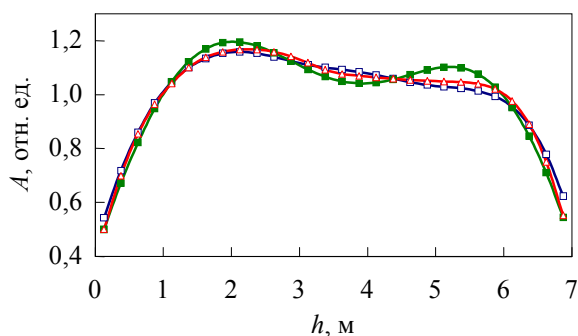




Р и с. 3. Зависимость усредненного аксиального распределения энерговыделения A , полученного по экспериментальным данным ($\square$), программе Призма-М с использованием полуэмпирической ($\blacksquare$) и расчетно-экспериментальной методики ($\triangle$)

говыделения завышены, так как в них включена дисперсия контрольного метода (сканирования).

На рис. 3 видно, что при использовании расчетно-экспериментальной методики в программе Призма-М обеспечивается хорошее совпадение эталонной и расчетной зависимости аксиального распределения энерговыделения. Кроме того, не наблюдается характерного для полуэмпирической методики изгиба зависимости аксиального распределения энерговыделения в центральной части по высоте активной зоны.

Расчеты позволяют сделать следующие выводы:

дисперсия коэффициента аксиальной неравномерности распределения плотности потока нейтронов не превышает указанную в аттестационном паспорте программы Призма-М;

применение расчетно-экспериментальной методики для определения аксиального распределения плотности потока нейтронов и энерговыделения признано целесообразным, поскольку обеспечивает лучшую точность восстановления по сравнению с полуэмпирической.

Авторы благодарят персонал Смоленской АЭС за сканирование активной зоны протяженным детектором типа Дт.6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Броницкий Л.Л., Постников В.В., Прошин В.А. и др. Восстановление трехмерного поля энерговыделения в ТВС РБМК-1500. — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 4, с. 246—248.
2. Филиппчук Е.В., Потапенко П.Т., Постников В.В. Управление нейтронным полем ядерного реактора. М.: Энергоиздат, 1981.

Поступила в Редакцию 31.07.12

УДК 621.039.17

ПРОГРАММНАЯ КОНВЕРТАЦИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ПОЛНОМАСШТАБНОГО РАСЧЕТА РБМК ПО MSU

Гуревич М.И., Тельковская О.В. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва),
Дружинин В.Е., Зинаков Д.Л. (ОАО «ВНИИАЭС», г. Москва)

Быстрое развитие вычислительной техники позволило к настоящему времени проводить полномасштабные расчеты реакторов, в том числе РБМК-1000, с помощью не только инженерных, но и прецизионных программ. Для прецизионных расчетов конкретного состояния реакторов различного типа используется основанный на методе Монте-Карло комплексный пакет MSU с универсальным описанием геометрии активной зоны, с любым уровнем точности и библиотекой оцененных ядерных данных, что позволяет учитывать выгорание топлива, положение органов СУЗ и теплогидравлические параметры [1]. Описание конкретного состояния РБМК требует 4—150 Мбайт информации в зависимости от точности модели. Источником части этой информации служат исходные дан-

ные, описывающие состояние активной зоны реактора: состав загрузки, выгорание топлива, положение органов СУЗ, температура топлива, теплоносителя, замедлителя и др. Часть этих данных поступает от системы контроля реактора, геометрические характеристики и состав элементов конструкции активной зоны изначально представлены, как правило, в виде чертежей со стандартной спецификацией. Характеристики топлива, которые изменяются при работе реактора (материальный состав), формируются на основании данных о трехмерном распределении выгорания и предварительных расчетов по программе MSU с моделированием изменения нуклидного состава в режиме выгорания. Для преобразования этой информации во входные данные на языке, используемом в паке-

те MCU, разработана программа КДМК, характеризующаяся относительной универсальностью. Она использует специализированные библиотеки, необходимые для описания элементов конструкции активной зоны РБМК. Библиотеки имеют фиксированную внутреннюю структуру данных. Они хранятся в виде текстовых файлов заданного формата и могут быть пополнены без изменения программы. Программа написана на языке C++ с использованием дерева наследования классов, что позволяет контролировать процесс конвертации данных. Это существенно при работе с разнородными данными, кроме того, делает более легкой задачу модификации программы к нуждам пользователей.

