

ПРОГРАММА PMSN1D ДЛЯ МНОГОГРУППОВОГО ОДНОМЕРНОГО РАСЧЕТА РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ОРДИНАТ

Руководитель: А.В. Дедуль
Автор доклада: А.А. Николаев

Введение

Возможности программ одномерного расчета нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов методом дискретных ординат широко используются для решения различных исследовательских и прикладных задач. Высокая скорость счета, нетребовательность к оперативной памяти, высокая точность метода (с минимальными методическими погрешностями одномерной теории) суть главные преимущества указанного приближения.

В настоящей работе рассмотрена программа PMSN1D для многогруппового одномерного расчета реакторов и критических сборок с быстрым спектром нейтронов. Излагаются функциональные возможности программы и результаты расчета по программе, приводится область предполагаемого использования.

Функциональные возможности

Программа PMSN1D предназначена для оперативного проведения многогрупповых расчетов пространственного распределения нейтронного и гамма-излучений в плоской, цилиндрической и сферической геометрии.

Аппроксимация угловой зависимости решения уравнения переноса осуществляется на основе метода дискретных ординат с использованием встроенных в программу квадратурных коэффициентов Гаусса ($S_2, S_4, S_6, S_8, S_{12}, S_{16}, S_{24}$ для плоской и сферической геометрии) и ESn-квадратурных наборов с равными весами ($S_2, S_4, S_6, S_8, S_{12}, S_{16}, S_{24}$ для цилиндрической геометрии). Анизотропия рассеяния учитывается вплоть до седьмого порядка. Стационарное распределение нейтронов в многогрупповом приближении с направлением полета $\vec{\Omega}$ в точке с координатами \vec{r} может быть записано в следующем виде:

$$\vec{\Omega}(\nabla \Psi^g(\vec{r}, \vec{\Omega})) + \Sigma_t^g(\vec{r}) \cdot \Psi^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) = S_{n/\gamma}^g(\vec{r}, \vec{\Omega}) \quad (1)$$

где $S_n^g(\vec{r}, \vec{\Omega})$ источник, $\Psi^g(\vec{r}, \vec{\Omega})$ - плотность потока частиц в точке \vec{r} в направлении $\vec{\Omega}$ в группе, а $\Sigma_t^g(\vec{r})$ - полное макроскопическое сечение взаимодействия.

Средствами программы возможен поиск эффективного коэффициента размножения и расчет переноса нейтронов и (или) фотонов с заданным фиксированным источником в средах, которые граничат с вакуумом и (или) на границах которых задано зеркальное отражение или условие периодичности.

Решение конечно-разностных уравнений выполняется на основе разностной схемы алмаза (рис. 1) с коррекцией на отрицательный поток по шаговой схеме. Для ускорения сходимости внутренних итераций применяется простой метод перенормировки потоков, обеспечивающий сохранение баланса нейтронов в системе.

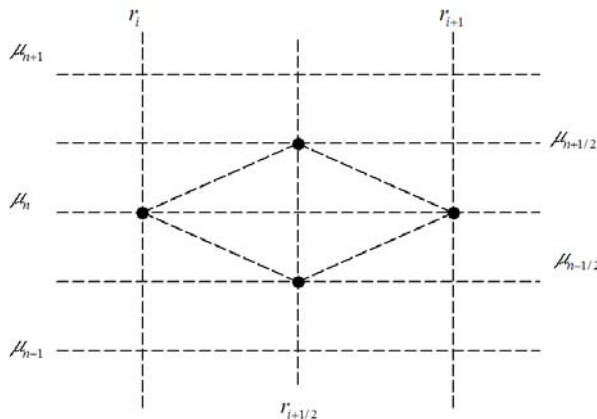


Рис. 1 Пространственная сетка для "алмазной" разностной схемы

Исходные данные для расчета, описывающие геометрию расчетной модели, вводятся из текстового файла. Нейтронно-физические константы читаются из файла в формате ANISN.

