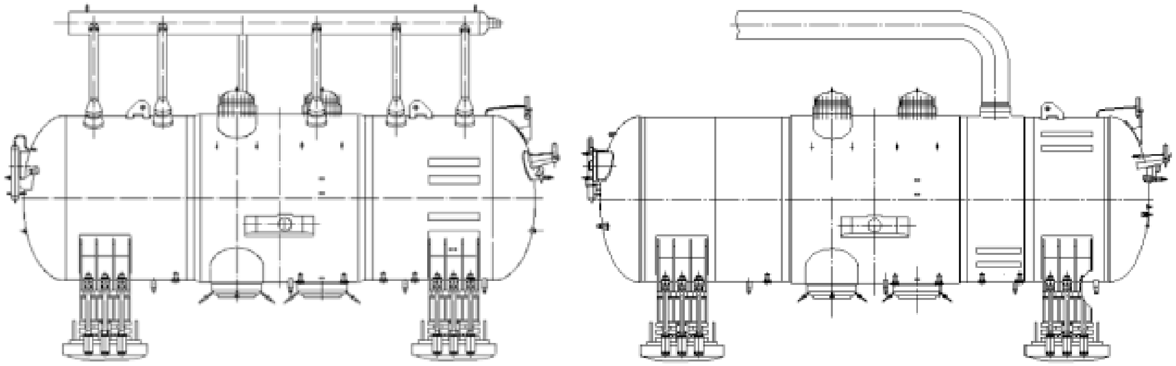
Парогенератор ПГВ−1000МКО, разработанный в рамках проекта ВВЭР−ТОИ, имеет референтную конструкцию по отношению к проектам АЭС−2006 и серийной установке с реактором ВВЭР-1000 за исключением системы отвода пара из парогенератора. Отличие заключается в количестве патрубков для отвода пара, один в рассматриваемом ПГВ−1000МКО против десяти в референтных проектах. Данное конструктивное решение продиктовано особенностями компоновки РУ. Схема ПГ референтной конструкции и разработанного ПГВ−1000МКО представлены на рисунках 4а и 4б соответственно [2-4].

С целью определения степени перфорации и параметров отверстий в пароприемных дырчатых листах (ППДЛ) ПГ, обеспечивающих снижение неравномерности поля скорости пара в паровом пространстве между погружными дырчатыми листами (ПДЛ) и ППДЛ до приемлемого уровня, был выполнен комплекс оптимизационных расчетов ППДЛ парогенератора ПГВ−1000МКО с применением CFD. В рамках работ по оптимизации ППДЛ была разработана компьютерная модель парового объема парогенератора ПГВ−1000МКО с использованием программных комплексов STAR-CCM+ и STAR-CD [5, 6], которая предусматривает возможность изменения степени перфорации, толщины листов ППДЛ и распределения паровой нагрузки на входе в паровой объем. Общая размерность модели превышает 200 млн. расчетных ячеек.

В результате расчетных исследований (рисунок 5) была проведена оптимизация конструкции ППДЛ ПГВ−1000МКО с применением CFD методов и даны рекомендации по степени перфорации и параметрам отверстий в листах ППДЛ.

