

СРЕДСТВА ГЕНЕРАЦИИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

С.Л. Головков, А.В. Воронков, П.Б. Афанасьев

Для нейтронно-физического моделирования ядерно-энергетической установки необходимо создать описание трехмерной расчетной модели установки с гексагональной или квадратной решеткой твэлов. Расчетная модель представляет собой, грубо говоря, трехмерную расчетную сетку с приписанными каждой ячейке ядерно-физическими свойствами (в частности, нуклидным составом ячейки).

Процесс создания таких моделей является очень трудоемким и чреват высокой вероятностью внесения трудно обнаруживаемых ошибок. Для упрощения и автоматизации этого процесса необходимы специальные инструменты.

Ядерно-энергетическая установка (ЯЭУ) представляет собой комбинацию двух принципиально разных объектов с точки зрения математического моделирования (рис.1):

1. активной зоны ЯЭУ, которая представляет собой, как правило, регулярную, но существенно гетерогенную по физическим свойствам структуру;
2. внешней части ЯЭУ (парогенераторы, насосы, защита, конструкционные элементы и т.п.), которая практически не имеет регулярной структуры.

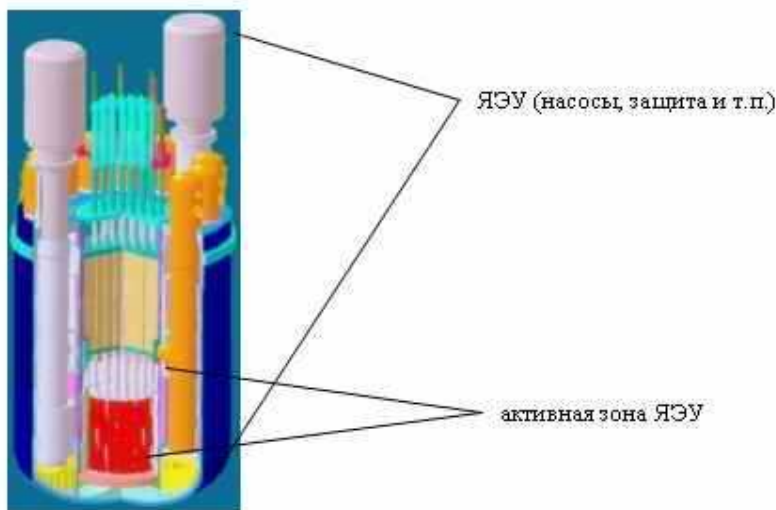


Рис.1. Ядерно-энергетическая установка

Для моделирования этих различных объектов требуются различные типы расчетных моделей. Для решения задач создания различных моделей для расчетного комплекса "РЕАКТОР-ГП" [1,2] разработаны две системы, построенные на основе принципиально различных подходов:

- Конструктор расчетной модели активной зоны (предназначенный для задач расчета активной зоны);
- Конструктор расчетной модели реакторной установки (предназначенный для задач расчета защиты).

Конструктор расчетной модели активной зоны

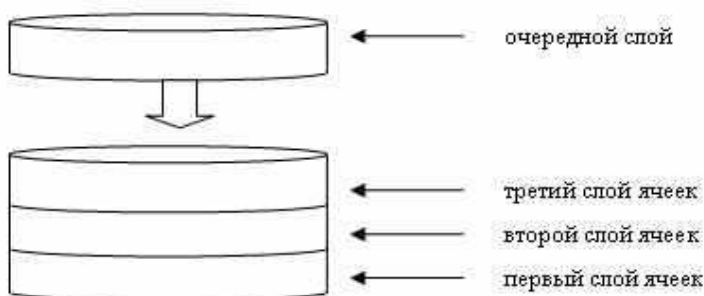


Рис. 2. Послойное построение расчетной модели

Этот Конструктор (G-Core) основан на послойном/пояечном построении расчетной модели. Пользователь в интерактивном режиме строит первый слой ячеек расчетной модели, затем - второй слой и т.д. Схематически этот процесс иллюстрируется на рис.2.

При конструировании широко используются массовые операции над ячейками, свойства симметрии расчетной модели и другие возможности, позволяющие упростить и автоматизировать построение модели.

На рисунке 3 приведен пример последовательности шагов построения расчетной модели активной зоны реакторной установки.