Язык программирования фортран, стандарт 90. Программа компилируется как консольное приложение (рис. 2).

```

godiva benchmark calculation
***** version 3.22 *
* PMSN1D *
* PmSn 1-Dimensional *
*****
Task's Comment: GODIVA
*The Solving is beginning...

  outer   keff      epso   outer conv
  1      0.90555   -1.043E+00   no
  2      0.96612   0.6270E-01   no
  3      0.98814   0.2229E-01   no
  4      0.99682   0.8705E-02   no
  5      1.00041   0.3582E-02   no
  6      1.00193   0.1518E-02   no
  7      1.00259   0.6578E-03   no
  8      1.00287   0.2859E-03   no
  9      1.00300   0.1275E-03   no
 10      1.00306   0.5735E-04   no
 11      1.00308   0.2683E-04   no
 12      1.00310   0.1275E-04   no
 13      1.00311   0.7539E-05   yes
total inner iterations 1026

*The Solving is Completed...

```

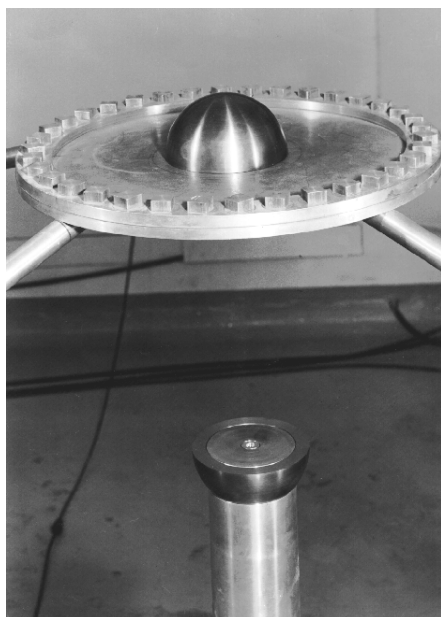
Рис. 2 Консольное окно программы PMSN1D

Предполагается использовать ядро программы для исследования возможности улучшения методов учета мелкомасштабной пространственной гетерогенности в ядерных реакторах на быстрых нейтронах, в частности для подготовки нейтронно-физических констант для простых топливных ячеек.

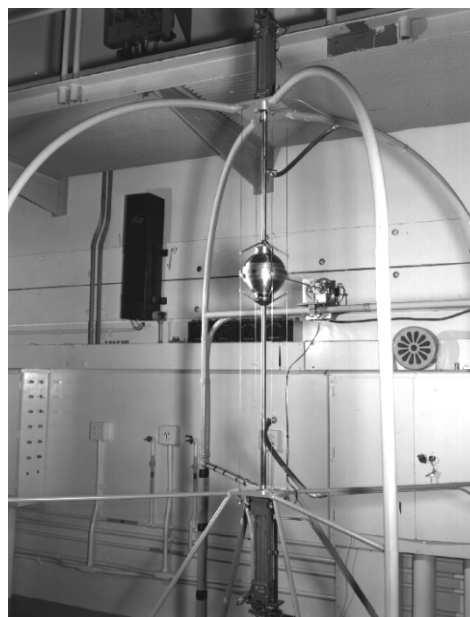
Ниже рассмотрен пример использования программы для расчетов сферических бенчмарков, а также выполнена оценка величины учета гетерогенных эффектов активной части твэла реакторной установки СВБР-100 /1/.

Применение программы для расчета сферических бенчмарк-экспериментов godiva и jezebel

Критический эксперимент godiva /2/ был выполнен в Лос Аламосе в 1950 г. Критсборка представляла собой сферу радиусом 8,7499 см (рис. 3а) из высокообогащенного металлического урана. Критический эксперимент jezebel /3/ был выполнен позднее, в 1964 г, также в Лос Аламосе, и представлял собой сферу радиусом 6,6595 см (рис. 3б) из высокообогащенного плутония.



(а)



(б)

Рис. 3(а-б) Фотоснимки экспериментальных установок критсборки godiva (а) и критсборки jezebel (б)

Ниже в таблице 1 приведены экспериментальное и расчетные значения Кэфф для этих экспериментов. Расчетные значения Кэфф получены по программе PMSN1D и по системе DANTSYS /4/ в P₅S₁₆ приближении для 20 равномерно расположенных расчетных интервалов. Нейтронно-физические константы для расчетов подготовлены программой TRANSX2.15 /5/ в 30 групповом нейтронном

приближении (групповая структура NP3019 /6/) на основе оцененных ядерных данных ENDF/B-7.0 /7/. Для сравнения расчетных результатов при задании исходных данных использованы идентичные геометрия, нейтронно-физические константы и порядок квадратурных коэффициентов.

