

Программа «ТАНДЕМ» для Проведения Параллельных Связных Расчётов Нейтронно- Физических и Теплогидравлических Характеристик Активных Зон Реакторных Установок

И.Ю. Силантьева, Л.М. Зуева, Г.Н. Малышкин, Д.Г. Модестов, Д.В. Могиленских,
С.Ю. Мокшин, В.Г. Орлов, Е.Ю. Язова

*ФГУП Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский Научно-Исследовательский
Институт Технической Физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия*

`i.u.silantieva@vniitf.ru, d.v.mogilenskikh@vniitf.ru`

Реферат. Полномасштабный физический расчет кампании реактора включает три вида расчетов: расчеты нейтронно-физических параметров активной зоны, расчеты изменения со временем нуклидного состава топлива за счет его выгорания, теплогидравлические расчеты. В РФЯЦ-ВНИИТФ для решения задач переноса ионизирующего излучения методом Монте-Карло создана и постоянно совершенствуется программа ПРИЗМА. Для расчетов изменения со временем нуклидного состава топлива в реакторе за счет его выгорания используется модуль РИСК. Для проведения теплогидравлических расчетов активной зоны реакторной установки рассматриваются различные CFD программы. Все три вида расчетов являются взаимосвязанными. В докладе описывается технология, обеспечивающая проведение параллельных связанных расчетов нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активных зон реакторов различных типов с учетом обратных связей по температуре и плотности материалов активной зоны. Проводимые связанные расчеты для реакторных установок типа БРЕСТ, ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 показывают возможность вычисления на современных вычислительных системах теплогидравлических характеристик реактора с использованием нейтронно-физических характеристик, оцененных методами статистического моделирования.

Ключевые слова

Нейтронно-физические характеристики, ПРИЗМА, теплогидравлические характеристики, CFD коды, параллельные связанные расчеты, ТАНДЕМ.

1 Введение

Главными задачами, стоящими перед атомной энергетикой России на ближайший период, являются обеспечение высокого уровня безопасности АЭС и поддержание достигнутого уровня производства электроэнергии с последующим его ростом.

В рамках федеральных целевых и отраслевых программ в различных институтах России проводятся научные исследования и опытно-конструкторские работы (НИОКР), ориентированные на создание и внедрение новых реакторных установок с естественной безопасностью, в которых исключаются тяжелые аварии с повреждением топлива в активных зонах реакторов [1].

Активная зона (рис.1, слева) является основной частью ядерного реактора, где сосредоточено ядерное горючее, протекает цепная реакция деления и выделяется энергия. Ядерное горючее размещается, как правило, внутри тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), количество которых в активной зоне может достигать многих десятков тысяч. В конце срока службы (кампании) ТВЭЛы полностью или частично извлекаются и заменяются новыми. Для удобства загрузки ТВЭЛы собираются по несколько десятков или сотен штук в отдельные пакеты - тепловыделяющие сборки (ТВС) (рис.2, справа).

Через активную зону прокачивается теплоноситель (вода, жидкие металлы, углекислый газ), который омывает ТВЭЛы и уносит выделяющееся в них тепло для последующего преобразования тепловой энергии в электрическую.

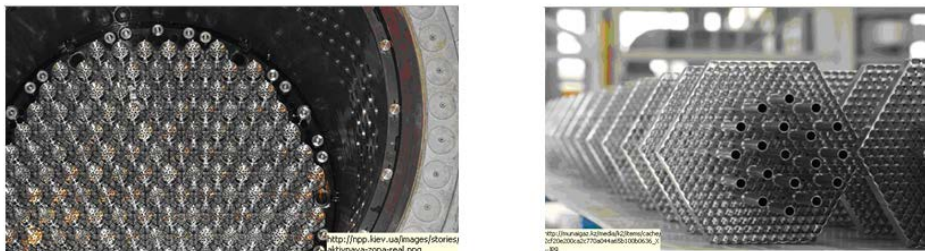


Рис. 1. Активная зона реактора (слева), ТВС с пучком ТВЭЛов (справа).