КДМК — программа, связанная с определенным классом установок, в данном случае РБМК, которая преобразует описание исходных данных о состоянии реактора на инженерном языке на специализированный язык MCU [2]. Программа использует входную информацию в специальном формате, дополняет ее информацией из внутренних специализированных библиотек и формирует окончательный файл в формате входных данных программы MCU. Основными задачами КДМК являются минимизация времени на подготовку исходных данных и снижение числа ошибок в них. Программы такого типа часто называют кодогенераторами. Они могут выполнять функции конверторов, т.е. преобразовывать данные, созданные одним программным комплексом, в форму входных данных другого комплекса.

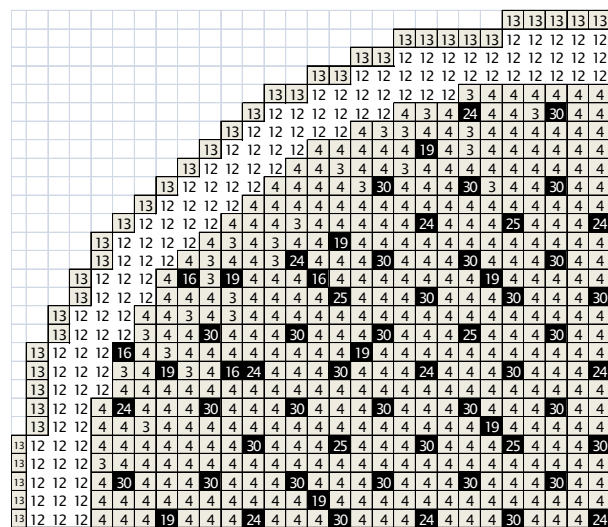
Сокращение и упрощение задания входной информации возможны благодаря тому, что в полном наборе данных, описывающих реальную установку, лишь небольшая часть может изменяться, причем в известных пределах. Это допускает создание специализированного входного языка, при использовании которого значительная часть информации становится подразумеваемой. Информация располагается во внутренних библиотеках, являющихся частью КДМК, а не среди входных данных. В рассматриваемом случае большая часть подразумеваемой информации — это описание конструкций (геометрии) технологических каналов, схема их расположения в активной зоне, изотопный состав топлива и конструкционных материалов.

Остальная (меньшая) часть информации может вводиться в более удобной форме, на-

пример, с помощью интерактивного графического интерфейса. Подобный специализированный кодогенератор, кроме сокращения объема, дает возможность более глубокой семантической проверки данных.

В КДМК часть входных данных является управляющими параметрами, часть поступает от системы контроля реактора в форме, стандартной для расчетного сопровождения эксплуатации, остальные из расчетов с помощью инженерных кодов.

Расчетная модель РБМК. Модель РБМК, которая задается для расчета по программе MCU, — это область, состоящая из активной зоны, бокового, нижнего и верхнего торцевых отражателей [3]. В плане она разбита на квадратные колонны со стороной 25 см, высотой 800 см, из них 700 см — активная зона, по 50 см — нижний и верхний торцевые отражатели. Активная зона состоит из 1884 колонн, окруженных тремя рядами из 448 графитовых колонн бокового неохлаждаемого отражателя, включая каналы камер деления, и внешним рядом из 156 колонн бокового охлаждаемого отражателя. Угловые части расчетной области заполнены вакуумными колоннами. Таким образом, рассчитываемая область состоит из 56×56 колонн. Фрагмент модели системы в плане приводится на рис. 1. Графитовые колонны активной зоны имеют вертикальные отверстия для технологических каналов из сплава циркония с ниобием, окруженных графитовыми втулками. Внутри технологических каналов находятся ТВС или стержни дополнительных погло-