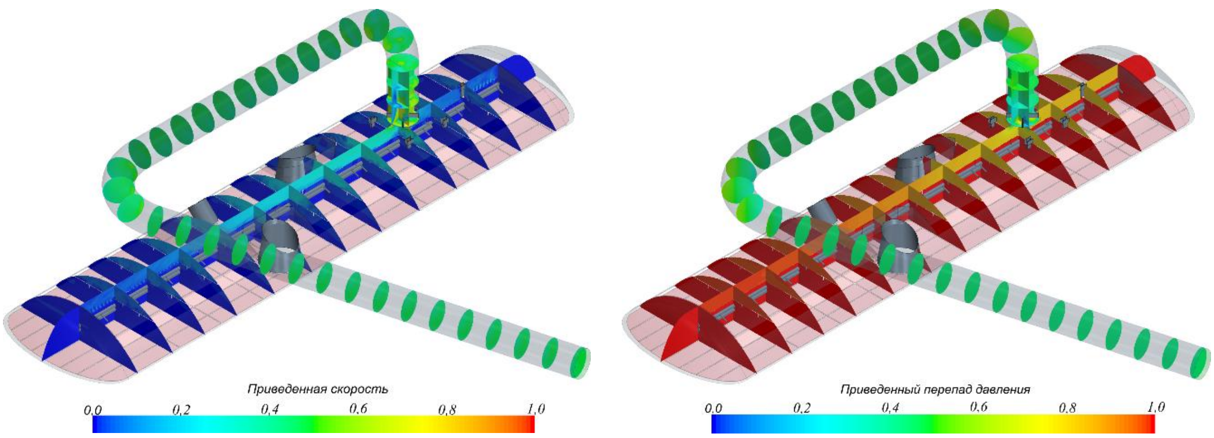
Характерное время счета 5000 итераций модели парового объема ПГВ-1000МКО составляет около 1 суток (на вычислительной системе, насчитывающей 1600 ядер). Занимаемый объем оперативной памяти – 0,5 Тб. Следует отметить, что расчетная сетка модели парового объема ПГВ-1000МКО в области ППДЛ состоит из гексаэдрических ячеек с выделением призматических слоев вблизи стенок расчетной области. В области парового объема над и под ППДЛ, расчетная сетка состоит из многогранных ячеек.

Представленное расчетное исследование позволило усовершенствовать конструкцию пароприемного устройства до начала сепарационных испытаний парогенератора на блоке АЭС. Теперь нет необходимости изготовления большого количества перфорированных листов различной степени перфорации, их монтажа, подбора и т.д. По сути, такой подход приводит к значительному сокращению объема и времени пусконаладочных работ.



а) ПГВ-1000МКП РУ АЭС-2006 б) ПГВ-1000МКО РУ ВВЭР-ТОИ

Рис. 4. Схема ПГ АЭС



а) б)

Рис. 5. Распределение модуля вектора скорости пара (а) и давления пара (б) в паровом объеме ПГ

4. Математическое моделирование процессов тепломассоообмена в РУ ВВЭР

Течение теплоносителя в реакторе сопровождается наличием трехмерных явлений, которые не могут быть в полной мере учтены при помощи одномерных инженерных подходов к численному моделированию. Особенностями оборудования АЭС является сложная геометрия проточного тракта, при этом линейные размеры отличаются на несколько порядков.

В качестве первоочередной задачи поддержки проектов РУ ВВЭР определено полномасштабное моделирование процессов смешения теплоносителя в верхней и нижней камерах реактора и процессов теплопередачи в ТВС, активной зоне и реакторе в целом. Результат проведенных расчетных исследований показывает необходимость учета всех элементов конструкции вследствие их влияния на процесс тепломассообмена [7, 8].

Расчеты с помощью CFD позволяют получить ряд теплогидравлических параметров, характеризующих работу реактора, таких как распределение расходов по тепловыделяющим сборкам на входе и на выходе из активной зоны, распределение подогревов в тепловыделяющих сборках активной зоны, коэффициенты гидравлического сопротивления элементов проточного тракта реактора и т.д. Проведено моделирование стационарных теплогидравлических процессов и сравнение с экспериментальными данными. Общий вид реакторной установки проекта АЭС-2006 поколения 3+ с реактором ВВЭР-1200 представлен на рисунке 6.

В результате работы создана CFD модель проточной части реактора ВВЭР-1200, позволяющая определять трехмерные распределения параметров теплоносителя при стационарных режимах работы реакторной установки. Общая сборка CFD модели и расчеты выполнены с использованием кода STAR-CCM+. Размерность сеточной модели составила ~700 миллионов ячеек.

