

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРА ВВР-М

К.А. Коноплёв, М.С. Онегин, А.С. Полтавский

В настоящее время для сопровождения безопасной эксплуатации реактора ВВР-М используются программные средства (ПС) HEXA-BANK [1] и MCNP [2], которые взаимно дополняют друг друга и дают широкий круг оперативной информации для планирования и оптимизации нейтронно-физических характеристик активной зоны и экспериментальных устройств.

Программный комплекс HEXA-BANK для проведения оперативных расчетов реактора разрабатывался сотрудниками нашего института, начиная с 70-х годов прошлого столетия [3]. За время эксплуатации реактора ВВР-М расчетные модули совершенствовались, накапливалась экспериментальная информация, что позволило к концу 2002 года верифицировать ПС HEXA-BANK [4].

Программный комплекс предназначен для расчета основных характеристик каждой планируемой загрузки активной зоны реактора, а также для накопления расчетной информации в банке данных, в том числе информации об истории пребывания каждой тепловыделяющей сборки в активной зоне. В состав программного комплекса входят связанные между собой модули:

- нейтронно-физического расчета;
- теплофизического расчета;
- расчета динамики;
- оптимизации активной зоны по температуре стенки твэла во время частичных перегрузок;
- оптимальной расстановки РО СУЗ в активной зоне;
- автоматической компоновки активной зоны на заданную длительность кампании;
- архива тепловыделяющих сборок.

В основу нейтронно-физического расчета положена малогрупповая модель замедления [3, 5]. На основе этой модели рассчитаны трехгрупповые диффузионные константы для активных зон на тепловыделяющих сборках типа ВВР-М5. Константы для нетопливных элементов рассчитываются по коду WIMS-D/4 [6]. Модуль нейтронно-физического расчета решает трехгрупповые диффузионные уравнения в двумерной гексагональной геометрии.

Теплофизический модуль построен на одномерных моделях двухслойного и трехслойного твэла в цилиндрической и плоских геометриях. Используя распределение относительного энерговыделения из нейтронно-физического расчета, в результате теплофизического расчета получают поле максимальных температур стенок тепловыделяющих сборок, максимальный температурный градиент на внешнем шестигранном твэле и таблицу зависимости допустимой мощности реактора от температуры теплоносителя.

Модуль динамики рассчитывает глубины выгорания тепловыделяющих сборок в зависимости от месторасположения каждой сборки в активной зоне и её энерговыработки, а также влияние Хе-динамики на коэффициент размножения по точечной модели. Модуль оптимизации на основе распределения температурных полей стенок сборок, соответствующего поднятым и опущенным стержням регулирования, выдает рекомендации на перестановки сборок с целью выравнивания поля максимальных температур стенок сборок для любого положения занавеса из стержней регулирования или komponует оптимизированную активную зону в зависимости от числа допускаемых перестановок. В архиве тепловыделяющих сборок хранятся сведения об истории каждой кампании реактора и каждой сборки, начиная с момента загрузки в активную зону и кончая выгрузкой в хранилище.

В 2001 году наш институт официально приобрел программное средство MCNP4C [2]. В основе ПС MCNP лежит статистический метод Монте-Карло и его разработки, выполненные Э. Ферми, Дж. фон Нейманном, С. Уламом, Н. Метрополисом и Р. Рихтмайером. Версия MCNP4C вышла в марте 2000 года. К этому времени ПС MCNP активно использовали около 3000 пользователей, работающих более чем в 200 научных лабораториях мира. Общее время, потраченное на разработку ПС, составило около 500 человеколет.

MCNP является программным средством для расчета пространственно-энергетического распределения нейтронов. С его помощью находится решение стационарного уравнения переноса нейтронов в активной зоне и отражателе реактора. Решение уравнения переноса осуществляется методом Монте-Карло. ПС MCNP позволяет рассчитывать трехмерные системы практически любой сложности и учитывать изменение энергии и направление движения частиц при столкновениях. Для заданной геометрии и изотопного состава программа позволяет рассчитывать различные нейтронно-физические характеристики ИЯУ: эффективные коэффициенты размножения, эффекты реактивности, плотность потока нейтронов, скорости реакций, энерговыделение и т. п.

ПС MCNP работает с произвольными конфигурациями материалов в геометрических ячейках, ограниченных поверхностями первого или второго порядка, а в случае эллиптического тора – четвертого порядка. Комбинация их с помощью Булевой алгебры позволяет аппроксимировать любую реальную трехмерную геометрию активной зоны, отражателя и экспериментальных устройств реактора. Для упрощения задания входной информации возможно использование решетки отдельных ячеек. Возможно разное задание утечки через внешнюю поверхность системы: белое и зеркальное отражение, а также трансляционная симметрия. Возможна двумерная визуализация геометрического сечения в любом месте реактора. ПС показывает возможные ошибки, сделанные пользователем при задании геометрии.