2 Расчет кампании реактора

Полномасштабный физический расчет кампании реактора включает три вида расчетов:

- расчеты нейтронно-физических параметров активной зоны: определение пространственного, энергетического и углового распределения плотности потока гамма-нейтронного излучения в реакторе в каждый момент времени и оценка построенных на его основе функционалов (скорости различных ядерных реакций) в рамках решения условно-критической задачи для уравнения переноса;
- расчеты изменения со временем нуклидного состава топлива в реакторе за счет его выгорания;
- теплогидравлический расчет активной зоны реактора, заключающийся в определении пространственного распределения температуры и плотности топлива в ТВЭЛх, температуры, плотности, давления теплоносителя, скорости его потока с учетом возможной деформации топлива и оболочек ТВЭЛов под действием термоупругих напряжений.

Для прецизионных расчетов нейтронно-физических параметров активной зоны реактора используются программы метода Монте-Карло. Благодаря возможности практически точно моделировать геометрию трехмерных систем со сложной гетерогенной структурой, погрешность их расчета в основном определяется качеством используемых библиотек ядерных данных [2]. Дополнительным преимуществом данного метода является высокая степень распараллеливания процесса расчета на современных многопроцессорных комплексах.

В РФЯЦ-ВНИИТФ для решения задач переноса ионизирующего излучения методом Монте-Карло создана и постоянно совершенствуется программа ПРИЗМА [3,4]. Для расчетов изменения со временем нуклидного состава топлива в реакторе за счет его выгорания используется модуль РИСК [5]. На рисунке 2 представлена 3D комбинаторная модель активной зоны ВВЭР-1000, используемая в расчетах программы ПРИЗМА.

Программы ПРИЗМА и РИСК написаны на языке C++, функционируют под управлением операционной системы Linux, при работе в параллельном режиме используют библиотеку MPI.

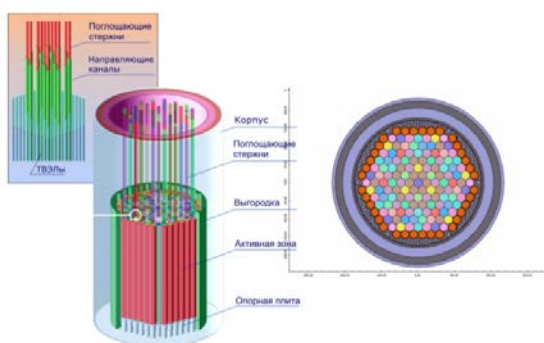


Рис. 2. 3D комбинаторная модель активной зоны ВВЭР-1000.

При расчетах нейтронно-физических параметров активной зоны реактора программа ПРИЗМА использует пространственное распределение температуры (рис. 3) и данные о плотности теплоносителя, полученные при

теплогидравлическом расчете. В качестве тепловой нагрузки в расчетах теплогидравлики задается изменяющееся по высоте активной зоны и радиусу топливного элемента энерговыделение для каждого топливного элемента тепловыделяющей сборки. Радиационное энерговыделение рассчитывается по программе ПРИЗМА.

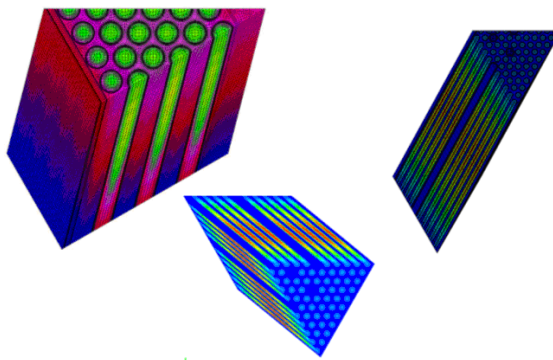


Рис. 3. Пространственное распределение температуры в ТВС реакторов разных типов.