Характерное время счета 5000 итераций модели реактора ВВЭР-1200 составляет около 4 суток (на вычислительной системе, насчитывающей 1600 ядер). Занимаемый объем оперативной памяти – 2 Тб. Следует отметить, что расчетная сетка модели реактора ВВЭР-1200 в области опор в нижней камере смешения и в области активной зоны состоит из гексаэдрических ячеек. В области входных и выходных патрубков, опускного участка и сборной камеры реактора, расчетная сетка состоит из многогранных ячеек.

На Рисунке 7 приведено распределение расходов через тепловыделяющие сборки на входе в активную зону, отнесенные к среднему расходу. Отклонение расчетных расходов от экспериментальных данных, не превышает 8 %.

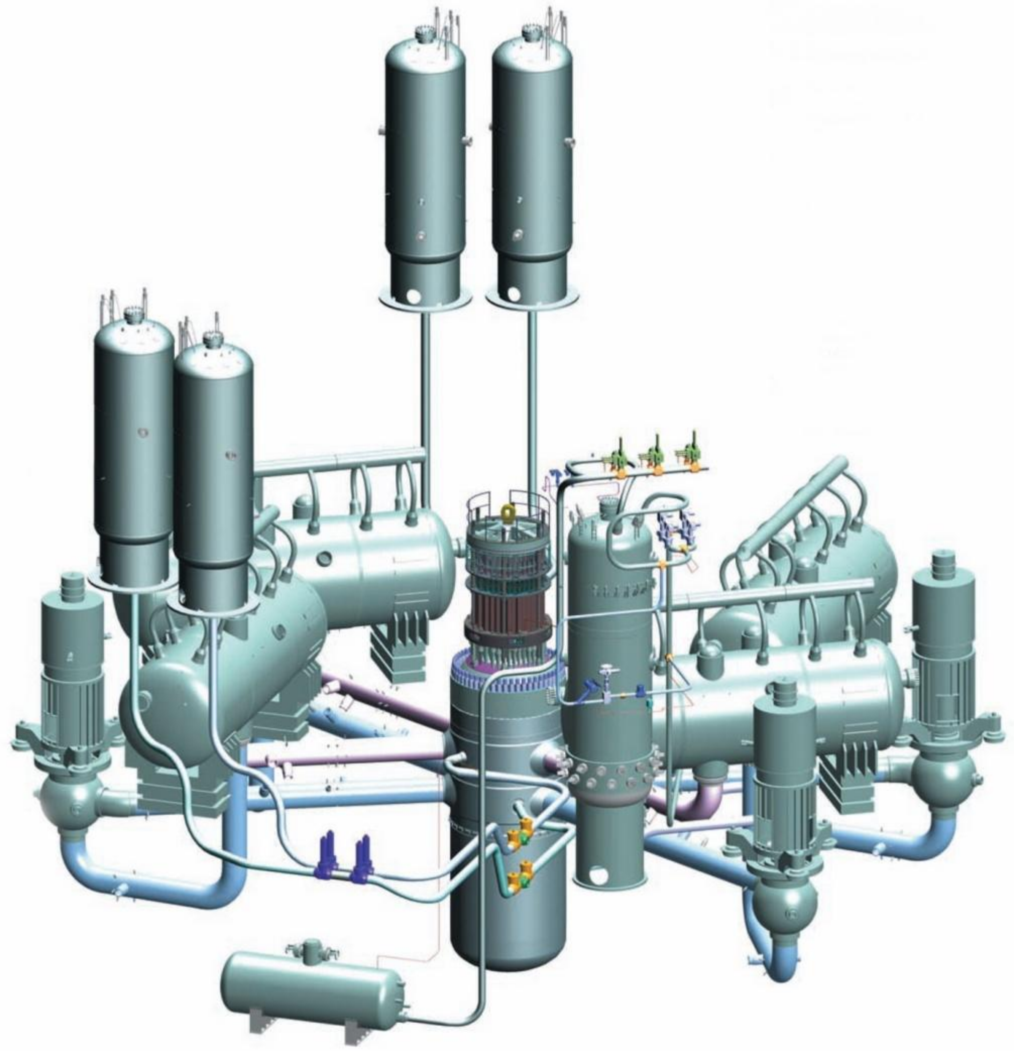


