

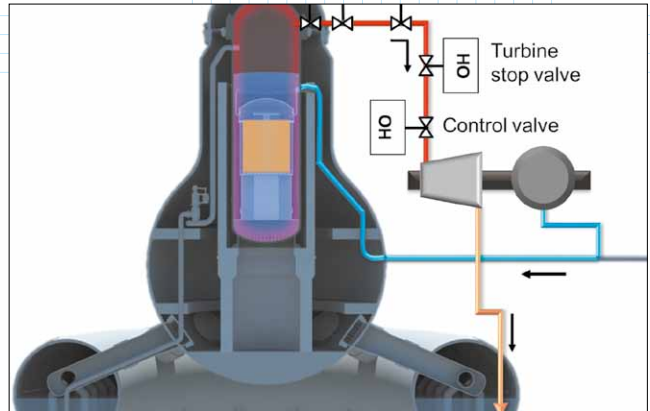
Создание цифрового двойника АЭС на основе вычислительной теплогидравлики

А.А. Рябов, А.П. Скибин, В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков, О.В. Кудрявцев

В настоящее время развитие различных отраслей науки и техники, таких как наземные, водные, воздушные транспортные средства, космические аппараты, энергетические установки, машиностроительное оборудование, объекты гражданского строительства, добычные комплексы и трубопроводы, сложные научно-исследовательские установки и т. д. характеризуется постоянно возрастающими требованиями по эффективности, надежности и безопасности эксплуатации. Это ставит перед разработчиками весьма сложные задачи, вызывает необходимость поиска и реализации порой принципиально новых, глубоко обоснованных инженерных решений, правильность которых должна быть надежно подтверждена. Очевидно, что с усложнением техники проверка новых технических характеристик путем прямых экспериментов удлиняет процесс проектирования, требует значительных материальных затрат. В ряде областей (таких, например, как атомная энергетика и авиастроение) решение проблем безопасности новых изделий порой принципиально невозможно из-за неприемлемого негативного воздействия на окружающую среду, сопряжено с весьма высокими человеческими рисками.

Наилучшим средством решения проблем проектирования новых изделий с повышенными характеристиками по эффективности, надежности и безопасности являются современные компьютерные технологии инженерного анализа, обладающие двумя существенными преимуществами. Во-первых, они позволяют значительно экономить время и средства на разработку, а во-вторых, дают возможность в сжатые сроки проводить высокоточный анализ множества технических решений с целью поиска оптимального варианта изделия уже на этапе проектирования.

С середины 1960-х годов для расчетных исследований в атомной отрасли начали применяться системные коды для схематического описания



Анализ системы безопасности станции «Фукусима» при помощи Simcenter STAR-CCM+

реакторных установок (РУ) и моделирования их характеристик. Основной проблемой при использовании системных кодов была необходимость использования большого количества экспериментальных данных, что в свою очередь приводило к увеличению расходов на проектирование в связи с задействованием сторонних предприятий для проведения экспериментальных исследований (в случае отсутствия собственной производственной и экспериментальной базы). Однако в начале 2000-х годов МАГАТЭ обратило внимание на **CFD**-технологии (*Computational Fluid Dynamic* – вычислительная гидродинамика), в основе которых лежит решение уравнений Навье-Стокса численными методами, и поддержало развитие и совершенствование данной технологии.

Компьютерные технологии поднимают инженерный процесс на новый уровень, позволяя моделировать системы, прогнозировать поведение продукта в реальных условиях еще до создания опытного

ООО «Саровский Инженерный Центр» (СИНЦ) был создан в Технопарке «Саров» в 2006 году для эффективного внедрения современных компьютерных технологий, проектирования новых изделий и практического решения широкого круга прикладных задач прочности и тепломассопереноса. Специалисты компании обладают многолетним опытом сотрудничества с российскими и зарубежными предприятиями атомной энергетики, авиационно-космического комплекса, автомобилестроения и судостроения, машиностроения, нефтегазовой промышленности, гражданского строительства и других наукоемких отраслей промышленности.