Таблица 1 Кэфф критических сборок godiva и jezebel

Критсборка	godiva	jezebel
Эксперимент	1,000 ± 0,001	1,000 ± 0,002
DANTSYS	1,0031	0,9990
PMSN1D	1,0031	0,9990

Значения, рассчитанные по программам PMSN1D и DANTSYS совпали, при этом наблюдается хорошее согласие с экспериментальным значением Кэфф.

Оценка величины гетерогенного эффекта, порождаемого твэлами реактора СВБР-100

Твэлы реакторной установки СВБР-100 /1/ располагаются в активной зоне по гексагональной решетке с шагом 1,36 см. В качестве топливной композиции в твэлах используется диоксид урана со средним по активной зоне обогащением 16,5 процентов. Горизонтальное поперечное сечение твэла через активную часть схематично показано рис. 4а. Топливная таблетка из UO₂ радиусом 5,45 мм имеет центральное отверстие радиусом 0,95 мм и помещена в стальную четырехреберную трубку с внутренним радиусом 5,6 мм и внешним эквивалентным (учитывающим площадь ребер навивки) радиусом 6,07966 мм. Полости твэла заполнены газом гелием. Снаружи твэл омывается эвтектическим сплавом свинца-висмута.

Рассчитано влияние учета гетерогенной структуры твэла на значение Кэфф, полученного для бесконечной решетки твэлов в одномерной цилиндрической геометрии при переходе к эквивалентной цилиндрической ячейке (рис. 4б) с условиями отражения на внешней границе.

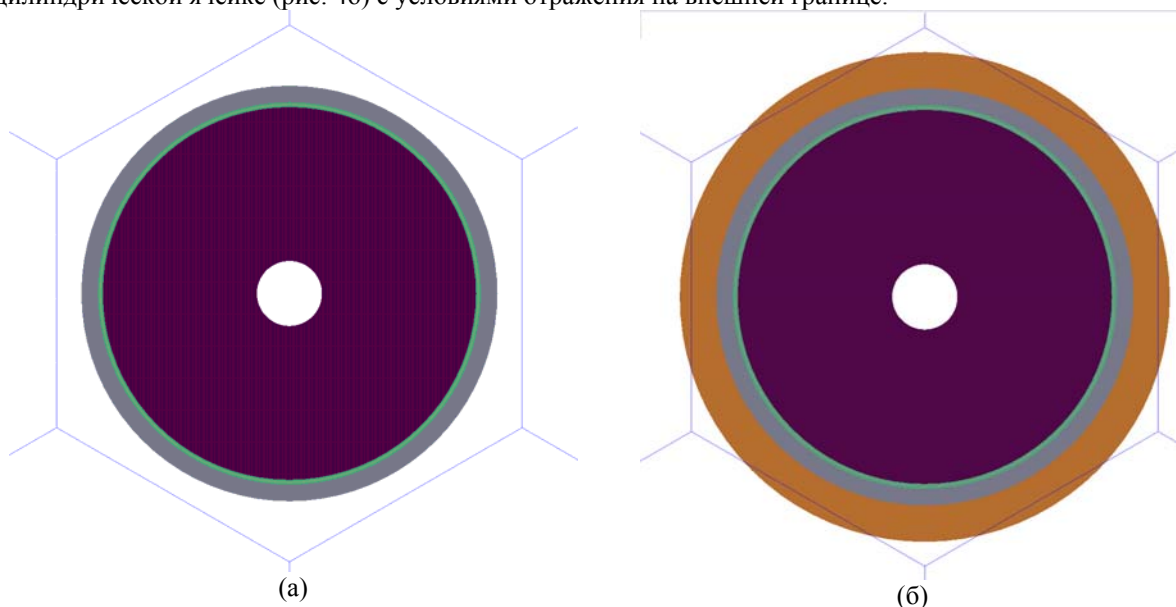


Рис. 3(а-б) Поперечное сечение твэла СВБР-100 (а) и эквивалентная ячейка (б)

Расчеты Кэфф, также как и в предыдущем разделе, выполнены по программе PMSN1D и по системе DANTSYS в P₅S₁₆ приближении: а) для гетерогенного представления твэла, и б) для гомогенного размешивания ядерно-физического состава материалов пропорционально объемным долям. Плотность эвтектического сплава была взята при температуре 200 °С. При подготовке нейтронно-физических констант температура материалов для учета эффекта Доплера была принята также равной 200 °С. Для расчета были взяты номинальные размеры конструкций (без учета теплового расширения). Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 Кэфф для твэлов СВБР-100 со средним обогащением, расположенных на бесконечной гексагональной решетке