Рис. 6. Общий вид реакторной установки проекта АЭС-2006

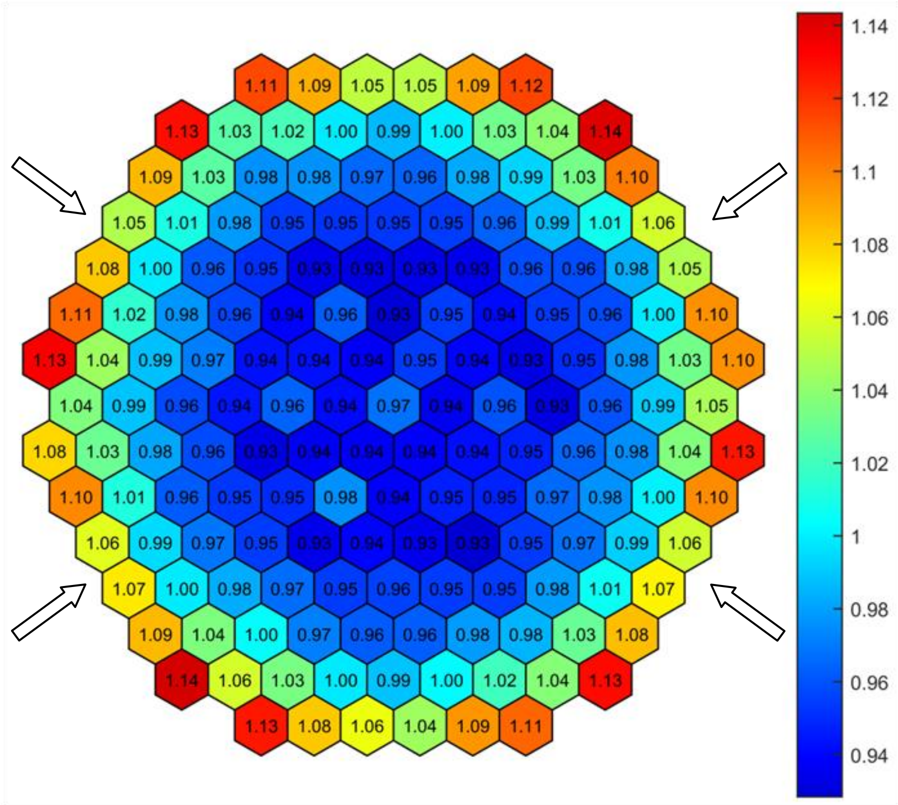


Рис. 7. Относительное осредненное по опорам ТВС распределение массового расхода на входе в активную зону

5. Обработка и анализ результатов CFD моделей большой размерности

Особенностью создаваемых CFD моделей является сложная геометрия и топология расчетной области, и как следствие большая размерность сеточной модели (порядка миллиарда контрольных объемов), что приводит к большому размеру файлов с расчетной моделью и результатами расчетов (сотни гигабайт). Таким образом, обратной стороной увеличения размерности и сложности CFD-моделей является возрастание сложности их обработки с целью последующего представления и анализа результатов.