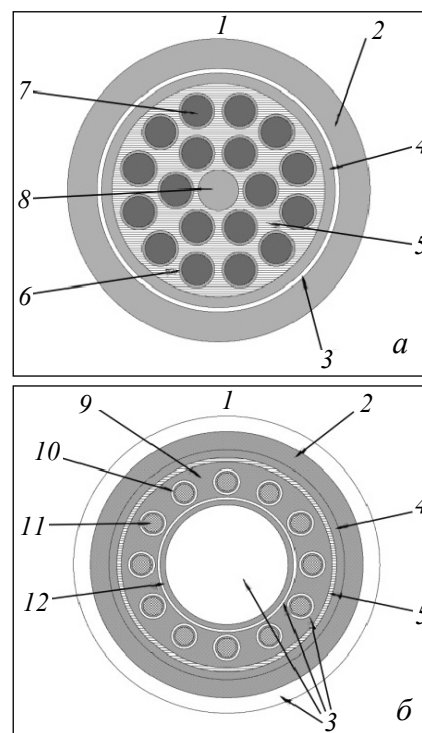
Р и с. 1. Четверть рассчитываемой области РБМК-1000 (цифрами обозначены каналы)

тителей. ТВС составлена из двух частей — нижней и верхней. В каждую часть входят несущая штанга и 18 твэлов с дистанционирующими решетками. Твэлы заполнены таблетками топлива из диоксида урана, они расположены в два ряда. Во внутреннем ряду расположены шесть, во внешнем 12 твэлов. Часть колонн имеет отверстия чуть большего диаметра, в которые установлены рабочие каналы для размещения стержней СУЗ различной конструкции и функционального назначения.

В расчетной модели каждая колонна разбита горизонтальными плоскостями на 16 одинаковых нод, представляющих собой прямоугольные параллелепипеды размером $25 \times 25 \times 50$ см, 14 нод относятся к активной зоне, две — к верхнему и нижнему торцевым отражателям.

В расчетах температура и плотность теплоносителя, температура графита, замедлителя, втулок, окружающих технологические каналы и рабочие каналы СУЗ, изотопный состав и температура топлива в каждой ноде постоянны, т.е. изменение этих величин в аксиальном направлении моделируется ступенчатыми функциями. Аналогично ступенчатыми функциями задается высотное распределение плотности и температуры теплоносителя в технологических каналах с дополнительными поглотителями. Изотопный состав топлива в первом и втором ряду твэлов считается одинаковым в пределах расчетной ноды.

Для рабочих каналов СУЗ плотность и температура воды, температура всех других материалов, кроме графитового блока и втулок, принимаются постоянными. Положение органов регулирования (стержней СУЗ) изменяется непрерывно и может быть задано любое. Графитовые колонны неохлаждаемого бокового отражателя имеют постоянную и одинаковую по высоте температуру, охлаждаемого с вертикальными стальными каналами — также постоянную по высоте и одинаковую температуру графита и воды. Степень детализации описания геометрии рабочих и нерабочих каналов, применяемых при моделировании с использованием КДМК, можно показать на примере горизонтальных сечений конструкции ТВС и кластерного регулирующего органа, приведенных на рис. 2. Кроме указанных элементов ТВС, моделируются дистанционирующие решетки, торцевые заглушки и пружины твэлов. Дистанционирующие решетки



Р и с. 2. Сечения каналов с ТВС (а) и кластерным регулирующим органом (б): 1 — графитовый блок; 2 — графитовая втулка; 3 — газовый зазор; 4 — труба канала; 5 — теплоноситель; 6 — оболочка твэла; 7 — топливо; 8 — несущий стержень; 9 — гильза кластерного регулирующего органа; 10 — оболочка поглощающего элемента; 11 — поглощающий элемент; 12 — опора

моделируются дисками, перекрывающими сечение канала. Все используемые модели органов регулирования также имеют высокую степень детализации геометрического описания в плане и по высоте.

