

ТРЕХМЕРНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММ ТРЕХМЕРНОГО ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И СУПЕРЭВМ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

М.А. Большухин, А.В. Будников, Д.Н. Свешников, Е.А. Повеликина

Введение

В настоящее время для решения широкого круга прикладных задач проектирования и сопровождения объектов атомной энергетики активно используются программы трехмерного теплогидравлического расчета (CFD – в английской транскрипции). Использование этих программ позволяет, например, на качественно новом уровне решать следующие актуальные задачи.

1. Анализ поля температур или концентраций примеси в камерах реактора. Решение этой задачи позволяет выполнить анализ и обоснование теплотехнической надежности активной зоны в несимметричных режимах работы реакторной установки с неполным составом оборудования, также она важна для анализа показаний датчиков температур, по которым осуществляется работа системы автоматического управления и защиты реактора. Альтернативой расчетного анализа в этой задаче является использование консервативных подходов, существенно снижающих экономические показатели и существующих, и вновь проектируемых установок.

2. Анализ температурного состояния элементов оборудования, ресурсные характеристики которого существенно определяются постоянно действующими термоциклическими нагрузками. В любой реакторной установке имеется, как минимум, десяток единиц такого оборудования, и именно такое оборудование, как правило, определяет ресурсные характеристики установки в целом. Возможность расчетного анализа температурного состояния конструкций такого оборудования позволяет оперативно находить решения по оптимизации, максимально снижающие негативное влияние термоциклики. Ранее оптимизация конструкции осуществлялась по результатам длительных и чрезвычайно дорогостоящих ресурсных испытаний.

Актуальность внедрения и использования CFD программ в атомной энергетике подтверждается и большим числом действующих в этой области международных программ. К наиболее авторитетным и представительным можно отнести программу, координируемую Международным Агентством по Атомной Энергетике (МАГАТЭ) и Организацией Экономического Сотрудничества и Развития в Европе (OECD), в рамках которой проводятся уже ставшие традиционными конференции CFD4NRS (CFD для безопасности реакторных установок) и программу, координируемую правительством США - CASL. Интересно отметить, что в рамках конференций CFD4NRS проводится экспертный анализ наиболее приоритетных направлений использования CFD программ в атомной энергетике, и перечисленные выше задачи находятся в верхних строках этого рейтинга.

Характерной особенностью всех задач рейтинга является необходимость моделирования процессов смешения потоков, в условиях, когда на процессы течения существенное влияние оказывают силы плавучести, обусловленные разностью плотностей неравномерно прогретой среды. Эта характерная особенность определяет, в основном, существенную задержку начала активного внедрения CFD программ в атомной энергетике по сравнению с началом их активного (и успешного) использования в автомобильной, ракетно – космической и авиационной промышленности.

Это связано с тем, что активное коммерческое использование CFD программ началось на базе технологии усреднения исходных уравнений Навье – Стокса по Рейнольдсу, позволяющей найти не мгновенные (нестационарные), а усредненные во времени характеристики турбулентного потока. Влияние пульсационных характеристик потока на усредненные во времени описываются моделями турбулентности. Преимуществом подхода, основанного на усреднении по Рейнольдсу, является возможность решения ряда прикладных задач (например, расчета гидравлических характеристик) при существенной экономии вычислительных ресурсов.

Однако, адекватное моделирование процессов смешения потоков при использовании усреднения по Рейнольдсу невозможно, для этого необходимо использование так называемых «вихреразрешающих» методов. Общей особенностью этих методов является прямое численное моделирование вихревых структур в потоке, которые и отвечают за процессы перемешивания. Использование таких методов естественно приводит к необходимости уменьшения линейных размеров сетки, как минимум, на порядок (величина уменьшения зависит от конкретной «вихреразрешающей» модели), что приводит к увеличению вычислительных затрат на решение задачи, как минимум, на четыре порядка (с учетом четырех - мерности задачи: три пространственных координаты и время).

В настоящее время уровень развития и относительная дешевизна многопроцессорных вычислительных ресурсов оказались «почти достаточными» для решения задач атомной энергетики, что и определило высокий интерес к внедрению и использованию CFD программ.