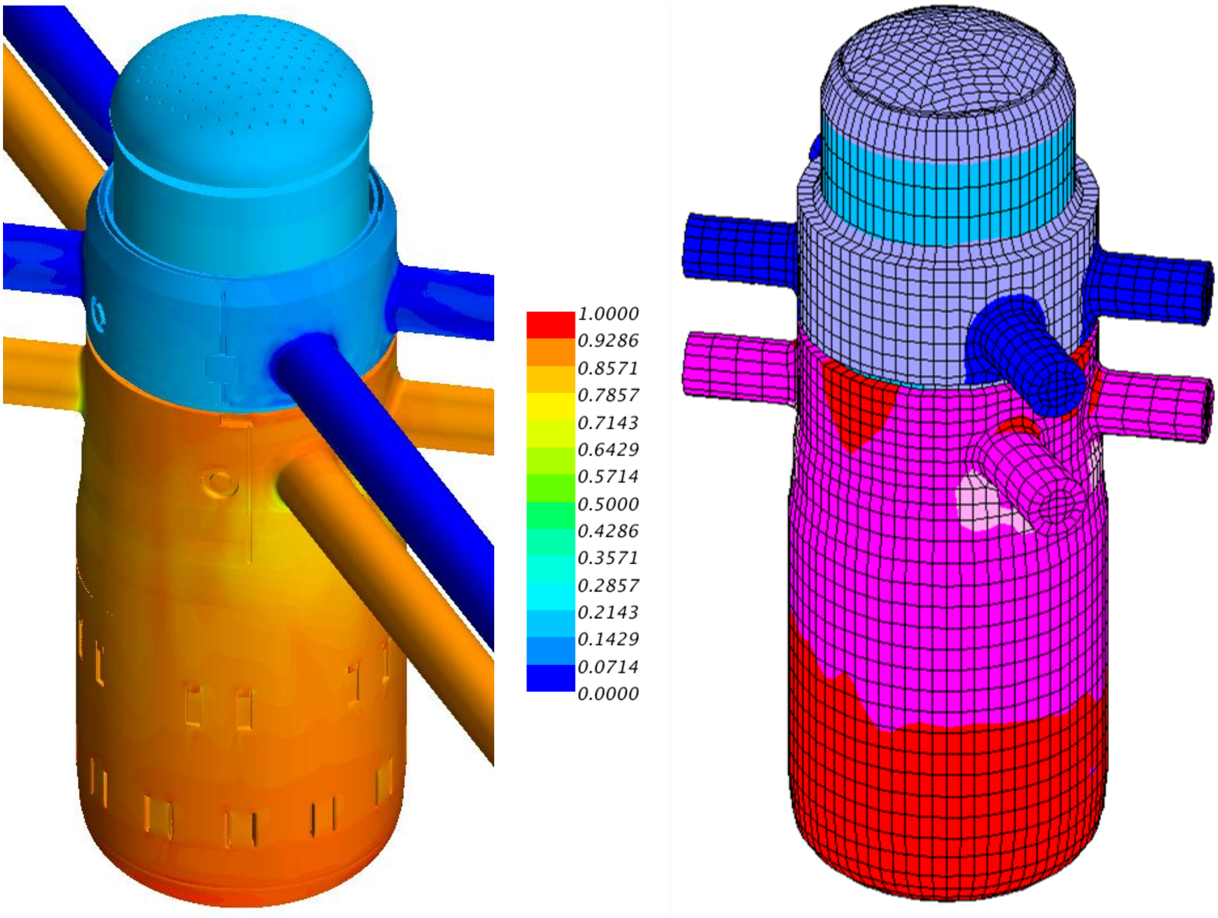
Одним из способов решения обозначенной проблемы является уменьшение размерности расчетной модели в рамках создания информационных репрезентационных нодальных моделей, на которых проводится интегральное осреднение. Эти модели создаются на базе CFD-расчета и, следовательно, обладают такой же степенью достоверности по интегральным параметрам (распределение расходов, перепады давления, подогревы и др.). Вследствие уменьшения размерности размерности нодальной модели по сравнению с исходной CFD-моделью, репрезентационная модель не отображает локальных распределений характеристик потока, что, однако несущественно при анализе процессов в рамках работы всей установки.

Для переноса данных с CFD-моделей на репрезентационные также требуются высокопроизводительные вычисления для осреднения результатов многомиллионных сеток, чтобы получить интегральные значения основных величин в объемах и по граням нодов репрезентационной модели. При этом стоит отметить, что процедура переинтерполяции данных с сетки на сетку стандартными средствами CFD кодов или не возможна или может приводить к значительным численным погрешностям нодальной модели.