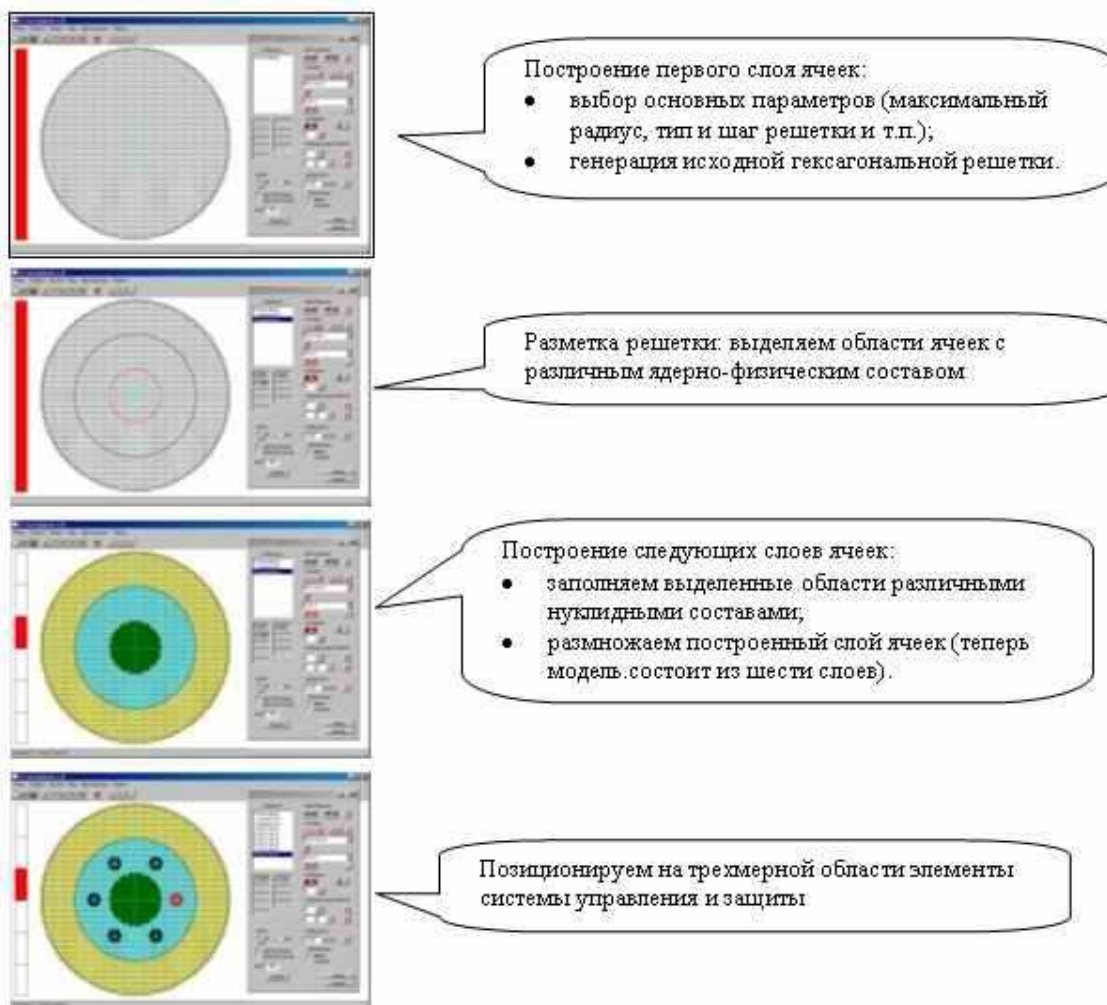


Рис. 3. Пример построения расчетной модели активной зоны реакторной установки

Построенную расчетную модель можно сохранить в хранилище данных комплекса "РЕАКТОР-ГП" для использования другими компонентами комплекса.

Конструктор расчетной модели реакторной установки

Этот Конструктор (G-Comp) является по сути преобразователем комбинаторной геометрии в растровую геометрию. Пользователь описывает расчетную модель с помощью трехмерных твердотельных примитивов (параллелепипедов, цилиндров, конусов и т.п.), состоящих из определенных материалов. Конструктор преобразует такое твердотельное описание в расчетную модель - трехмерную сетку с указанием содержимого каждой ячейки (рис.4).

Слева на рисунке 4 представлен перечень геометрических примитивов, из которых строится твердотельное описание реакторной установки. В центре иллюстрируется процесс построения твердотельной модели реакторной установки. Справа - результат работы Конструктора: XZ- и XY-сечения расчетной модели.