В настоящее время существует достаточно большое число отличающихся по своим возможностям программ для расчета теплогидравлических характеристик активной зоны реактора. Все они используют сеточные методы решения уравнений в частных производных: метод конечных разностей или метод конечных элементов.

Для проведения теплогидравлических расчетов активной зоны реактора нами рассматривались:

- программа CONV 3D, разработанная в ИБРАЭ РАН [6];
- открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред OpenFOAM [7].

Теплогидравлические расчеты проводились как в однопроцессорном, так и в параллельном режимах.

Все три вида расчетов являются взаимосвязанными, то есть имеется обратная связь между изменениями нейтронно-физических, теплогидравлических характеристик активной зоны реактора и нуклидного состава топлива. Так, пространственное распределение плотности потока нейтронов и связанное с ним распределение энерговыделения зависят от нуклидного состава топлива, распределения температуры и плотности теплоносителя.

В свою очередь, распределение температуры в активной зоне определяется распределением энерговыделения в активной зоне и скоростью движения теплоносителя. Причем даже при постоянно поддерживаемом уровне мощности реактора эти распределения изменяются в течение кампании реактора за счет неравномерного по объему активной зоны выгорания делящихся нуклидов в топливе и перемещения органов регулирования реактивностью реактора.

3 Технология проведения связанных расчетов

В связи с этим возникла необходимость разработки технологии, обеспечивающей проведение связанных расчетов нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активных зон реакторов различных типов с учётом обратных связей по температуре и плотности материалов активной зоны.

Для обмена данными между программами CFD и ПРИЗМА был создан стыковочный программный модуль ТАНДЕМ, работающий в распределенном режиме. Стыковочный модуль написан на языке C# и работает в нескольких режимах. В отдельных режимах модуль выполняет обработку данных сразу же для всех ТВС, а в других - только для конкретной ТВС.

Это позволяет осуществлять обмен данными между распределенными расчетами теплогидравлики и параллельным расчетом нейтронно-физических характеристик. Кроме того стыковочный модуль в процессе подготовки данных для передачи может (при заказе во входной информации) накапливать информацию о рассчитанных температурах и плотностях в файлах специализированного формата для последующей обработки и построения графиков.

Для проведения связанного расчета был разработан скрипт для штатного интерпретатора bash системы Linux. Он представляет собой многоэтапный процесс, позволяющий проводить запуск программ, участвующих в связанном расчете, на вычислительных серверах как в параллельном, так и в распределенном режимах. Описание запуска для каждой из программ делается независимо.

Скрипт включает в себя проверку параметров запуска, подготовку необходимых файлов и директорий для расчета, контроль кодов возврата запускаемых программ. Стандартный вывод ошибок всех команд, запускаемых из скрипта, перенаправляется в стандартный вывод ошибок скрипта или в специальные файлы. Если какая-либо из программ возвращает код, соответствующий ошибке, то выдается сообщение об ошибке, и происходит останов работы всего комплекса.

Связные расчеты являются итерационным процессом (рис. 4). После каждой итерации стыковочный модуль по полученным данным о температурах в узлах сетки на текущей и предыдущей итерации принимает решение об окончании расчета. Определяется разность температур в соответствующих узлах сетки, и если она меньше значения, заданного во входной информации стыковочного модуля, то расчет считается завершенным.