При разработке репрезентационных моделей необходимо тщательно выбирать сеточную топологию, так как данная модель используется отдельно от CFD-модели и вместе с тем должна адекватно представлять проточный тракт и все необходимые теплогидравлические характеристики реального объекта. В тоже время для уменьшения количества операций интегрирования размерность репрезентационных моделей не следует завышать.

Основанная на результатах CFD расчета репрезентационная модель позволяет представлять тепломассобмен в рассматриваемой расчетной области, например в первом контуре РУ. Помимо всего подобные модели позволяют наглядно визуализировать расчетные данные, полученные при использовании различных теплогидравлических системных кодов, а также качественно и количественно сопоставлять друг с другом расчеты, полученные с помощью различных расчетных платформ.

Пример разработки подобной репрезентационной модели для РУ ВВЭР приведен на рисунке 8. В данном случае размерность расчетной сетки для CFD-модели составила примерно 700 миллионов ячеек, а размерность для репрезентационной модели составила около 25 тысяч ячеек.



а) б)

Рис. 8. CFD расчет (поле давления): а - CFD модель; б - репрезентационная модель

6. Оценка эффективности распараллеливания при моделировании процессов тепломассообмена

В заключение статьи приведен тест эффективности распараллеливания кода StarCCM+ 11.06 на задаче размерностью 1 млн. ячеек. Расчеты проводились на узлах вычислительных систем, построенных на процессорах Intel Xeon E5-2670 2.6 Гц (8 ядер) и на процессорах Intel Xeon E5-2698 v4 2.2 Гц (20 ядер). Каждый узел насчитывает 2 процессора. Количество контрольных объемов, приходящихся на одно вычислительное ядро превышает 25000 (производитель кода заявляет, что эффективность распараллеливания в версии StarCCM+ 11.06 сохраняется вплоть до нагрузки 10000 контрольных объемов на вычислительное ядро). На рисунке 9 приведены зависимости коэффициента ускорения от количества ядер для двух систем, и сравнение их с линейным ростом производительности. По результатам тестирования можно сделать следующее заключение:

1. не для всех задач вычислительной гидродинамики возможно получить идеальную (линейную) эффективность распараллеливания;
2. вычислительное ядро процессора нового поколения Intel Xeon E5-2698 v4 2.2 Гц на 25% быстрее по сравнению с ядром процессора Intel Xeon E5-2670 2.6 Гц;
3. узел построенный на двух процессорах Intel Xeon E5-2698 v4 2.2Гц (40 ядер) примерно в два раза быстрее по сравнению с узлом, построенным на двух процессорах Intel Xeon E5-2670 2.6 Гц (16 ядер);
4. не смотря на большую эффективность и скорость счета, для узла, построенного на двух процессорах Intel Xeon E5-2698 v4 2.2Гц (40 ядер), рост производительности резко замедляется на количестве ядер 20 – 30 и практически отсутствует на количестве ядер 30 – 40.

Одновременно с ростом производительности новых вычислительных систем требуется и улучшение алгоритмов распараллеливания, что позволит более эффективно, быстро и дешево моделировать объекты атомной отрасли.

