

Численное моделирование движения теплоносителя в перспективном ядерном реакторе



2 Численное моделирование движения теплоносителя в перспективном ядерном реакторе

В статье обсуждается постановка задачи, обоснование и построение расчетной модели течения теплоносителя в верхней камере ядерного реактора интегрального типа БН с использованием технологий программного комплекса FlowVision-НПС. Приведены результаты моделирования по распределению скоростей и температуры. Дан их анализ.

АВТОРЫ:

ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

С.Ф. Шепелев – канд. техн. наук, заместитель главного конструктора РУ БН,
e-mail: shepelev@okbm.nnov.ru

С.Л. Осипов – канд. техн. наук, начальник отдела,
e-mail: OsipovSL@okbm.nnov.ru

С.А. Рогожкин – заместитель начальника отдела,
e-mail: birbraer@okbm.nnov.ru

ООО «ТЕСИС», г. Москва

А.А. Аксенов – канд. физ.-мат. наук, технический директор,
e-mail: andrey@flowvision.ru

М.Л. Сазонова – специалист центра технической поддержки программных продуктов,
e-mail: ms@flowvision.ru

С.А. Ткаченко – специалист центра технической поддержки программных продуктов,
e-mail: artemeva@capvidia.nnov.ru

В.В. Шмелев – руководитель центра технической поддержки программных продуктов,
e-mail: shvv@flowvision.ru

Заглянуть внутрь работающего ядерного реактора не может никто. Но инженер-конструктор должен знать, что в нем происходит. Он должен увидеть потоки теплоносителя, омывающие раскаленные ТВЭЛы задолго до создания ядерного реактора. Неоценимым помощником здесь становится суперкомпьютер, оснащенный программами, которые позволяют провести детальный расчет движения жидкости внутри реактора.

В нашей стране строится реактор будущего – безопасный, мощный и эффективный БН-800 (рис. 1). Теплоноситель этого реактора – жидкий натрий. В настоящей статье описано численное моделирование движения теплоносителя в этом реакторе с помощью самого мощного в России суперкомпьютера «Ломоносов» с использованием российской программы расчета движения жидкости и газа FlowVision [1-6].

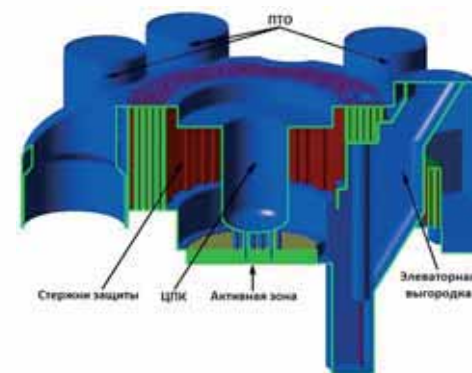


Рис. 1. Первый контур реактора интегрального типа БН-800

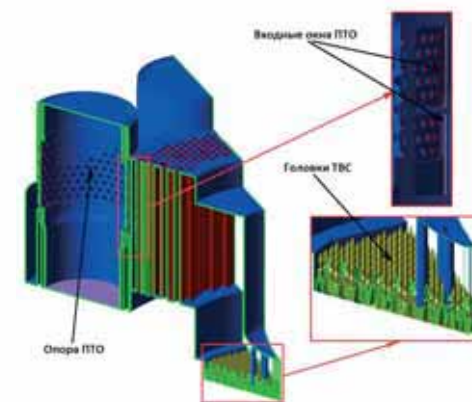


Рис. 2. Основные конструктивные элементы

Для корректного моделирования течения теплоносителя в проточной части верхней смесительной камеры (ВСК) реактора необходим учет всех основных конструктивных элементов (рис. 2), в частности головок тепловыделяющих сборок (ТВС) активной зоны и труб внутрикорпусной защиты.

Характерные размеры этих элементов много меньше размеров основной части конструкции. Следовательно, разрешение течений в соответствующих каналах требует уменьшения размеров расчетных ячеек, что приводит к значительному увеличению расчетной сетки и, соответственно, необходимости использования для расчета высокопроизводительных вычислительных ресурсов.

Моделирование течения теплоносителя выполнено для половины проточной части ВСК реактора БН-800 в силу наличия плоскости симметрии. Использована $k-\epsilon$ модель турбулентного теплообмена несжимаемой жидкости [7].