Все элементы загрузки активной зоны подразделяются на следующие типы: ТВС с разным обогащением, в том числе с высотным профилированием и выгоранием, дополнительные поглотители разной конструкции, рабочие каналы, заполненные водой, или незагруженные технологические каналы, рабочие каналы со стержнями СУЗ разной конструкции и назначения. Обогащение топлива ТВС, %: 2, 2,4, 2,6 + 0,41 эрбия, 2,8 + 0,6 эрбия, 3,2 + 0,7 эрбия, 2,5 + 0,3 эрбия. При эксплуатации реактора изотопный состав топлива изменяется в зависимости от выгорания, средней плотности и температуры теплоносителя, концентрации ксенона. Это учтено при подготовке библиотеки изотопного состава топлива.

Система контроля РБМК-1000 не регистрирует аксиальный профиль выгорания, плотность теплоносителя и температуру топлива в техно-

логических каналах с ТВС, температуру замедлителя и графитовых втулок, окружающих технологические и рабочие каналы. Распределение этих параметров по объему активной зоны рассчитывается с помощью инженерного кода ТРОЙКА с учетом показаний внутриреакторных датчиков системы контроля реактора и гидравлических параметров [4]. На этапе нейтронно-физического расчета корректируется выход нейтронов на акт деления таким образом, чтобы обеспечить наилучшее совпадение расчета и показаний внутриреакторных датчиков. Корректировка не превышает 2%, в среднем менее 0,5%.

Входная информация, характеризующая конкретный вариант. Для формирования исходных данных прецизионного расчета состояния РБМК-1000 по программе MCU необходима следующая информация:

картограмма загрузки (двумерный массив 56×56), которая определяет соответствие канала его геометрическому описанию (топливо, стержень дополнительного поглотителя, столб воды или стержень СУЗ);

распределение глубины выгорания и температуры топлива, концентрации ксенона, плотности и температуры теплоносителя, температуры графитового замедлителя и графита втулок по объему активной зоны;

положение стержней СУЗ.

Эти параметры характеризуют состояние реактора, формируются на основе данных системы контроля и расчетов с помощью инженерного кода и преобразовываются в часть входных данных программы MCU. Кроме того, в программе КДМК предусмотрена возможность расчета паспортных характеристик блока на определенный момент времени.

Внутренние информационные библиотеки КДМК. Основными подразумеваемыми данными КДМК являются библиотеки типов, геометрии каналов и изотопного состава топлива. Они могут пополняться без ее изменения.

Материалы разделяются на независимые от состояния активной зоны и зависимые. К независимым относятся вода в каналах СУЗ, циркониевые оболочки ТВЭЛов и др. Каждому такому материалу присвоен постоянный номер, их изотопный состав хранится отдельно. К зависимым материалам относятся графит и втулки технологических каналов (изменяется температура),

теплоноситель (изменяются температура и плотность), топливо (изменяются температура и изотопный состав в процессе выгорания).

Библиотеки изотопного состава топлива. Каждый отдельный файл соответствует определенному составу топлива. В нем в виде таблицы приведена концентрация изотопов для заданного числа точек по выгоранию и нескольких точек по плотности теплоносителя. С помощью этих данных для конкретного состояния активной зоны определяется изотопный состав топлива.

Библиотека геометрических данных для моделирования РБМК. В настоящее время библиотека содержит полное описание геометрических характеристик всех используемых типов ТВС, столбов воды, дополнительных поглотителей, каналов со стержнями СУЗ разной конструкции, каналов отражателя и др.

Входной язык NCGSIM допускает задание условных номеров материалов, т.е. номеров, дающих ссылку на изотопный состав элемента конструкции, которые могут быть получены из специальных картограмм, содержащихся в массиве входных данных программы MCU. Это дает возможность одно и то же описание использовать для разных типов ТВС с одной и той же геометрией. Необходимый набор картограмм формирует программа КДМК.

Геометрия прототипов колонн описана с помощью языка NCGSIM в виде ячеек сети. Описание прототипов подробно прокомментировано. На основе этого описания формируются прототипы ячеек сети (картограмма геометрического места элементарных ячеек для MCU) путем замены условных номеров и формирования уникальных номеров прототипов, которые помещаются в картограмму сети. Общие характеристики сети также содержатся в библиотеке.