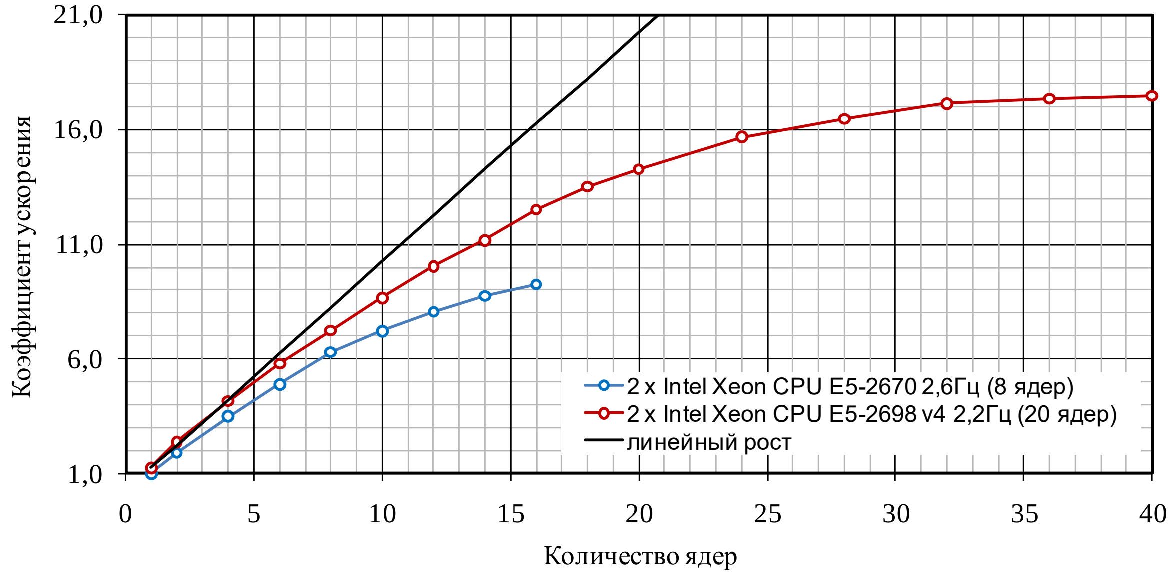


Рис. 9. Эффективность распараллеливания кода StarCCM+ 11.06

7. Заключение

При решении новых задач и разработке проектов, для которых еще не накоплены экспериментальные данные и промышленно-эксплуатационный опыт, применение суперкомпьютерных вычислений может оказаться разумной альтернативой экспериментальному изучению гидродинамических процессов и тепломассообмена в оборудовании РУ. Численное моделирование позволяет получить результат не по прошествии времени создания АЭС и отдельного оборудования, а еще на стадии технического проекта. При этом погрешности, которые имеют место при численном моделировании, сравнимы с погрешностью экспериментальных исследований и эмпирических корреляций.

Эффективность распараллеливания на реальных задачах существенно отличается от линейного роста производительности. Перед проведением серии расчетов необходимо проверять быстродействие применяемого кода на используемой суперкомпьютерной установке с целью определения количества используемых ядер на каждом вычислительном узле.

Применение суперкомпьютерных технологий для проведения разномасштабного моделирования течения теплоносителя в оборудовании реакторной установки (реактор, парогенераторы, системы первого и второго контуров) позволяет судить о перспективе использования CFD-кодов в атомной энергетике как повседневного расчетного инструмента, сокращающего длительность и стоимость работ по конструированию оборудования реакторной установки, а также повышающего качество их выполнения.

Литература

1. Валидация трехмерных моделей гидродинамических процессов в теплообменном оборудовании / Л. А. Голибродо, И. К. Вдовкина, И. Ю. Галкин [и др.] // Главный механик. — 2014. — № 8. — С. 23—25.
2. Оптимизация пароприемного устройства парогенератора реакторной установки. Высокопроизводительные вычисления на страже качества конструирования оборудования реакторной установки / А. П. Скибин, В. Ю. Волков, Л. А. Голибродо [и др.] // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности / под ред. академика В.А. Садовничего, академика Г.И. Савина, чл.-корр. РАН Вл.В. Воеводина. — М. : Издательство Московского университета, 2015. — С. 6—12.
3. Оптимизация пароприемного дырчатого листа парогенератора ПГВ-1000МКО с применением CFD / В. Ю. Волков, Л. А. Голибродо, А. А. Крутиков [и др.] // Сборник трудов 9-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». — Подольск, 2015.
4. Оптимизация пароприемного дырчатого листа парогенератора ПГВ-1000 МКО с применением CFD / В. Ю. Волков, Л. А. Голибродо, А. А. Крутиков [и др.] // Бюллетень основных научно-технических работ АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» за 2014 год. — Подольск : АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2016.
5. SIEMENS. USER GUIDE STAR-CCM+ Version 11.06, 2016. – 10082 p.
6. Methodology STAR-CD version 4.16– CD-adapco. CD – adapco Group, 2009.
7. Логвинов С.А., Безруков Ю.А., Драгунов Ю.Г. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР. М.:ИКЦ «Академкнига», 2004. 255 с.
8. В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков, О.В. Кудрявцев, Ю.Н. Надинский, А.П. Скибин // Разработка CFD модели реактора проекта АЭС-2006 Суперкомпьютерные дни в России 2016 // http://2016.russianscdays.org/files/pdf16/556.pdf.