Некоторые результаты использования CFD программ для решения конкретных прикладных задач ОАО «ОКБМ Африкантов», и характерные требования к вычислительным ресурсам приведены в настоящем докладе. Важными составляющими этих требований, на наш взгляд, являются требования к объему и длительности хранения расчетной информации, а также требования к серверам для пре – пост - процессорной обработки информации.

Учитывая, что применение «вихререзающих» методов является относительно новым направлением использования CFD, что существуют достаточно обоснованные сомнения возможности использования CFD для адекватного моделирования сил плавучести, в докладе приведены краткие, наиболее яркие результаты валидации CFD программ и технологий их использования на экспериментальных результатах, полученных в специализированной гидродинамической лаборатории ОАО «ОКБМ Африкантов».

Результаты применения CFD программ для решения практических задач

С использованием CFD выполнены расчеты смешения неизоотермических потоков в напорной камере реактора судовой реакторной установки (рис. 1) в несимметричных режимах работы. При этом получены нестационарные температурные поля на входе в активную зону реактора, предназначенные для последующего анализа ее теплотехнической надежности (рис. 2).

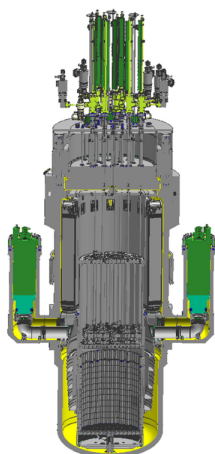


Рис. 1 Геометрическая модель судовой РУ

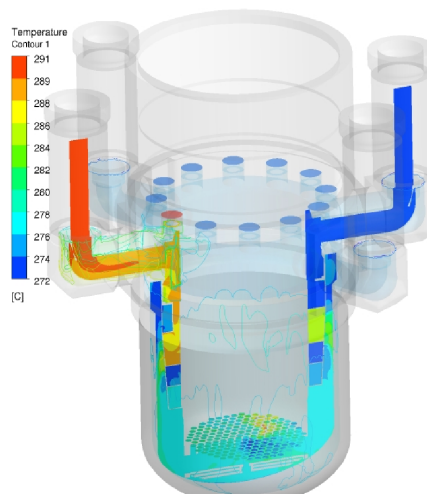


Рис. 2 Поле температур в напорной камере и на входе в активную зону судовой РУ

Размерность сеточной модели составила порядка 40 млн. элементов. Для проведения нестационарных теплогидравлических расчетов использовалось ~ 10 TFlops вычислительного поля расчетного кластера, соответственно декомпозиция задачи была выполнена приблизительно на 800 процессоров. Постановка задачи и просмотр результатов расчета осуществлялся с использованием мастер узла вычислительного кластера с 256 Гб оперативной памяти. Общая размерность файлов результатов расчета составила приблизительно 10Тб.

В качестве примера, иллюстрирующего использование CFD для расчетов температурного состояния оборудования, функционирующего под воздействием термоциклических нагрузок и определяющего ресурс РУ в докладе приведены краткие результаты расчетов теплообменника системы очистки и расхолаживания и стоек КГ и АЗ ИМ СУЗ, рисунок 3, 4 соответственно.

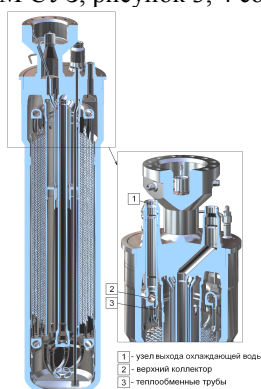


Рис. 3 Теплообменник системы очистки и расхолаживания

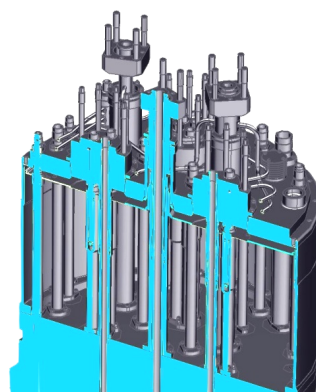


Рис. 4 Крышка реактора со стойками ИМ СУЗ

На ресурс данного оборудования оказывают существенное влияние температурные пульсации, обусловленные сложными режимами течения теплоносителя, которые реализуются в их конструктивных

элементах. С использованием CFD программ выполнены нестационарные расчеты температурного состояния данного оборудования и подготовлены данные по температурным полям для расчетов на ресурс, рисунки 5 и 6.