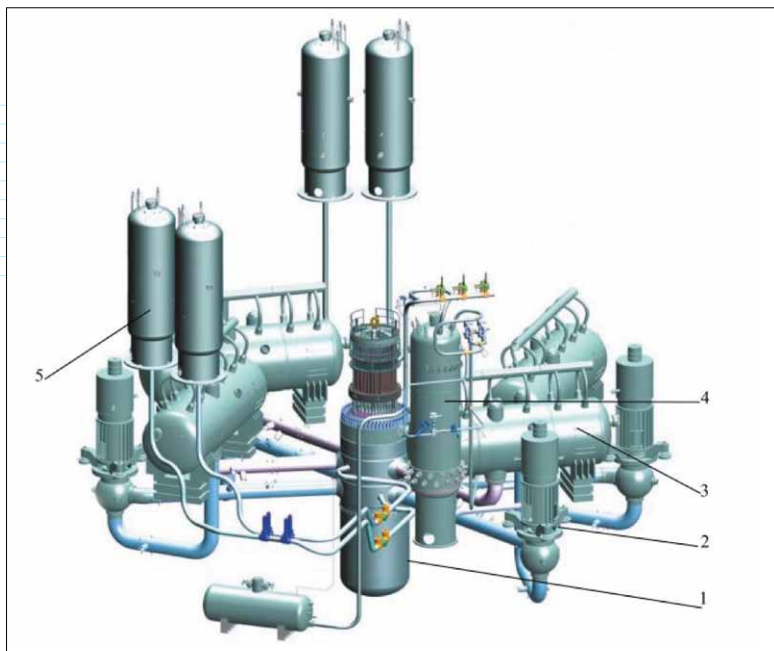
образца, а также быстрее принимать конструкторские решения по оптимизации создаваемых моделей. Однако, при их использовании неизбежно возникает вопрос о достоверности численных результатов, описывающих поведение нового объекта, особенно в экстремальных условиях, характерных для возможных аварийных ситуаций, обусловленных повышенными требованиями по безопасности.

В Саровском Инженерном Центре (СИНЦ) выработан подход к подтверждению достоверности моделирования, основанный на анализе сходимости дискретных моделей, на обоснованном выборе уравнений состояния подвижных сред и деформируемых тел, а также критериев прочности в условиях сложного напряженного состояния. Адекватность такого подхода, как правило, подтверждается близостью численных и экспериментальных результатов модельных опытов, максимально точно отражающих физические процессы в реальных изделиях. Надежность выработанного комплексного подхода многократно подтверждена на практике в решении сложных инженерных проблем различных российских предприятий.

Simcenter STAR-CCM+

Пакет программ *Simcenter STAR-CCM+* представляет собой автономное решение для проведения расчетов в области динамики жидкости и газа, механики твердых тел, теплопередачи, динамики частиц, динамики течений, электрохимии, электромагнетизма, акустики и реологии. *STAR-CCM+* предлагает технологию точных и эффективных расчетов – с единым интегрированным интерфейсом пользователя и автоматизированными рабочими процессами, – что обеспечивает простой способ для проведения анализа и решения сложных практических задач. С помощью *STAR-CCM+* можно прогнозировать характеристики изделия, что позволяет сократить расходы на проведение экспериментального тестирования и получать необходимые данные, управляя процессом разработки изделия от начала до конца.

В атомной энергетике АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС” является одним из наиболее важных, многолетних партнеров СИНЦ. В 2008 году коллектив СИНЦ провел компьютерное моделирование аварийного падения тепловыделяющей сборки (ТВС) атомного реактора АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”. Достоверность численных результатов подтверждена модельными испытаниями динамического деформирования отдельных трубок с имитаторами



*Реакторная установка АЭС-2006:
1 – реактор; 2 – ГЦНА; 3 – парогенератор; 4 – КД;
5 – емкость САОЗ*

топливных таблеток. Комплекс выполненных расчетно-экспериментальных работ позволил уверенно обосновать надежность и безопасность конструкции ТВС. В 2011–2012 гг. в результате проведенных СИНЦ численных исследований течений теплоносителя в ТВС, доказавших прикладные возможности используемого программного обеспечения, в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС” проводится внедрение *Simcenter STAR-CCM+* для решения задач тепло-массопереноса – в том числе, для подтверждения основных технических решений проекта реакторной установки с водо-водяным энергетическим реактором (РУ ВВЭР) для АЭС-2006 (реактор ВВЭР-1200) и актуализации ВВЭР-ТОИ.