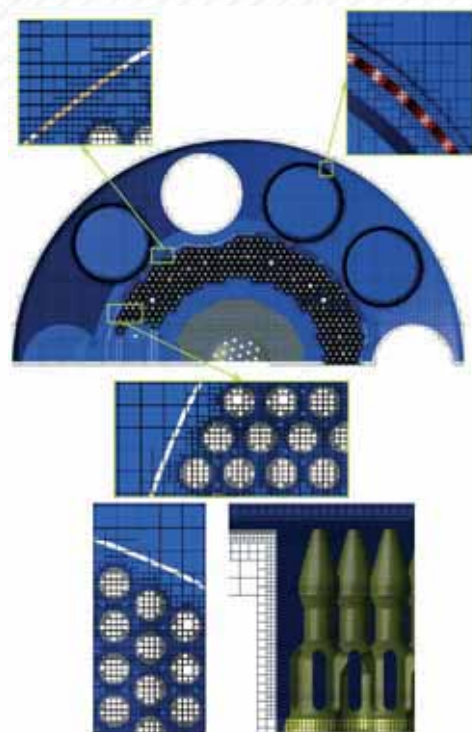


Рис. 3. Фрагменты расчетной сетки вблизи стержней защиты и головок ТВС

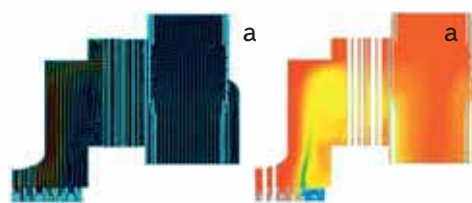


Рис. 4. а) поле скоростей; б) распределение температуры

тора имеет неоднородный характер (рис. 4, 5). Это приводит к образованию вихрей в верхней смесительной камере и к пульсации температуры, что может повлиять на температурное состояние элементов конструкции реактора и оборудования [8-9].

По результатам численного моделирования выработаны рекомендации по улучшению конструкции реактора с целью создания более однородного распре-

деления температуры в смесительной камере. В целом применение суперкомпьютеров класса «Ломоносов» помогает существенно ускорить проектирование новых ядерных реакторов и, что более важно, избежать ошибок конструкции, которые в будущем могут привести к катастрофическим последствиям.

В основе построения расчетной модели для определения полей скоростей и температур в ВСК реактора в FlowVision использована равномерная начальная расчетная сетка, позволяющая разрешить течение в основной части конструкции. Для корректного моделирования течения рабочего вещества в узких каналах расчетная сетка была дополнительно локально измельчена (адаптирована). Адаптация проводилась вблизи стенок стержней защиты и отверстий опорных обечаек теплообменников таким образом, что линейные размеры полученных ячеек стали в восемь раз меньше размеров ячеек начальной сетки (третий уровень адаптации). В объеме, охватывающем головки ТВС, выполнена адаптация пятого уровня. Фрагменты расчетной сетки приведены на рис. 3. Количество расчетных ячеек — 58 млн.

В результате моделирования получены поля скоростей и распределения температуры теплоносителя в проточной части верхней смесительной камеры реактора. Проведено исследование изменения с течением времени температуры теплоносителя в зонах расположения условных датчиков.

На основании выполненного расчетного исследования показано, что температура теплоносителя в ВСК реак-

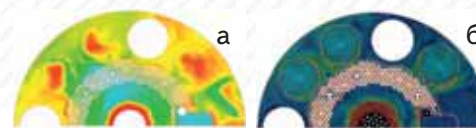


Рис. 5. Поле скоростей и распределение температуры на уровне центров нижних окон в обечайке стержней защиты: а) поле скоростей; б) распределение температуры

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Банкрутенко В.В., Будников А.В., Нетрунин И.В., Рогожкин С.А. (ОАО «ОКБМ Африкантов»), Аксенов А.А., Смирнова М.Л., Шмелев В.В. (ООО «Тесис») Сертификация системы моделирования движения жидкости и газа FlowVision // САПР и графика. – № 4. – 2006 г.
2. Aksenov A., Dyadkin A., Pokhilko V. Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method // Proc 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego. ASME PVP. – 1998. – V. 377. – № 1.
3. Аксенов А.А., Шишаева А.С. Моделирование взаимодействия деформируемой конструкции с потоком жидкости с использованием пристенных демпфирующих коэффициентов // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11. – С. 366–372.
4. Шишаева А.С., Москалёв И.В., Жлуктов С.В., Аксёнов А.А., Бабий Ю.И., Егоров И.Н., Судаков В.Г. / Оптимизация положения элементов механизированного крыла с использованием программных комплексов FlowVision-НПС и IOSO // САПР и графика, сентябрь 2010.
5. Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Соболев В.А., Шенелев С.Ф. Анализ процесса перемешивания разнотемпературных потоков теплоносителя в баке реактора БН-600 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. – вып. 3. – 2008 г.
6. Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Фадеев И.Д. Сопоставление результатов теплогидравлических расчетов по CFD кодам с данными бенчмарк-эксперимента TEFLU // Тезисы докладов научно-технической конференции «Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах (Теплофизика-2011)». ГНЦ РФ ФЭИ, 2011 г.
7. Жлуктов С.В., Аксёнов А.А., Харченко С.А., Москалёв И.В., Сушко Г.Б., Шишаева А.С. / Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision-НПС // Вычислительные методы и программирование. – 2010. – Т. 11. – С. 234–245.
8. Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Соболев В.А., Шенелев С.Ф. (ОАО «ОКБМ Африкантов»), Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Смирнова М.Л., Шмелев В.В. (ООО «Тесис») Моделирование процессов течения и перемешивания разнотемпературных потоков теплоносителя в верхней смесительной камере реактора БН-800 программным комплексом FLOWVISION // Международная научно-практическая конференция «Инженерные системы – 2009», Тезисы докладов, Москва, 6-9 апреля 2009 г., РУДН, 2009 г.
9. Осипов С.Л., Рогожкин С.А., Шенелев С.Ф. (ОАО «ОКБМ Африкантов»), Аксенов А.А., Сазонова М.Л., Ткаченко С.А., Шмелев В.В. (ООО «Тесис») Численное моделирование процесса перемешивания неизотермических потоков теплоносителя в верхней камере реактора интегрального типа // XIII Международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование», Тезисы, ФГУП «РЯЦ-ВНИИЭФ», Саров. – 2011. – С. 105–106.