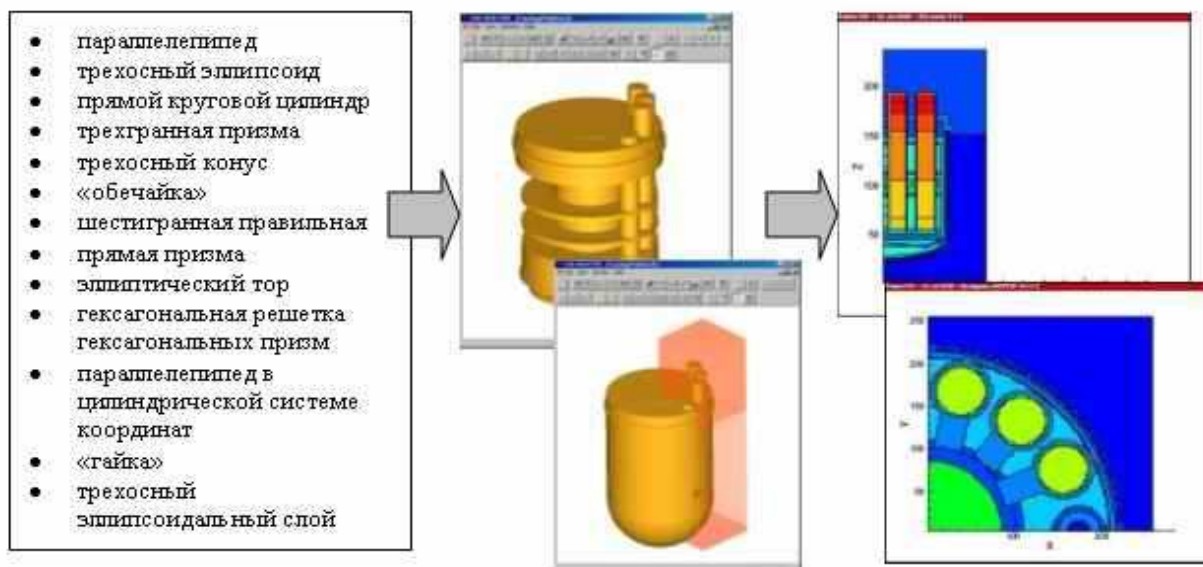


Рис. 4. Пример построения расчетной модели реакторной установки

Результатом работы Конструктора является готовая для дальнейшего использования расчетная модель.

Гомогенизация расчетных ячеек

В процессе использования разработанных систем при проведении промышленных расчетов выявилась потребность развития Конструкторов расчетных моделей. Для более точного счета необходимо предварительно вычислить точный нуклидный состав некоторых ячеек расчетной модели (эта процедура называется гомогенизацией).

Рассмотрим следующий пример (рис.5) - на гексагональной расчетной сетке позиционирован элемент системы управления и защиты (СУЗ).

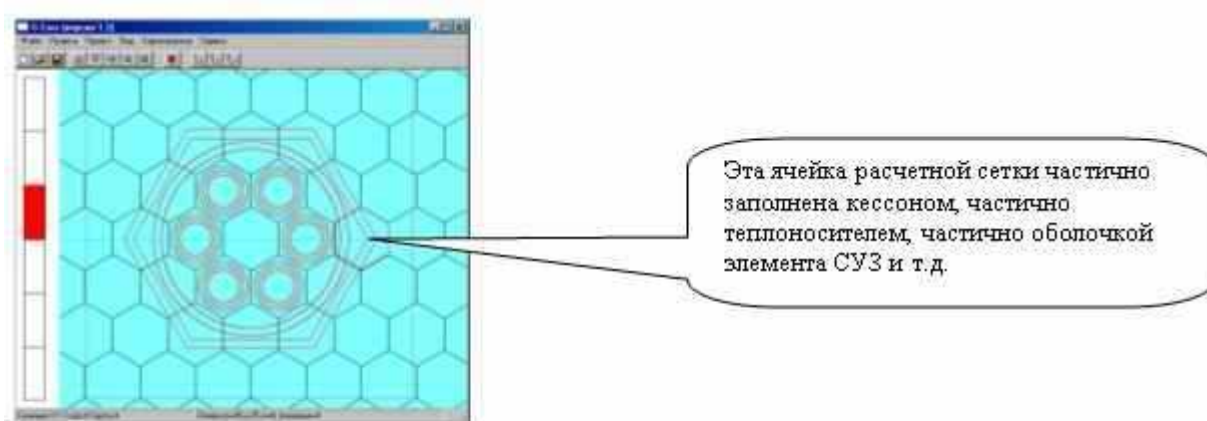


Рис. 5. Элемент системы управления и защиты на расчетной сетке

Ячейки сетки, на которых "лежит" элемент СУЗ, приобретают сложный ядерно-физический состав. Гомогенизация заключается в вычислении нуклидного состава таких ячеек. Для этого необходимо