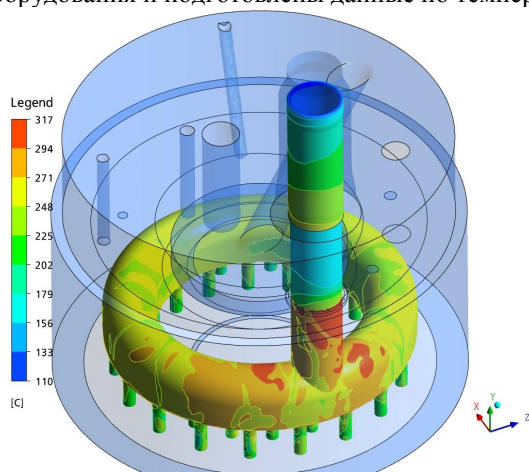


Рис. 5 Мгновенное поле температур на поверхности коллектора теплообменника

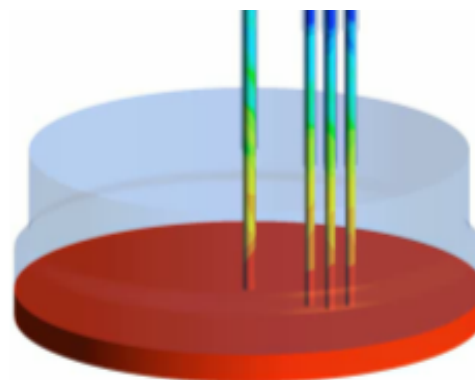


Рис. 6 Мгновенное поле температур в конструктивных зазорах стоек ИМ СУЗ.

Расчеты выполнялись с использованием супер ЭВМ, производительностью до 5TFlops, причем максимальная размерность задачи составила приблизительно 20 млн. элементов. Необходимо отметить, что для расчетов на ресурс необходимо обеспечить хранение файлов результатов расчета довольно большой размерности (приблизительно 30Тб для хранения результатов расчета одной единицы оборудования), которые используются как граничные условия для расчетов на ресурс. Соответственно хранение результатов расчета осуществлялось с использованием двухуровневой системы хранения информации (на быстрых и медленных жестких дисках).

Обозначенные в приведенных примерах решения практических задач требования к используемым вычислительным ресурсам являются “почти” достаточными. На самом деле встают вопросы более детального моделирования процессов смешения (особенно в пристеночных областях) и более комплексного моделирования оборудования, что в свою очередь существенно увеличивает требования к вычислительным ресурсам (системе хранения информации, мастер узлу для пре и пост процессорной обработки информации). Это обстоятельство как раз и является основным сдерживающим фактором полномасштабного внедрения CFD программ в атомной энергетике.

Комплекс работ по верификации и адаптации CFD программ к учету специфики атомной энергетики

Описанные выше результаты применения CFD программ основываются на комплексе расчетных и экспериментальных работ, выполняемых в ОАО «ОКБМ Африкантов» в тесном сотрудничестве с ведущими научными коллективами РФ, и направленных на отработку и верификацию технологию применения CFD программ, обеспечивающую адекватный учет специфики атомной энергетики.

В качестве примера выполняемых работ ниже представлены краткие результаты верификационных расчетов естественной конвекции в кубической полости, заполненной дистиллированной водой, подогреваемой снизу и охлаждаемой сверху. Специфика эксперимента заключается в том, что движение сред в эксперименте осуществляется только за счет сил плавучести, обусловленных разностью плотностей неравномерно прогретой жидкости.

В результате сравнения расчетных и экспериментальных данных отмечено, что расчет не только воспроизвел структуру потока, но и с хорошей точностью воспроизвел максимальные значения скорости (рисунок 7).