Существенным импульсом к повышению уровня технологического проектирования и создания компьютерных моделей РУ в ОКБ “ГИДРОПРЕСС” стала инициатива Правительства РФ и руководства ГК “Росатом”. В соответствии с Распоряжением Правительства Российской Федерации “Цифровая экономика Российской Федерации” и ГК “Росатом”, создание цифрового двойника АЭС является основным приоритетным направлением в повышении конкурентоспособности российских предприятий. В рамках данной инициативы удалось увеличить вычислительные ресурсы, необходимые для исследования полных детализированных моделей АЭС.

Ранее в работах с полным моделированием АЭС на основе *CFD* применялось



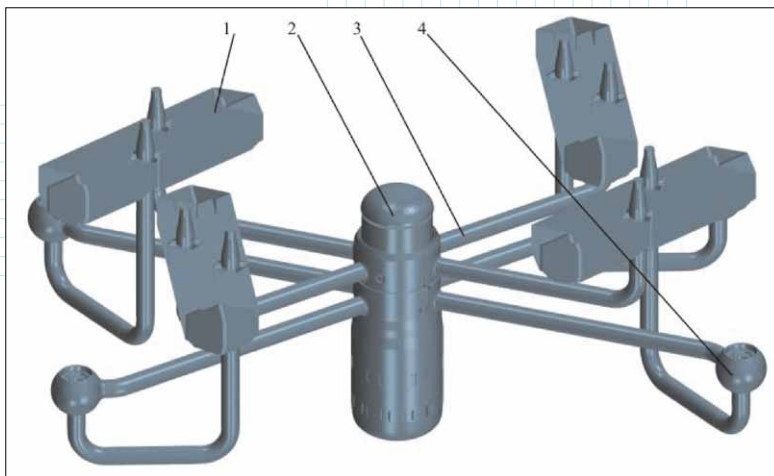
*Торец ТВС,
деформированный
в результате
аварийного падения*

достаточно сильное “упрощение” расчетной области и не моделировался главный циркуляционный насосный агрегат (ГЦНА). Опыт показывает, что упрощение расчетной области и недостаточное сеточное разрешение приводит к ошибкам даже в интегральном перепаде давления. В соответствии с мировыми тенденциями математического моделирования, специалистами АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС” впервые в атомной отрасли была создана, с применением *Simcenter STAR-CCM+*, полномасштабная *CFD*-модель первого контура РУ ВВЭР. Она включает все основные узлы (реактор, парогенераторы, главные циркуляционные насосные агрегаты, трубопроводы) и отражает все характерные особенности конструкции РУ ВВЭР без каких-либо значительных упрощений.