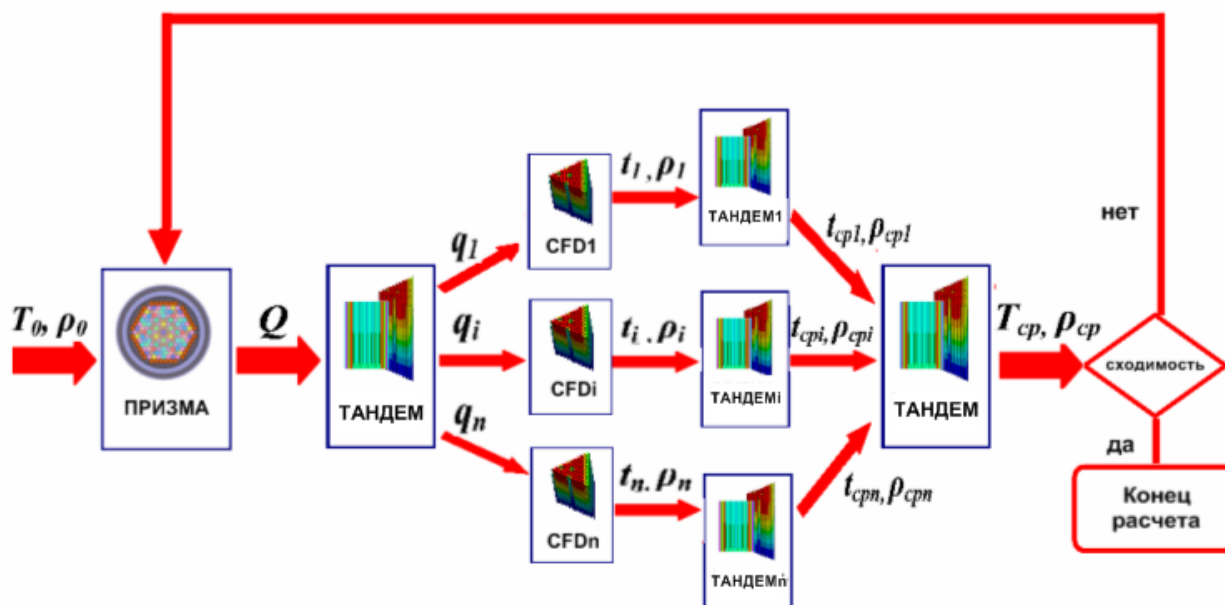


Рис. 4. Схема технологии проведения связанных расчетов.

При разработке данной технологии проведения связанных расчетов необходимо было учесть в первую очередь несоответствие задания начальных данных для программы ПРИЗМА и программ расчета теплогидравлики.

Так, в программе ПРИЗМА описывается трехмерная полномасштабная модель реакторной установки (РУ), включающая активную зону, опоры ТВС, нижнюю опорную плиту, пространство над активной зоной. Модель описывается комбинаторным теоретико-множественным методом в формате ПРИЗМА (рис. 5).

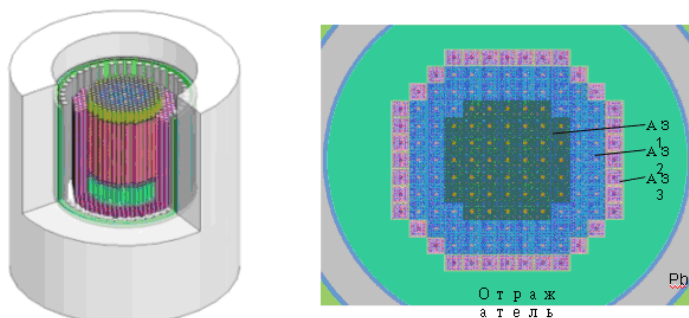


Рис. 5. 3D комбинаторная модель активной зоны РУ типа БРЕСТ.

При проведении теплогидравлических расчетов рассматривается только активная зона реактора. В ней могут находиться ТВС различных конфигураций. Соответственно, строится несколько тепловых моделей ТВС. Причем, если ТВС обладают поворотной симметрией, то в этом случае тепловая модель создается только для одной ее симметричной части. На основе геометрии моделей строятся целевые сетки из конечных элементов

(рис.6). Все подготовленные данные для каждой конфигурации ТВС записываются в соответствующие каталоги как в текстовом, так и в бинарном форматах.