Наследование классов. Механизм наследования классов позволяет легко модифицировать программу КДМК. Для простоты и, главное, надежности подобных модификаций она написана строго по правилам объектно-ориентированного программирования. Программные коды и данные являются методами соответствующих классов.

Основными структурными единицами модели РБМК в КДМК являются каналы, центральной структурой КДМК — дерево классов каналов. Класс канала не содержит его полного

описания в явном виде, например, геометрия описана в соответствующем разделе геометрических данных, в классе будет ссылка на него. Объект класса содержит поля для полного прямого или косвенного определения реального канала.

Дерево классов каналов отражает то общее, что есть в разных типах каналов. Корнем дерева служит канал вообще — CChannel. В нем описаны слои графитовой кладки и втулки. Наследниками служат пустой канал CEmptyChannel, канал со стержнем СУЗ CSUZChannel и класс каналов контура КМПЦ CWatterChannel. Последний класс имеет слои воды, различающиеся температурой и плотностью. Он имеет два наследника — канал с дополнительным поглотителем CDPChannel и технологический канал CTWSChannel. Технологический канал имеет также поля номеров материалов, выгорания и др. Канал с СУЗ имеет переменный параметр глубины погружения стержня СУЗ.

Программа сначала создает массив объектов типа канал, затем переводит это описание в формат входных данных программы MCU. Из этого следует, что можно дополнить программу КДМК подпрограммой на языке, отличном от NCGSIM. Главная трудность будет в создании геометрического описания каналов, адекватного этой новой программе.

Заключение. В настоящее время один из вариантов комплексного пакета MCU (MCU-REA/1) верифицирован и аттестован для расчета нейтронно-физических характеристик

РБМК-1000. Программа КДМК позволяет проводить полномасштабные расчеты реактора. Опыт расчета нескольких сот состояний энергоблоков Курской, Ленинградской и Смоленской АЭС позволил устранить неточности в описании конструкции различных элементов, подтвердил качество библиотек, работоспособность и целесообразность использования открытой архитектуры программы.

С помощью программы КДМК проводятся систематические прецизионные расчеты следующих функционалов полномасштабных нагрузок РБМК-1000: распределение скоростей реакций деления и поглощения нейтронов по объему реактора, подкритичность, эффективность групп стержней СУЗ, оперативный запас реактивности стержней СУЗ, эффекты обезвоживания и заполнение различных групп каналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гомин Е.А. Статус MCU. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2006, вып. 1, с. 6—32.
2. Хантер Р. Основные концепции компиляторов. М.—СПб—Киев: Изд. дом «Вильямс», 2002. 256 с.
3. Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК. Под общей ред. Ю.М. Черкашова. М., НИКИЭТ, 2006.
4. Шкурпелов А.А., Немиров А.С., Дадакин В.С. Программа ТРОЙКА. Версия 7.1. Ат. паспорт № 228. М., НТЦ ЯРБ, 2007.

Поступила в Редакцию 19.04.12

УДК 621.039.578:629.5

РЕАКТОРНАЯ УСТАНОВКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ РИТМ-200 ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО АТОМНОГО ЛЕДОКОЛА

*Зверев Д.Л., Пахомов А.Н., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Кабин С.В.
(ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)*

В настоящее время разрабатывается проект атомного ледокола нового поколения с перспективной реакторной установкой. Одним из основных требований к ней является повышение по сравнению с действующими ресурсных характеристик оборудования и, в первую очередь, активной зоны.

Опыт эксплуатации подтвердил высокую надежность действующих реакторных устано-

вок типа ОК-900А. Наибольшей наработки достигли установки атомного ледокола «Арктика» — свыше 175 тыс. ч при сроке службы 34 года. В целом результаты эксплуатации характеризуются следующими показателями: ресурс основного оборудования составляет 150 тыс. ч работы на мощности с перспективой дальнейшего продления, энергоресурс серийной активной зоны — 1,8—2,1 ТВт·ч при высоком