При генерации нейтронов деления допускается использование спектра деления мгновенных и запаздывающих нейтронов. Она допускает использование как непрерывного (по точкам) задания энергетической зависимости сечений, так и группового. Учитывается угловая зависимость ядерных сечений. Для термализации

нейтронов можно использовать как модель свободного газа, так и, для некоторых наиболее важных материалов, $S(\alpha, \beta)$ -формализм, учитывающий молекулярное взаимодействие для ядра мишени.

В ПС MCNP анализируется статистическая точность рассчитываемых функционалов, вычисляются доверительные интервалы. Допускается увеличение ценности более интересных мест системы по сравнению с другими менее интересными, разработаны эффективные методы уменьшения дисперсии рассчитываемых случайных величин для геометрических областей с малой ценностью.

В состав ПС MCNP4C входит библиотека констант DLC-200 (Standard Neutron, Photon, and Electron Data Libraries for MCNP4C/RSICC DATA LIBRARY COLLECTION), которая использует оцененные данные, полученные из файла ядерных данных (ENDF), библиотеки ядерных данных (ENDL) и активационной библиотеки (ACTL). Интервал энергий для нейтронов в программе составляет от 10^{-11} МэВ до 20 МэВ, а для фотонов и электронов от 1 кэВ до 1000 МэВ. Приблизительно для 100 различных изотопов библиотека DLC-200 содержит свыше 500 таблиц нейтронных взаимодействий. Многогрупповые таблицы подготовлены для 30 групп нейтронов и 12 групп фотонов (95 нуклидов). В области термализации при низких энергиях для некоторых материалов данные учитывают молекулярные связи, кристаллическую структуру. Все сечения подготовлены с учетом теплового движения ядер. Таблицы сечений и $S(\alpha, \beta)$ -функций подготовлены для характерных температур. Таблицы для фотонных взаимодействий позволяют учитывать когерентное и некогерентное рассеяние, фотоэлектрическое поглощение с возможной флуоресцентной эмиссией и рождением пар. Сечения почти 2000 дозиметрических и активационных реакций, включающие около 400 ядер в основном и возбужденном состояниях, являются частью библиотеки DLC-200 и предназначены только для определения скоростей реакций как зависящие от энергии функции отклика.

Начиная с 2003 года трехмерная компьютерная модель реактора ВВР-М, построенная сотрудниками нашего института на основе ПС MCNP, успешно используется как дополнение к ПС HEXA-BANK для оценок пространственных нейтронно-физических характеристик стационарных состояний реактора. Рис. 1 и 2 дают общее представление компьютерной модели реактора ВВР-М.

С помощью ПС MCNP решаются задачи по выбору и обоснованию безопасности загрузок активной зоны реактора, включая обоснование безопасности экспериментальных устройств при их установке в реактор. Рассчитываются следующие параметры:

- эффективный коэффициент размножения нейтронов;
- максимальный запас реактивности;
- суммарная интегральная эффективность стержней ручного регулирования для активных зон с полным числом тепловыделяющих сборок в начале кампании;
- объемный коэффициент неравномерности энерговыделения;
- плотность потоков тепловых и быстрых нейтронов;

- активность облучаемых нейтронно-активационных детекторов;
- радиационное энерговыделение в конструкционных материалах и экспериментальных устройствах.

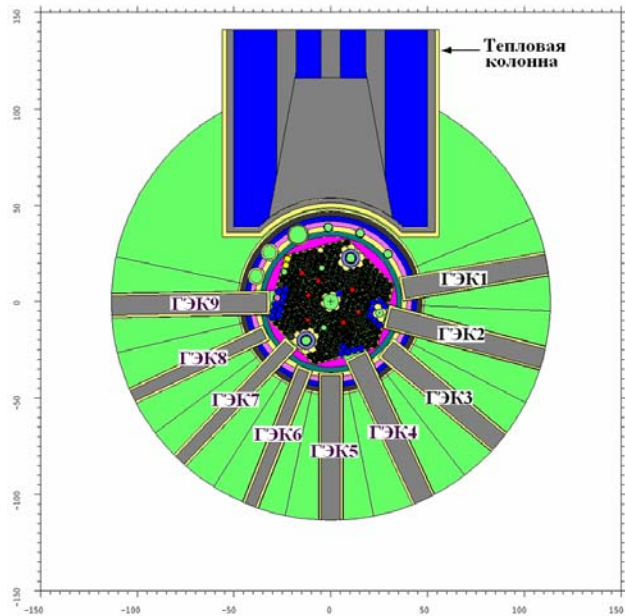


Рис. 1. Компьютерная модель реактора ВВР-М (вид сверху)