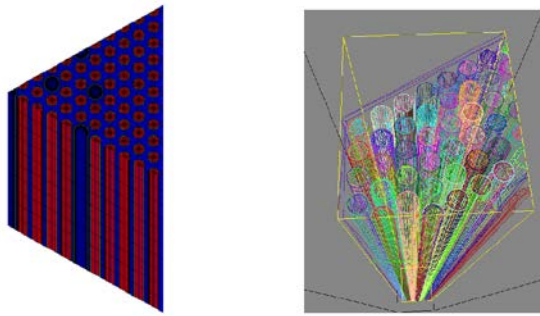


Рис. 6. Сеточные модели 1/6 ТВС РУ ВВЭР-1000 (слева) и 1/4 ТВС РУ типа БРЕСТ (справа).

Следующей особенностью проведения связанных расчетов является то, что CFD коды рассчитывают температуру и плотность в узлах сетки, а в комплексе ПРИЗМА расчеты ведутся методом Монте-Карло, поэтому расчетные сетки не используются.

Для приема сеточных данных в программе ПРИЗМА имеется возможность принимать данные с определенных интервалов по высоте рассчитываемой модели. Поэтому было принято решение разбить всю область реактора по высоте на интервалы (слои) и осуществлять обмен данными, рассчитанными для слоя.

Так, по данным расчета температуры и плотности по программе теплогидравлики рассчитывается средняя температура и плотность для каждой ТВС на каждом слое, и эти данные передаются на соответствующие слои областей программы ПРИЗМА. Аналогично, после расчета энерговыделения по программе ПРИЗМА всем ячейкам сетки программы теплогидравлики, расположенным на конкретном слое, присваивается энерговыделение с соответствующего слоя ПРИЗМЫ. Обмен данными идет на файловом уровне.

Кроме того, необходимо учитывать, что программа ПРИЗМА рассчитывает сразу же всю активную зону, а теплогидравлические расчеты проводятся в распределенном режиме для каждой ТВС в связи с невозможностью их проведения на данный момент для всей активной зоны реактора из-за очень больших объемов сетки.

Таким образом, для проведения корректных расчетов необходимо, чтобы в программах было согласовано описание геометрических объектов в одной системе координат. При отсутствии согласования (например, сдвиг объектов по осям, другое направление осей координат) во входной информации стыковочного модуля задается соответствующая информация.

Стыковочный модуль ТАНДЕМ должен согласовывать единицы измерения физических величин, используемых в разных программах и обеспечивать однозначное соответствие рассчитываемых значений параметров системы (температуры, плотности, удельной мощности энерговыделения) в узлах сетки программы теплогидравлического расчета значениям параметров в областях разбиения системы, которым принадлежат данные узлы, в программе метода Монте-Карло.

Все геометрические объекты в программе ПРИЗМА расположены в соответствующих областях. Для связи геометрических объектов CFD кодов и ПРИЗМЫ на языке C++ были разработаны функции на базе библиотеки *Geom* программы ПРИЗМА, которые служат для определения принадлежности точки пространства из CFD кода области реакторной зоны программы ПРИЗМА.

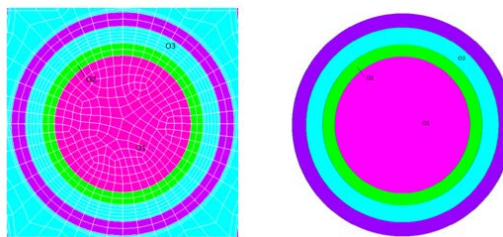


Рис. 7. Соответствие областей в канале, заданном в программах CFD (слева) и ПРИЗМА (справа).

4 Передача данных для связанных расчетов

Передача данных для связанных расчетов нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активных зон реакторов различных типов с учётом обратных связей по температуре и плотности материалов активной зоны проводится поэтапно.