- вычислить объемы ячейки, замещенные тем или иным элементом конструкции (например, кессон занимает 9.73 % объема ячейки);
- затем, исходя из плотности материалов при указанной температуре, вычислить количество того или иного материала в ячейке (например, данная ячейка содержит 34 единицы стали ЭП-33);
- затем, исходя из состава материала (например, стали ЭП-33), определить количество того или иного химического элемента в ячейке (например, ячейка содержит 14 единиц железа);
- и, наконец, исходя из нуклидного состава химических элементов, определить количество того или иного нуклида в ячейке (например, ячейка содержит 7 единиц изотопа Fe-54).

В случае Конструктора активной зоны ситуация упрощается тем, что, во-первых, задача сводится (с некоторыми оговорками) к двумерной, во-вторых, используется небольшое количество типов простых

геометрических элементов, и, в третьих, позиционирование этих элементов относительно друг друга фиксировано. Поэтому для Конструктора активной зоны задача гомогенизации решена точно - для вычисления площадей используются формулы Грина на плоскости и т.п. На рисунке 6 представлены результаты гомогенизации - "раскладку" площади и нуклидный состав некоторой ячейки.

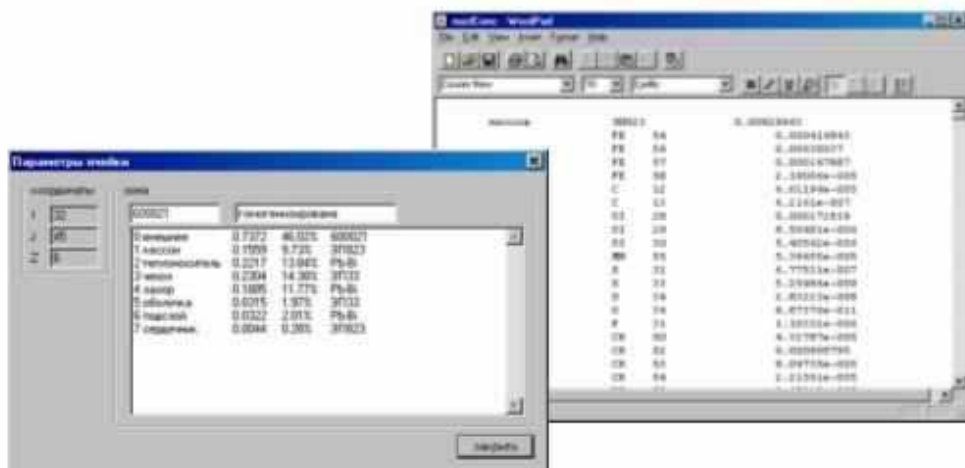


Рис. 6. Результаты гомогенизации

Иначе дело обстоит с Конструктором реакторной установки. Задача гомогенизации в этом случае существенно трехмерна, геометрические тела разнообразны и позиционируются относительно друг друга произвольным образом.

Есть, правда, и упрощающее обстоятельство - при решении задач защиты как правило используется не гексагональная, а прямоугольная сетка.

Можно предложить следующее решение задачи. Возможно, это решение слишком прямолинейно, зато идейно просто и, следовательно, допускает простую и надежную верификацию результатов.

Базовая процедура генерации расчетной модели состоит в следующем: создается сетка, а затем определяется - какому конструкционному элементу принадлежит центр каждой ячейки. Если, допустим, центр ячейки находится на крышке, сделанной из определенного сорта стали, то считается, что вся ячейка заполнена этой сталью (левая часть рисунка 7).