Multi-scale problems of heat and mass transfer in nuclear industry

V. Volkov, L. Golibrodo, A. Krutikov, O. Kudryavtsev, Yu. Nadinsky, A. Nechaev, A. Skibin

OKB “GIDROPRESS”

In current report presented a review of the OKB "GIDROPRESS" results in framework of heat and mass transfer numerical modeling for objects of nuclear power plants. A number of the tasks is shown for which the modern numerical methods of the computational fluid dynamics with high-performance computing technologies were used. New possibilities of computational modeling are shown applying modern supercomputer technologies, as well as accompanying computational difficulties and problems of the results analysis. In terms of this paper considered examples of use of the CFD technology for experimental facilities and objects for different operating conditions. Presented an automated post-processing procedure of the computational results for problems with the dimension of up to 1 billion control volumes by integral parameters, such as mass flow distribution at the core inlet and outlet, temperature distribution in the core fuel assemblies, etc.

*Keywords:*nuclear energy, computational fluid dynamics, supercomputer technologies, heat transfer.

References

1. Validation of three-dimensional models of hydrodynamic processes in heat-exchange equipment/ L. Golibrodo, I. Vdovkina, I. Galkin [et al.] // Chief mechanical engineer. — 2014. — 8. — P. 23—25.
2. Optimization of the steam receiving device of the NPP steam generator. High Performance Computing for the Quality of Design of Reactor Equipment / A. Skibin, V. Volkov, L. Golibrodo [et al.] // Supercomputer Technologies in Science, Education and Industry / Ed. by Academician V. Sadovnichiy, Academician G. Savin, Corr. RAS V. Vojvodin. - M.: Publishing house of Moscow University, 2015. - P. 6-12.
3. Optimization of the steam receiving perforated sheet of the PGV-1000MKO steam generator using CFD / V. Volkov, L. Golibrodo, A. Krutikov [et al.] // Proceedings of the 9th International Scientific and Technical Conference "Safety of NPPs with WWER ". - Podolsk, 2015.
4. Optimization of the steam receiving perforated sheet of the steam generator PGV-1000 MKO using CFD / V. Volkov, L. Golibrodo, A. Krutikov [et al.] // Bulletin of the main scientific and technical works of JSC OKB "GIDROPRESS" for the year 2014. - Podolsk: JSC OKB "GIDROPRESS", 2016.
5. SIEMENS. USER GUIDE STAR-CCM+ Version 11.06, 2016. – 10082 p.
6. Methodology STAR-CD version 4.16– CD-adapco. CD – adapco Group, 2009.
7. Logvinov S., Bezrukov Yu., Dragunov Yu. Experimental substantiation of thermal and hydraulic reliability of WWER reactors. M.: IKTs "Akademkniga", 2004. 255 p.
8. V. Volkov, L. Golibrodo, A. Krutikov, O. Kudryavtsev, Yu. Nadinsky, A. Skibin // Development of the CFD model of the reactor of the NPP-2006 project // Supercomputer days in Russia 2016 // http://2016.russianscdays.org/files/pdf16/556.pdf.