I этап

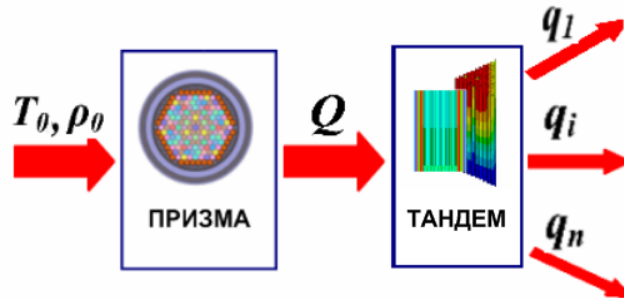


Рис. 8. Передача данных по энерговыделению.

При проведении теплогидравлических расчетов в качестве тепловой нагрузки используется рассчитанное по программе ПРИЗМА радиационное энерговыделение. Программа ПРИЗМА рассчитывает энерговыделение на каждом слое для каждой ТВС.

Стыковочный модуль для всех ячеек тепловой модели, центры которых расположены на конкретном слое каждой ТВС, устанавливает значение энерговыделения соответствующего слоя (рис.8). Для этого проводится расчет плотности скорости энерговыделения в точке, находящейся в i -ом пространственном элементе (слое) ТВС по формуле:

$$q_i = \frac{W}{V_i} \frac{Q_i}{\sum_k Q_k},$$

где W – тепловая мощность реактора, V_i – объём топлива на i -м слое ТВС, Q_i – энерговыделение для ТВС на i -м слое, $\sum_k Q_k$ – суммарное энерговыделение реактора по всем ТВС. Расчет проводится только для слоев, на которых располагается ТВС. Таким образом, для всех ячеек каждой ТВС, находящихся на одном слое, плотность скорости энерговыделения будет одинаковой.

II этап

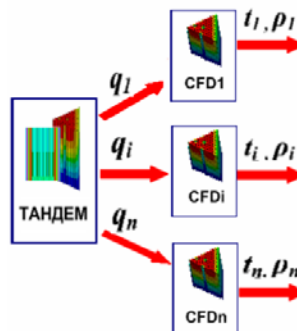


Рис. 9. Передача данных для теплогидравлических расчетов.

Теплогидравлические расчеты проводятся в распределенном режиме для каждой отдельной ТВС (рис.9). Стыковочный модуль создает каталоги, куда переписывается информация, необходимая для расчета теплогидравлики. При этом учитывается расположение ТВС различных конфигураций в соответствии с заданной картограммой активной зоны реактора.

Количество каталогов определяется числом ТВС, составляющих активную зону. Также в соответствующие каталоги записываются рассчитанные программой ПРИЗМА и преобразованные стыковочным модулем данные об энерговыделении. По рассчитанному энерговыделению в топливе проводится расчет температурного поля конструкции. Эти расчеты ведутся с помощью выбранной программы теплогидравлики и могут проводиться как в однопроцессорном, так и в параллельном режимах.

Результаты теплогидравлического расчета (значения установившихся температур и плотностей в каждом узле конечно–элементной модели с координатами x, y, z) каждой ТВС в текстовом формате передаются в стыковочный модуль, который формирует информацию о температуре и плотности для всех областей и слоев конкретной ТВС.

III этап

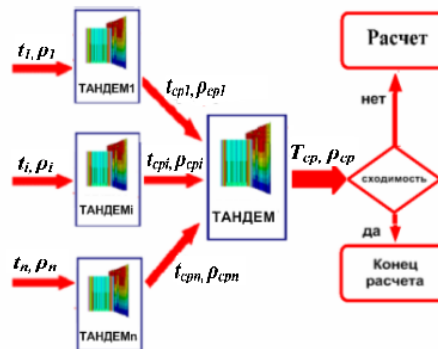


Рис. 10. Передача данных для расчетов по программе ПРИЗМА.

После того, как для всех ТВС будет проведен расчёт стационарного теплогидравлического состояния по программе CFD, стыковочный модуль осуществляет проверку на сходимость. Определяется разность температур в соответствующих узлах сетки на текущей и предыдущей итерациях связаного расчета. Если она меньше значения, заданного во входной информации программы ТАНДЕМ, то расчет считается завершенным. В противном случае стыковочный модуль формирует входную информацию для расчёта энерговыделения по программе ПРИЗМА, используя температуру и плотность теплоносителя, рассчитанные программой CFD (рис.10). Стыковочный модуль обрабатывает данные о температуре и плотности в два этапа.