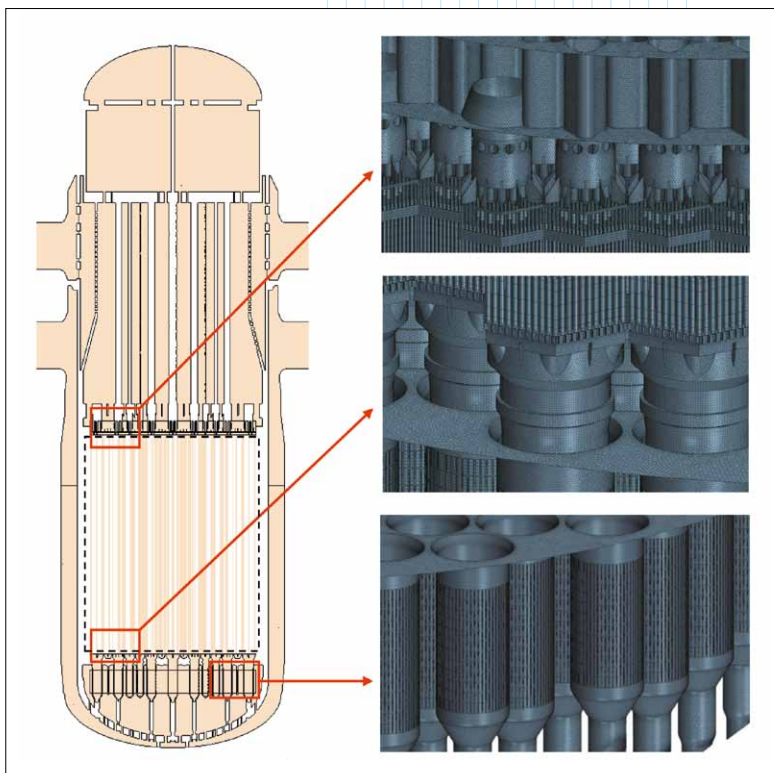
Методология моделирования первого контура РУ и его отдельных элементов разрабатывалась в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС” на протяжении нескольких лет. При создании методологии, разработке и отладке *CFD*-модели контура были учтены требования различных международных рекомендаций и стандартов. В ходе исследования применялись *CFD*-технологии для подтверждения основных принятых технических решений – на примере Нововоронежской АЭС-2, блок номер 1 с РУ ВВЭР-1200.

В рамках процедуры разработки модели первого контура были выполнены предусмотренные методологией верификационные и валидационные исследования, для чего был проведен ряд расчетов (варьируемые параметры: модели турбулентности, параметры и настройки физических моделей и т.д.). На отдельных тестовых задачах проводилось исследование достаточности сеточной модели и влияния используемых моделей турбулентности на результат. Было также проведено сравнение результатов *CFD*-расчета с проектными данными при работе установки на номинальном режиме (тепловая мощность реактора равна 100%, работают четыре ГЦНА). Для верификации *CFD*-модели использовались данные, полученные не только на экспериментальных стендах, но и в ходе выполнения пусконаладочных работ при вводе в эксплуатацию новых энергоблоков. По итогам сравнения было показано соответствие расчетных данных проектным в пределах технических допусков и погрешностей, что подтверждает корректность моделирования.

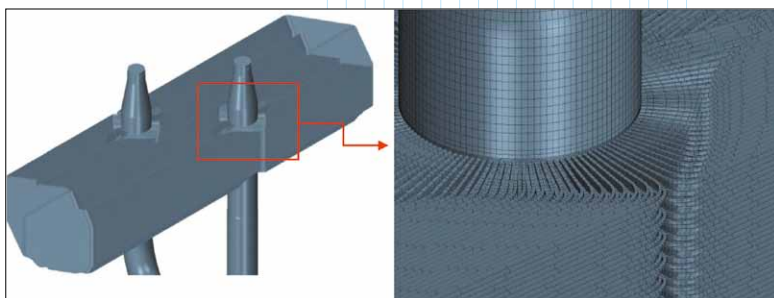
Особенность *CFD*-модели, разработанной АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, – отсутствие граничных условий по расходам и



*Реакторная установка АЭС-2006:
1 – парогенератор; 2 – реактор; 3 – ГЦТ; 4 – ГЦНА*



Сеточная модель реактора



Сеточная модель парогенератора

температурам теплоносителя в петлях, которые определяются в результате расчета, что позволяет избежать неопределенности по граничным условиям. Сложность создания такой модели обуславливается большими вычислительными затратами и необходимостью работы с задачами размерностью порядка 1 миллиарда контрольных объемов. Технологии, заложенные при создании модели в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, имеют ряд преимуществ над аналогичными иностранными разработками.

