

**ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РЕАКТОРА ВВР-М.
СОЗДАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТНОЙ
МАЛОГРУППОВОЙ МОДЕЛИ РЕАКТОРА**

А.Н. Ерыкалов

Первые нейтронно-физические расчеты реактора ВВР-М были начаты в 1956 г. по просьбе научного руководителя Л.И. Русинова. Было показано, что за исключением области резонансного поглощения нейтронов в ^{238}U реактор можно считать гомогенным. Для расчетов была выбрана трехгрупповая диффузионная модель, рекомендованная Р.В. Дейчем [1]. Диффузионные уравнения решались численным методом разностной факторизации, почерпнутым из докторской диссертации Г.И. Марчука. По сравнению с аналитическим методом, этот метод позволяет легко учитывать многослойные области и вести расчет при коэффициенте размножения, не равном единице. Первые вычисления выполнялись на механических арифмометрах «Феликс», позже на электрических «Мерседес» и «Рейнметалл». С появлением ЭВМ расчеты выполнялись на ЭВМ «Минск» и «БЭСМ-6». Весной 1960 г. первые расчеты были опубликованы в отчете [2], в котором, кроме прямых расчетов реактивности и нейтронных потоков, был использован формализм теории возмущений для оценки вклада в реактивность изменений размеров реактора и влияния на нейтронные потоки отдельных изменений конструкции. Для проверки правильности расчетов были выполнены измерения на критических стендах.

Критические эксперименты с различными модификациями твэлов ВВР-М проводились на критических стендах ПИЯФ, критическом стенде “Maryla” в ИЯИ (г. Свек, Польша) и реакторе БИОР ПИЯФ в 1961–1980 годах [3]. Для использования измеренных критических масс в качестве тестовых значений для расчетных программ критические эксперименты должны были быть выполнены с высокой точностью. Оказалось, что основной вклад в погрешность измерений вносят «развал» ТВС (т. е. изменение водного зазора между ТВС из-за люфта хвостовиков ТВС в опорной решетке) и различие в физических свойствах отдельных ТВС. Для исключения развала головки ТВС стягивались резиновым бандажом. Погрешность в критической массе из-за неидентичности ТВС достигала 0,3%. Объем металла активной части ТВС и, следовательно, доля воды в активной зоне уточнялись измерениями вытеснения жидкости активной частью ТВС. В отличие от общепринятых методик с фиксацией критичности по уровню воды в критической сборке была предложена методика набора кольцевых критических масс с центральной водной полостью. Изменяя диаметр полости, можно получить весь набор критических масс от минимального до максимального размера, который допускается диаметром отражателя. Оказалось, что толщина цилиндрического слоя активной зоны (d) приблизительно остается постоянной. Такой подход позволил ограничиться в расчетах одномерными диффузионными уравнениями. По мере накопления экспериментальных данных диффузионные параметры модели были уточнены [4].

Основной «продукцией» реакторов для физических исследований и реактора ВВР-М в их числе являются нейтроны, вытекающие из активной зоны в области, где расположены экспериментальные устройства. Поэтому диффузия нейтронов при замедлении должна быть рассчитана тщательно. В групповом приближении ширина энергетического интервала должна быть достаточна для того, чтобы в нем произошло диффузионное запутывание нейтронов. Если ширина энергетического интервала мала по сравнению с потерей энергии нейтрона при столкновении, то в группе останутся только рассеянные нейтроны на малый угол, т. е. их индикатриса рассеяния не будет изотропной.

Е.А. Гарусовым и Ю.В. Петровым было показано, что в водо-металлических смесях диффузионная модель должна быть двухгрупповой и увеличение числа групп ухудшает ее точность. Это обстоятельство защищало от соблазна введения большого числа групп для детализации спектра нейтронов и тем самым упрощало расчет.

Для областей с сильным поглощением нейтронов, граничащих с областями со слабым поглощением, пространственное распределение замедлившихся нейтронов удовлетворительно описывается двумя перекрывающимися по энергии тепловыми группами. Этим обеспечивается правильное распределение энерговыделения вблизи границы активной зоны с отражателем и ловушкой.

С помощью изменения величины возраста (в пределах погрешности его измерения) нейтронов в быстрой группе можно учесть как различные малые поправки теории, так и технологический разброс параметров твэлов при их заводском изготовлении. Уточнение значения возраста нейтронов производилось нормировкой на одно из измеренных значений критической массы. Сравнение расчетных и измеренных других кольцевых критических масс, набранных из одной партии твэлов, дает возможность установить точность расчета. Сравнение расчетных и экспериментальных значений критических масс для разных твэлов приведено на рисунке.