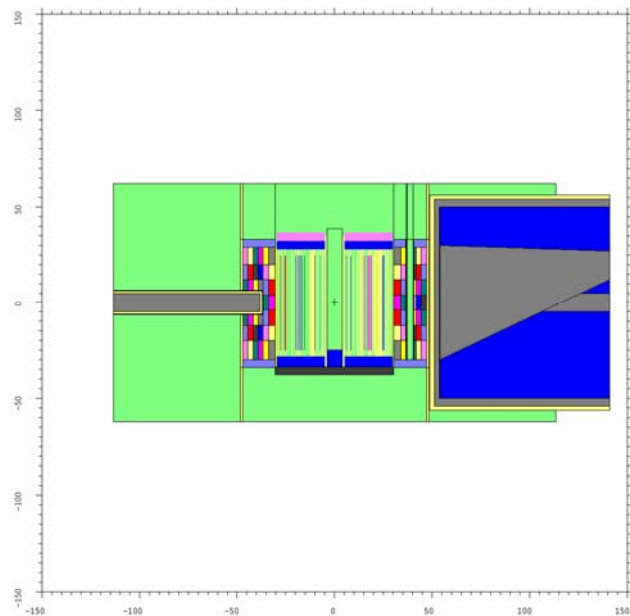


Рис. 2. Компьютерная модель реактора ВВР-М (вид сбоку)

Учет накопления продуктов деления в активной зоне реактора ВВР-М проводится в модели одного эффективного осколка [7], пропорционального значениям выгорания ^{235}U в каждой тепловыделяющей сборке, полученным из расчетов с помощью ПС НЕХА-BANK.

В 2008 году компьютерная модель реактора ВВР-М на основе ПС MCNP была верифицирована [8], для этого потребовалась существенная доработка, а именно: модель накопления продуктов деления дополнена учетом концентрации изотопов ^{149}Sm и ^{151}Sm , рассчитываемой на момент начала кампании, добавлена модель отравления бериллиевого отражателя и вытеснителей ядрами ^6Li и ^3He , а также оценен эффект неравномерности распределения топлива и осколков по высоте тепловыделяющихборок.

Программные средства НЕХА-BANK и MCNP аттестованы органами надзора в соответствии с нормативными требованиями на применение ПС для обоснования безопасности и обеспечения эксплуатации исследовательских ядерных установок [9, 10].

Литература

1. Т.И. Васильева, И.Э. Исакас, К.А. Коноплёв, Т.А. Чернова. Методика проведения расчетов цикла работы исследовательского реактора ВВР-М по программному комплексу НЕХА-BANK. Препринт ЛИЯФ-874. Л. 1983. 29 с.
2. Руководство для пользователей под редакцией J.F. Breismeister. "MCNP – A General Monte-Carlo N – Particle Transport Code", – version 4C; отчет Лос Аламосской Национальной лаборатории LA-13709-M. 2000.
3. И.Э. Исакас, В.А. Шустов. Неха-1 – программа для расчета реактора в двумерном диффузионно-групповом приближении. Препринт ЛИЯФ-490. Л. 1979. 30 с.
4. Р.Г. Пикулик, Д.В. Чмшкян, Г.В. Панева, Н.Д. Лукин, А.В. Киреева. Программный комплекс НЕХА-BANK. Совместный верификационный отчет ПИЯФ РАН и ФГУП НИФХИ. Гатчина-Обнинск. 2001. 129 с.
5. Г.Р. Дик, А.Н. Ерыкалов, В.В. Кузьминов, Ю.В. Петров, В.А. Шустов. Точность малогрупповых программ при расчете критмасс реактора ВВР-М. Физика и техника реакторов. Материалы Зимней школы ЛИЯФ. Л. 1989. 94 с.
6. M.J. Hallsall. A Summary of WIMS-D/4 input options. AEEW-1327. 1980.
7. К.А. Коноплёв, С.Л. Смольский, М.С. Онегин, А.С. Полтавский. Построение компьютерной модели реактора ВВР-М для расчета нейтронно-физических характеристик на основе программного средства MCNP. Отчет ПИЯФ ЭР-279. Гатчина. 2008. 24 с.
8. С.Л. Смольский, А.Н. Ерыкалов, К.А. Коноплёв, А.С. Захаров, М.С. Онегин, П.А. Сушков, А.С. Полтавский, В.В. Гостев. Отчет о верификации ПС MCNP для расчета реакторов ВВР-М и ПИК (вторая редакция). Отчет ПИЯФ № ЭР-281. Гатчина. 2008. 253 с.
9. Программный комплекс НЕХА-BANK: Расчет нейтронно-физических характеристик исследовательских реакторов ВВР-М и ВВР-Ц.

Регистрационный номер ПС в ЦЭП № 462. Аттестационный паспорт № 153 от 20.02.2003 г. Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. М. 2003.

10. Программа MCNP (версии 4С и 5) с библиотекой констант DLC-200. Нейтронно-физические расчеты стационарных состояний исследовательских реакторов ПИК и ВВР-М, а также критического стенда ФМ ПИК. Регистрационный номер ПС в ЦЭП № 600. Аттестационный паспорт № 259 от 17.03.2009 г. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. М. 2009.