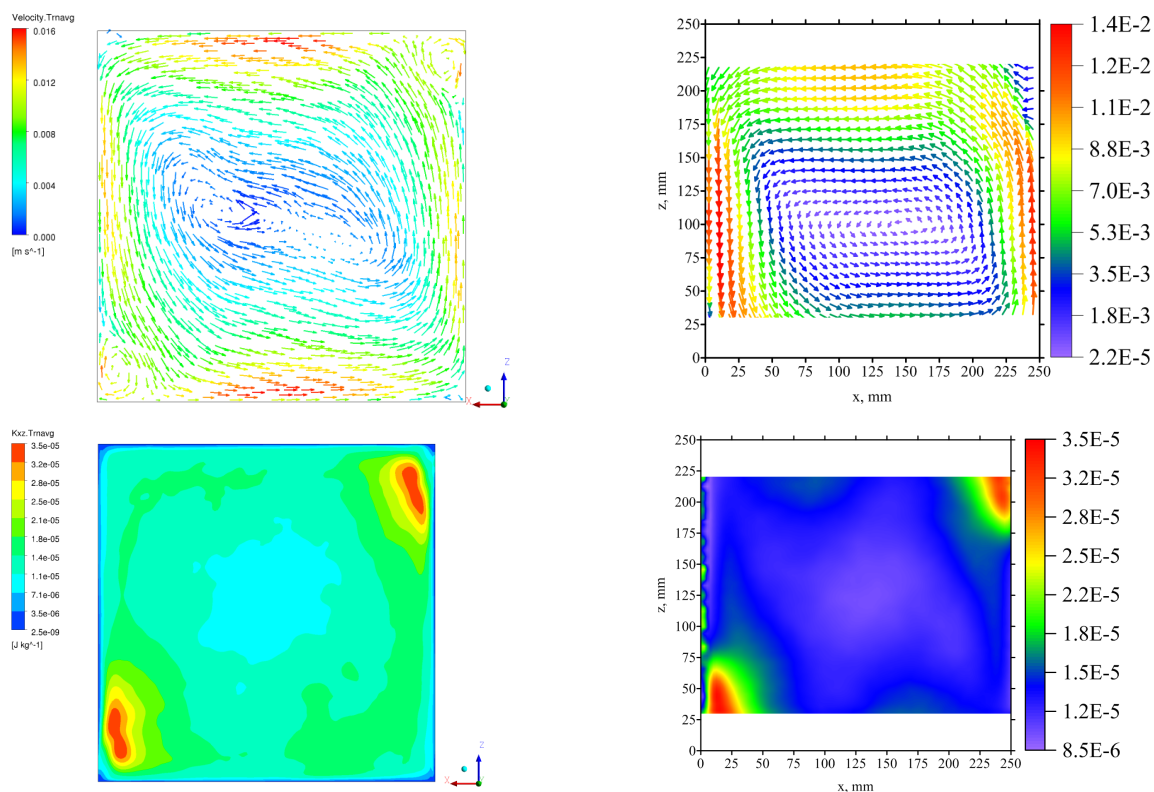


Рис. 7 Среднее поле скорости (наверху) и плотность энергии турбулентных пульсаций (внизу) в центральном вертикальном сечении кубической полости. Расчет (слева) и эксперимент (справа).

Выполненные расчеты показали, что адекватно воспроизводятся как среднее течение, так и пространственное и спектральное распределение турбулентных пульсаций.

В следующем эксперименте по смешению неізотермических потоков проанализировано влияние предыстории потока на процессы смешения. Для этого форма подводящих патрубков выполнена закругленной, рисунок 8.

В результате проведенных экспериментов видно, что в зоне смешения возникает крутка потока, которая обусловлена формой подводящего трубопровода, рисунок 9.