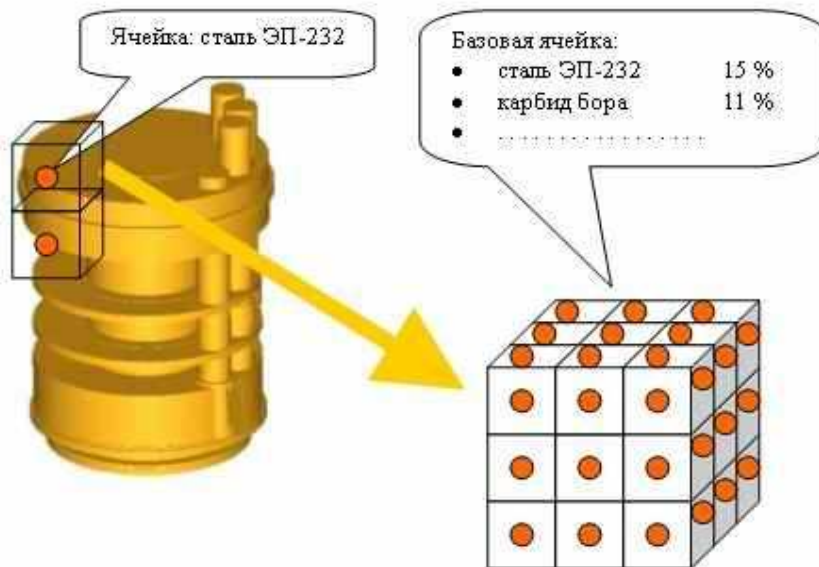


Рис. 7. Базовая ячейка (слева) и ее разбиение на микроячейки (справа)

Предлагаемый алгоритм гомогенизации состоит в том, чтобы каждую базовую ячейку разбить на более мелкие ячейки ("микроячейки"), определить, куда попадают центры этих микроячеек, а затем определить сложный состав базовой ячейки (правая часть рисунка 7).

Недостатком такого алгоритма является существенный рост времени генерации расчетной модели. Если, допустим, время генерации базовой расчетной модели для конструкции средней сложности занимает 10 минут, то при разбиении каждой ячейки на 1000 частей (10 делений по каждой координатной оси), то время генерации становится равным 10000 минут. Соответственно растут и требования к необходимой памяти.

Решение состоит в распараллеливании программы Конструктора расчетной модели реакторной установки: каждый процессор получает свой "кусочек" реакторной установки и создает для нее расчетную модель.

В принципе "деление работы" между процессорами можно осуществлять самыми разными способами: разбивать базовую сетку по любой координате или их комбинации, или делить между процессорами конструктивные элементы твердотельной конструкции. Но, по-видимому, наиболее удобным является деление базовой сетки по оси Z, поскольку значения координат X и Y могут задаваться в декартовой или полярной системе координат, а способ разбиения оси Z фиксирован. Поэтому выбрана следующая стратегия - твердотельная конструкция делится между процессорами горизонтальными плоскостями таким образом, чтобы каждый процессор получил одинаковое (по возможности) число слоев базовой сетки (рис.8).

Преобразование последовательной программы Конструктора в параллельную оказалось довольно тривиально. Каждый процессор получает одни и те же описания твердотельной конструкции и базовой сетки. Затем каждый процессор по своему номеру определяет обрабатываемый кусок твердотельной конструкции и строит фрагмент расчетной модели.

Гомогенизация выполняется пояеечно, т.е. процессор "берет" очередную ячейку базовой сетки, разбивает ее на требуемое число микроячеек, определяет, каким элементам конструкции принадлежат эти микроячейки, а затем подсчитывает состав базовой ячейки. Вследствие такого устройства алгоритма требования к памяти практически не изменились.

После завершения работы параллельного Конструктора запускается дополнительная программа, которая "собирает" из отдельных фрагментов полную расчетную модель.

Первые эксперименты показали, что параллельный Конструктор обладает линейной масштабируемостью. Это объясняется тем, что процессоры во время своей работы не обмениваются никакими данными. В принципе возможны какие-то девиации из-за разной сложности обрабатываемых фрагментов твердотельной конструкции, но вряд ли они будут существенными.

В настоящее время осуществляется развитие и отладка параллельного Конструктора расчетной модели реакторной установки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. A.Voronkov, V.Arzhanov. REACTOR - Program System for Neutron-Physical Calculations. Proc. International Topical Meeting: Advances in Mathematics, Computations, and Reactor Physics, USA, Vol5, April 28 - May 2, 1991.
2. А.И. Брыкин, А.В. Воронков, С.А. Гайфулин, С.Л. Головкин, А.С. Голубев, В.И. Журавлев, Е.А. Макаров, А.Л. Севастьянов, В.В. Сеница, В.М. Суслин, Е.П. Сычугова (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва), П.Б. Афанасьев, А.В. Дедуль, В.В. Кальченко, А.А. Николаев (ФГУП ОКБ "Гидропресс", г. Подольск), Е.А. Земсков, Н. Н. Новикова (ФГУП РФ-ФЭИ, г. Обнинск), Е.В. Ефремов (ФГУ 12 ЦНИИ МО РФ, г. Сергиев Посад). "РЕАКТОР-2006. Состояние и перспективы". Нейтроника - Нейтронно-физические проблемы атомной энергетики (31 октября - 3 ноября 2006 г., г. Обнинск).