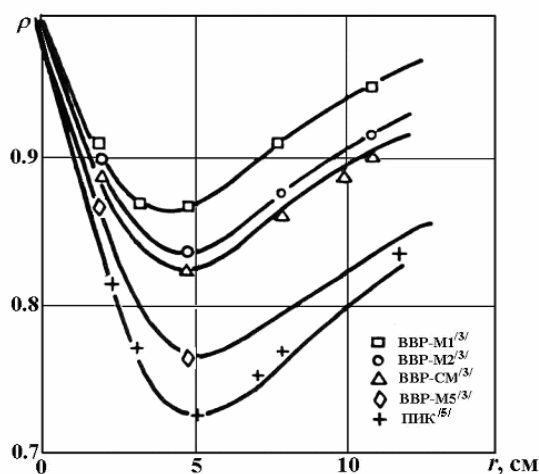


Рис. Зависимость относительной толщины кольцевой активной зоны $\rho = d(r)/d(0)$ от радиуса внутренней легководной полости r . Кривые — расчет, точки — эксперимент

В интервале изменения критических масс твэлов ВВР-М в 2,5 раза среднеквадратичная погрешность в массах составила 0,6%, что соответствует расхождению в реактивности менее 0,2%. Расхождение в расчетом и измеренном относительном распределении плотности потока тепловых нейтронов не превышало 7% и, в основном, укладывалось в погрешность эксперимента.

Как следует из рисунка, малогрупповая модель хорошо описывает экспериментальные данные для твэлов реактора ПИК [5].

Малогрупповая расчетная модель широко использовалась при перестройке активной зоны под различные физические эксперименты и совершенствования реакторной базы. С ее помощью были оптимизированы твэлы ВВР-М, обосновано свободное размещение регуляторов и т. д. Решение трехгрупповых диффузионных уравнений по одномерной программе [6] на РС-386 составляло около 1 мин. Торцевая утечка нейтронов учитывалась вкладом в лапласиан. Поскольку ТВС ВВР-М представляют собой шестигранники, были разработаны гексагональные программы НЕХА [7]. Они решают диффузионные уравнения на гексагональной сетке с шагом 3,5 см, используя одну расчетную точку на ячейку. Время счета на РС-386 составляло около 3 мин. Двумерный вариант расчетной модели НЕХА был верифицирован при активном участии Д.В. Чмшкяна в 2003 году и используется для сопровождения эксплуатации реактора.

Литература

1. R.W. Deutsch. Computing 3-Group Constants for Neutron Diffusion. *Nucleonics* **15(1)**. 1957. P. 47–51.
2. А.Н. Ерыкалов, Ю.В. Петров, Г.В. Скорняков. Нейтронные параметры реактора ВВР-М. Отчет ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Ленинград. 1960. 100 с.
3. В.И. Гудков, В.И. Диденко, Г.Р. Дик, И.А. Евдокимов, А.Н. Ерыкалов, К.А. Коноплев, З.К. Красоцкий, В.Г. Панков, Ю.В. Петров, Р.Г. Пикулик, В.А. Пряничников, Т.Б. Ашрапов, Ю. Козел. Измерения критической массы ТВС ВВР-М. *Атомная энергия* **72(4)**. 1992. С. 400–403.
4. а) Е.А. Гарусов, В.В. Гостев, А.Н. Ерыкалов, Ю.В. Петров. Малогрупповая расчетная модель для реакторов типа ВВР-М. Отчет ОЛ ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Ленинград. 1968. 42 с.
б) Ю.В. Петров, А.Н. Ерыкалов, В.А. Шустов, А.И. Шляхтер. Трехгрупповые диффузионные константы для активных зон на твэлах ВВР-М5 с учетом выгорания. Отчет ЛИЯФ 35-ЭР. Ленинград. 1980. 16 с.
в) Г.Р. Дик, А.Н. Ерыкалов, Ю.В. Петров. Точность малогрупповой модели при расчете критической массы ВВР-М. *Атомная энергия* **75(2)**. 1993. С. 83–85.
5. Г.Я. Васильев, Б.В. Воронин, А.Н. Ерыкалов, Ю.Г. Киселев, К.А. Коноплев, Ю.В. Петров, Р.Г. Пикулик, С.Л. Смольский, В.А. Шустов. Физика активной зоны реактора ПИК. Сравнение теоретических расчетов с экспериментом. В сб.: *Физика и техника реакторов*. Ленинград. 1986. С. 60–72.

6. А.Н. Ерыкалов, Л.М. Котова, Т.И. Смирнова. Программа расчета реактора в одномерном диффузионно-групповом приближении. Препринт ЛИЯФ–226. Ленинград. 1976. 34 с.
7. а) И.Э. Исакас, В.А. Шустов. НЕХА-1 – программа для расчета реактора в двумерном диффузионно-групповом приближении. Препринт ЛИЯФ–490. Ленинград. 1979. 30 с.
б) Г.Р. Дик, В.А. Шустов. Повышение точности программы НЕХА-1 с помощью нелинейных аппроксимирующих функций. Программа НЕХА-М. Препринт ЛИЯФ–1008. 1984. 26 с.