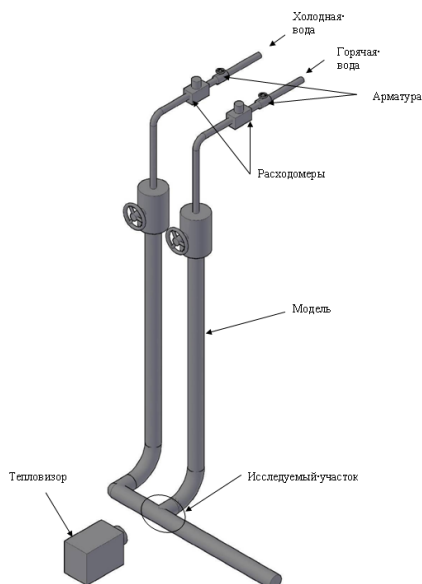


Рис. 8 Модель тройникового соединения

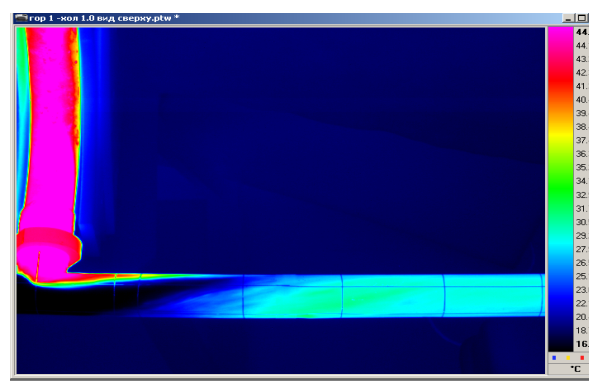


Рис. 9 Смешение потоков

Интересно отметить, что вихререзающий подход адекватно описывает структуру потока с закруткой, в отличие от стандартного RANS подхода, который лишь усредняет поля температур, рисунок 10

(приведены поля температур, полученные с использованием вихререзающей и стандартной RANS моделей турбулентности).

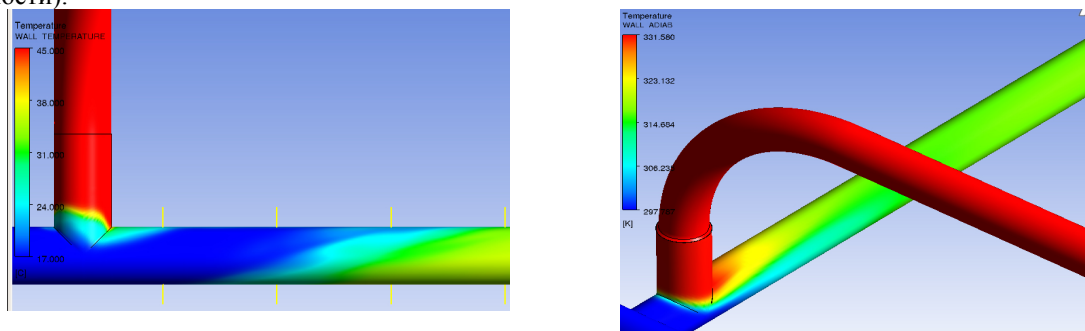


Рис. 10 Поля температур: вихререзающий подход (слева) стандартный RANS подход (справа).

Выводы

Использование CFD программ в атомной энергетике представляется чрезвычайно перспективным для решения широкого круга прикладных задач, таких как обоснования и оптимизации ресурса оборудования, функционирующего в условиях термоциклирования, анализа показаний датчиков температур, по которым осуществляется управление реакторной установкой, анализа поля температур на входе в активную зону в несимметричных режимах работы.

Для полномасштабного внедрения CFD программ в атомной энергетике необходимо обеспечение высокопроизводительными вычислительными ресурсами, имеющими в своем составе графические узлы с большими объемами оперативной памяти для пре и пост процессорной обработки и многоуровневые системы хранения информации.

В комплексе с развитием вычислительной ресурсов представляется перспективным развитие отечественных CFD программ, адаптированных к учету специфики задач атомной энергетики и обладающих высокой степенью распараллеливания. Такая задача довольно успешно решалась в рамках работ по проекту “Развитие суперкомпьютеров и грид технологий”, утвержденному Комиссией при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России. В рамках проекта предприятия атомной энергетики принимали непосредственное участие в развитии отечественного CFD кода “ЛОГОС”, при этом были оснащены компактными СупреЭВМ и получили доступ к практически неограниченным вычислительным ресурсам центра коллективного пользования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. А.В. Гарбарук, М.Х. Стрелец, М.Л. Шур “Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений”.
2. F.R. Menter, ANSYS, Germany, 2011г, “Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD”.
3. М.А. Большухин, А.Ю. Васильев, А.В. Будников, Д.Н. Патрушев, Р.И. Романов, Д.Н. Свешников, А.Н. Сухановский, П.Г. Фрик Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов, обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике // «Вычислительная механика сплошных сред», г. Пермь, том 5, №4, октябрь - декабрь 2012 – 469с.