Программа	Тип представления	Кэфф
PMSN1D	гетерогенное	1,3501
	гомогенное	1,3283
DANTSYS	гетерогенное	1,3502
	гомогенное	1,3284

Влияние гетерогенной структуры твэлов на значения Кэфф, рассчитанных для бесконечных по высоте и размещенных в бесконечной гексагональной решетке твэлов в гетерогенном и гомогенном представлении, обнаруживается в третьей значащей цифре. Реальная геометрия активной зоны реактора СВБР-100 имеет конечные размеры, в силу чего гетерогенные эффекты рассмотренного типа в ней будут

иметь меньший порядок. Учитывая плотное расположение твэлов в активной зоне реактора СВБР-100, жесткий спектр нейтронов реактора, и факт того, что длина свободного пробега быстрых нейтронов существенно превосходит характерные размеры тепловыделяющих элементов и каналов теплоносителя, можно сделать вывод о приемлемости использования в инженерных расчетах реактора СВБР-100 при подготовке нейтронно-физических констант простой гомогенизации материалов в расчетной ячейке. Однако, для проведения расчетов повышенной точности поправку на мелкомасштабную гетерогенность все же следует учитывать. Фактическое влияние тонкой структуры гетерогенной решетки для указанного реактора может быть оценено, например, на основе программ, реализующих метод Монте-Карло, при гомогенном и гетерогенном описании деталей активной зоны.

Заключение

В настоящей работе рассмотрены функциональные возможности созданной программы PMSN1D. Программа PNMSN1D реализована автором работы под научным руководством к.ф.-м.н. А.В. Воронкова (ИПМ им. М.В.Келдыша), к.т.н. А.В. Дедуля и В.В. Кальченко (ОКБ «ГИДРОПРЕСС»). Ядро программы предполагается использовать для исследования возможности улучшения методов учета мелкомасштабной пространственной гетерогенности в ядерных реакторах на быстрых нейтронах, в частности для подготовки нейтронно-физических констант простых топливных ячеек.

Рассмотрено применение программы для расчета Кэфф бенчмарк-экспериментов godiva и jezebel в сферической геометрии. С использованием цилиндрической геометрии и условия отражения на внешней границе эквивалентной ячейки выполнена оценка величины гетерогенных эффектов, порождаемых тепловыделяющими элементами активной зоны реакторной установки СВБР-100, расположенными на бесконечной периодической решетке.

Список литературы

1. А.В. Воронков, к.ф.-м.н.; Е.П. Сычугова, к.ф.-м.н. (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), А.В. Дедуль, к.т.н.; В.В. Кальченко; А.А. Николаев; Е.В. Ракшун (ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»). Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. Выпуск 24. Реакторные установки СВБР. Расчет кампании реактора СВБР-100 с учетом движения органов регулирования и компенсации. 2009
2. NEA/NSC/DOC(95)03/II, Volume II, HEU-MET-FAST-001. Bare, highly enriched uranium sphere (godiva). Raphael J. LaBauve, Los Alamos National Laboratory, 2002.
3. NEA/NSC/DOC(95)03/II, Volume II, HEU-MET-FAST-001. 240Pu Jezebel: bare sphere of plutonium-239 metal (20.1 at.% 240 Pu, 1.01 wt.% Ga). Evaluator R. Douglas O'Dell, Los Alamos National Laboratory, 1999.
4. DANTSYS 3.0, ORNL, RSIC Computer Code Collection CCC-547, August 1995.
5. TRANSX 2.15, RSIC Peripheral Shielding Routines Collection, PSR-317, February 1995.
6. А.В. Воронков, к.ф.-м.н.; В.В. Сеница, к.ф.-м.н. (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), А.В. Дедуль, к.т.н.; В.В. Кальченко (ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС»). Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. Выпуск 24. Реакторные установки СВБР. Библиотеки многогрупповых констант пакета РЕАКТОР-ГП. 2009
7. M.B. Chadwick et al., "ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology", Nuclear Data Sheets, Volume 107, Number 12, December 2006.