На первом этапе программа ТАНДЕМ запускается в распределенном режиме и обрабатывает данные о температуре и плотности, подсчитанные для каждой конкретной ТВС. Она согласовывает описание геометрических объектов программ в одной системе координат.

Для каждого слоя каждой области ПРИЗМЫ стыковочный модуль накапливает информацию о входящих в данный слой ячейках, принадлежащих модели CFD кода, и формирует информацию о температуре и плотности теплоносителя для всех областей и слоев конкретной ТВС. Все величины переводятся в систему единиц, принятых в программе ПРИЗМА, и для каждого слоя каждой области ПРИЗМЫ подсчитывается средняя температура и средняя плотность на слое по формулам:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i P_i V_i}{\sum_{i=1}^n P_i V_i}, \quad P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i},$$

где T_i – среднее значение температуры в ячейке, P_i – среднее значение плотности в ячейке, V_i – объем ячейки, n – количество ячеек, принадлежащих данному слою данной области.

На втором этапе все рассчитанные на первом этапе данные объединяются, переводятся в формат программы ПРИЗМА и подаются в качестве входных данных для расчёта радиационного энерговыделения по программе метода Монте-Карло.

Входная информация, необходимая для работы стыковочного модуля во всех режимах, задается в управляющем файле *param.xml* в формате XML. Формируются разделы (тэги), в которых содержатся данные о неизменяемых константах (число ТВС, дельта по температуре в градусах для проверки сходимости, мощность реактора или ТВС в ваттах), данные о геометрии системы, каталог с файлами, содержащими закодированные синтаксические правила для разбора входных строк исходных данных программы ПРИЗМА, и другая управляющая информация.

5 Результаты проведения связанных расчетов

В РФЯЦ-ВНИИТФ проводятся связанные расчеты нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активных зон реакторов следующих типов: ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 и РУ типа БРЕСТ. Расчеты для реактора ВВЭР-1000 велись на 656 процессах под управлением ОС Linux. При проведении полного расчета прошло 10 итераций, время расчета составило около 120 часов астрономического времени.

Расчет нейтронно-физических характеристик проходил как в однопроцессорном, так и в параллельном режимах. Расчет теплогидравлических характеристик проводился в распределенном режиме для 163 ТВС. Каждая ТВС рассчитывалась в однопроцессорном режиме. Теплогидравлический расчет занимает от 3 до 6 часов астрономического времени в зависимости от конфигурации тепловой модели.

ТВС реактора ВВЭР-1200 имеет несимметричную конфигурацию, что ведет к шестикратному увеличению объема сетки в сравнении с сеточными тепловыми моделями ТВС ВВЭР-1000. Это приводит к увеличению времени теплогидравлического расчета примерно в 6 раз.

С помощью программы CONV 3D проводились расчеты теплогидравлических характеристик для одной ТВС реактора типа БРЕСТ. Программа позволяет распараллеливать расчеты на 256 процессах.

Результаты расчетов могут быть представлены разными способами: в виде полей физических величин, таблиц, в виде картограмм, а также в виде графиков (рис. 10).

Получаемая в расчетах средняя температура теплоносителя на выходе из реактора хорошо согласуется с соответствующей эксплуатационной характеристикой для стационарного режима работы реактора. Максимальная температура оболочек ТВЭЛов не превышает предельно допустимого значения.