Важно отметить, что *CFD*-технологии являются универсальным и мощным инструментом. Однако, при неправильном их использовании существует вероятность получения ошибочных результатов. Поэтому, помимо мощных вычислительных систем и соответствующего программного обеспечения, необходимы высококвалифицированные специалисты в области вычислительной теплогидравлики. Для подготовки и повышения квалификации таких специалистов в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС” создан центр компетенций по *CFD*-технологиям.

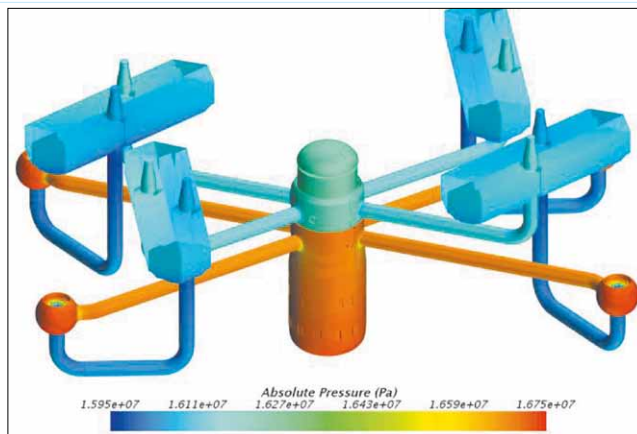
Наряду с наличием квалифицированных специалистов, которых удалось вырастить и собрать в АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС”, и наличием мощных вычислительных ресурсов, важным условием для разработки полномасштабных моделей и достижения поставленных целей является выбор эффективных программных средств инженерного анализа (*CAE – Computer-Aided Engineering*). При выборе *CAE*-пакета для создания цифрового двойника АЭС необходимо обращать внимание на следующие особенности продукта:

- в атомной отрасли при разработке проектов для зарубежных заказчиков необходимо пользоваться программным продуктом, который заслужил доверие по надежности и достоверности получаемых результатов в мировой индустрии (зарекомендовал себя за пределами РФ);
- пакет должен стабильно функционировать при работе с большими сборками при создании полномасштабной модели большой размерности;
- необходим мощный инструментарий для быстрой подготовки больших геометрических моделей к построению сетки;
- необходим параллельный генератор сеток, позволяющий быстро строить в автоматизированном режиме дискретные модели высокого качества размерностью ~ 1 млрд. конечных объемов (и более) с пристеночными слоями;
- должно обеспечиваться неограниченное и эффективное распараллеливание расчетов с возможностью использования всего доступного объема вычислительных ресурсов разработчика.

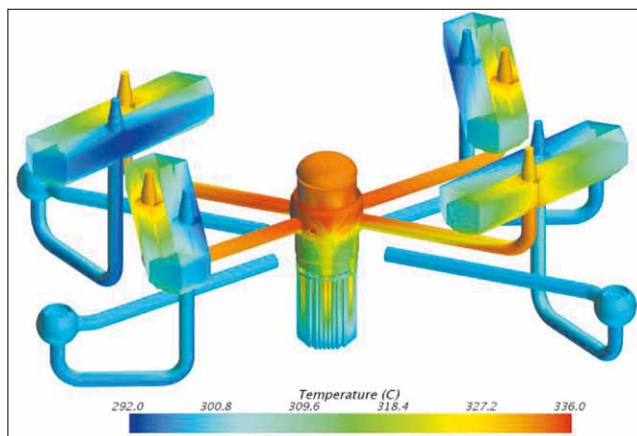
Именно сокращение затрат времени на подготовку геометрических моделей и построение сетки, обеспечиваемое в *Simcenter STAR-CCM+*, позволило АО ОКБ “ГИДРОПРЕСС” создать цифровой двойник первого контура реакторной установки в рамках сроков проектной деятельности.