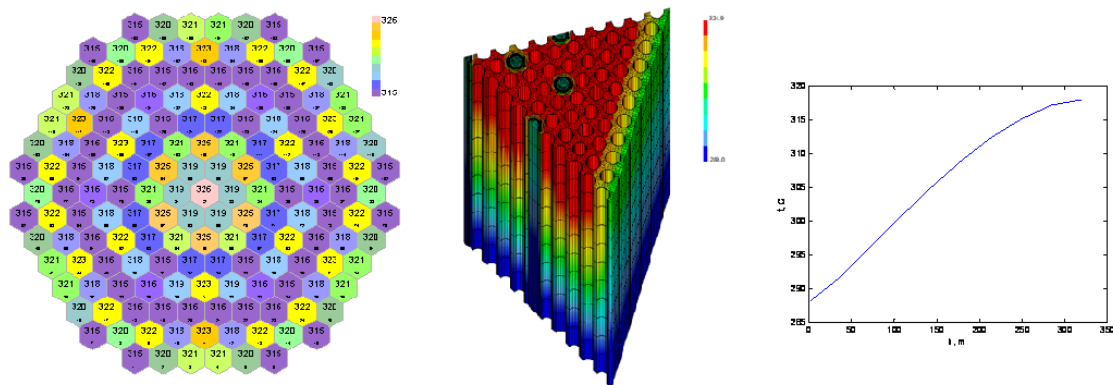


Рис. 10. Представление расчетов активной зоны реактора ВВЭР-1000: картограмма температур воды (слева), пространственное распределение температур воды (в центре), график изменения температуры воды (справа).

Проводимые расчеты показывают возможность вычисления на современных вычислительных системах теплогидравлических характеристик реактора с использованием нейтронно-физических характеристик, оцененных методами статистического моделирования. В то же время проверочные расчеты позволили наметить пути дальнейшего развития методик.

В настоящее время разрабатывается методика учета переноса тепловых потоков между соседними ТВС. В ближайшей перспективе предполагается проведение теплогидравлического расчета отдельной ТВС в параллельном режиме и расчет теплогидравлических характеристик всей активной зоны реактора.

Литература

- [1] П.Л. Кириллов, Г.П. Богословская: Тепломассообмен в ядерных энергетических установках. Учебное пособие для вузов; 2-е изд., перераб. – М.:ИздАт, 2008.
- [2] IAEA Nuclear Data Centre, <http://www-nds.iaea.org>.
- [3] О.В. Зацепин, Я.З. Кандиев, Е.А. Кашаева, Г.Н. Малышкин, Д.Г. Модестов: Расчёты методом Монте-Карло по программе ПРИЗМА нейтронно-физических характеристик активной зоны ВВЭР-1000. ВАНТ, Сер. Физика ядерных реакторов, Вып. 4, с. 64-74, 2011.

- [4] Я.З. Кандиев, Э.С. Куропатенко, В.М. Шмаков, Е.И. Черепанова: Библиотеки системы константного обеспечения расчетов КОБРА. Использование библиотек ENDL, ENDF. *ВАНТ, Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики*, 1986.
- [5] Д.Г. Модестов: Разработка программного комплекса для расчёта кампании реактора. *Забабахинские научные чтения: XI международная конференция, 16-20 апреля 2012. Снежинск: Издательство РФЯЦ-ВНИИТФ*, 2012.
- [6] V.V. Chudanov, et al.: Current status and validation of CONV2D\&3D code. *Proc. OECD/CSNI Workshop on in vessel core debris retention and coolability, Garching near Munich, Germany, March 3-6, 1998. Nuclear Safety NEA/CSNI/R (98) 18*, pp.223-224, 1999.
- [7] OpenFOAM, <http://opencfd.co.uk/openfoam>.

TANDEM Program for Parallel Computing of Coupled Neutron-Physical and Thermal-Hydraulic Characteristics of Reactor Cores

Abstract. *The paper describes technology which is used to provide communications in parallel reactor calculations with coupled neutron physics, thermal physics and hydraulics where it is important to take into account the feedback on temperature and density of core materials. Such calculations performed for the cores of BREST, VVER-1000 and VVER-1200 reactors demonstrate that state-of-the-art computer systems can be used to calculate the thermal-hydraulic characteristics of reactors with use of evaluated neutron data.*