Еще одним важным моментом, которому пользователи должны уделять серьезное внимание,

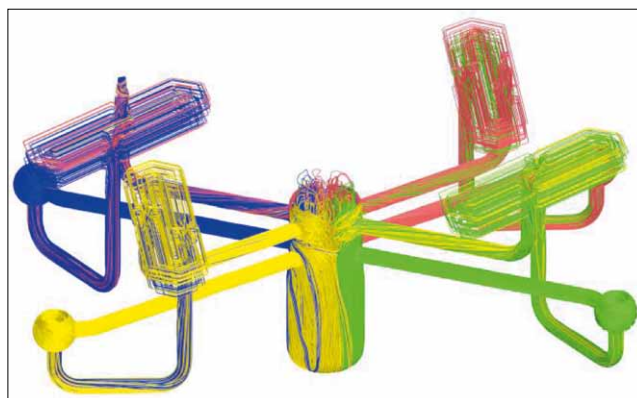
является выбор квалифицированного и надежного партнера, предоставляющего лицензии на программное обеспечение. Помимо непосредственно поставки ПО, следует обращать внимание на возможности настройки имеющегося оборудования для обеспечения удобной для пользователей, стабильной и эффективной работы *CAE*-пакета, на возможности обучения и квалифицированной поддержки при освоении пакета, получения доступа



Распределение абсолютного давления на стенках расчетной области



Распределение температуры теплоносителя в РУ (нижняя часть корпуса реактора не показана)



Траектории движения теплоносителя в первом контуре (каждому ГЦНА соответствует свой цвет)

к зарубежным технологиям проектирования. Зачастую именно эти факторы являются условием успешной интеграции новой технологии.

Разработанная модель является цифровым аналогом первого контура РУ и неотъемлемым шагом перехода к современному цифровому проектированию на базе технологии цифрового двойника реакторных установок АЭС с ВВЭР-1200 в среде управления жизненным циклом. Дальнейшее применение этой CFD-модели позволит получать локальные распределения теплогидравлических параметров теплоносителя, недоступные для прямого измерения на АЭС и моделирования другими расчетными методами, а также значительно сократить сроки разработки проекта и выявить проблемные места на ранних этапах проектирования. Кроме того, CFD-подход позволит моделировать аварийные режимы, которые постулируются при работе АЭС, но экспериментальное подтверждение которых натурными экспериментами либо невозможно, либо проводится в ограниченном объеме. Сегодня эти разработки успешно вошли в практику проектирования АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и будут применяться при создании российских и зарубежных АЭС.

Сотрудничество АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» и ООО «Саровский Инженерный Центр» (Технопарк «Саров») продолжается, активно способствуя успешному становлению цифровой экономики страны, дальнейшему плодотворному развитию российской атомной промышленности, разрабатывающей наукоемкую продукцию мирового уровня. ☺

АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» является главным конструктором в проектах создания реакторных установок с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) широкого диапазона мощности: от 300 до 1800 МВт электрических. ВВЭР относятся к самому распространенному типу легководных реакторов, в которых вода используется как теплоноситель и как замедлитель. АЭС с ВВЭР имеет множество принципиальных особенностей в том, что касается конструкции и применяемых материалов.

Об авторах

Александр Алексеевич Рябов – директор ООО «Саровский Инженерный Центр», доктор физ.- мат. наук.

Александр Петрович Скибин – начальник группы в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», к.т.н.

Василий Юрьевич Волков – инженер-конструктор I категории в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», к.т.н.

Лука Антонович Голибродо – инженер-конструктор I категории в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», к.т.н.

Алексей Александрович Крутиков – инженер-конструктор I категории в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», к.т.н.

Олег Вячеславович Кудрявцев – инженер-конструктор I категории в АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

◆ Выставки ◆ Конференции ◆ Семинары ◆

mashEX
SIBERIA

Выставка оборудования
для металлообработки
и сварки

26–28 марта 2019

Место проведения:
МВК «Новосибирск Экспоцентр»



Организатор
ITE Сибирь

Россия, Новосибирск
ул. Станционная, 104, тел.: (383) 363-00-36

Получите электронный билет
mashex-siberia.ru