

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

УТВЕРЖДАЮ В ПЕЧАТЬ

Проректор по учебной и методической работе

\_\_\_\_\_ Д. А. Зубцов

\_\_\_\_\_ 2017 г.

М.И. Гуревич, Д.А. Шкаровский

**Расчет переноса нейтронов методом  
Монте-Карло по программе MSU  
в примерах**

*Допущено*

*Учебно-методическим объединением  
высших учебных заведений Российской Федерации  
по образованию в области прикладных математики и физики  
в качестве учебного пособия для студентов вузов  
по направлению подготовки «Прикладные математика и фи-  
зика», а также по другим математическим и естественно-  
научным направлениям и специальностям*

Зав кафедрой Физико-технической  
информатики

\_\_\_\_\_ А.Б.Бутко

Авторы

\_\_\_\_\_ М.И. Гуревич

\_\_\_\_\_ Д.А. Шкаровский

МОСКВА  
МФТИ  
2017

УДК 539.18:519.245(075) + 621.039(075)  
ББК 22.383я7 + 31.4.я73

*Гуревич М.И., Шкаровский Д.А.* **Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU в примерах:** Учебное пособие. М.: МФТИ (ГУ). – 158 с.

В пособии рассматриваются примеры исходных данных для программы MCU, предназначенной для расчёта переноса частиц методом Монте-Карло. Все примеры могут быть рассчитаны с помощью свободно распространяемой программы MCU-FREE, предназначенной для учебных и научно-поисковых целей.

В примерах рассматриваются решения основных задач, возникающих перед начинающим пользователем MCU. Подробно разобран пример задания исходных данных для расчета международного математического эксперимента по анализу гибридной активной зоны БН-600.

Основано на курсе лекций, которые читались в НИЯУ МИФИ и МФТИ, предназначено для студентов, аспирантов и специалистов, осваивающих расчёты методом Монте-Карло.

*Рецензенты:*     *д.ф.-м.н. А.М.Волощенко*  
                          *д.ф.-м.н. Н.В.Щукин*

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Материалы.....</b>	<b>5</b>
<b>2. Геометрия.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Источник .....</b>	<b>83</b>
3.1. Простой точечный источник .....	84
3.2. Сложный источник .....	86
<b>4. Регистрация .....</b>	<b>107</b>
<b>5. Расчетная модель реактора БН-600 .....</b>	<b>112</b>
5.1. Общее описание модели .....	112
5.2. Текст исходных данных для программы MCU .....	115
5.3. Исходные данные для физического модуля .....	123
5.4. Исходные данные для геометрического модуля .....	125
5.4.1. Основная геометрия .....	126
5.4.2. Прототипы ячеек сети .....	128
5.4.3. Прототипы элементов решетки, сети .....	132
5.4.4. Решетка .....	139
5.5. Исходные данные для модулей источника, регистрации, транспортного и управляющего .....	140
5.5.1. Данные для модуля источника.....	140
5.5.2. Данные для модуля регистрации .....	141
5.5.3. Данные для транспортного модуля .....	143
5.5.4. Данные для управляющего модуля .....	144
5.6. Результаты расчета .....	145
5.6.1. Раздел управляющего модуля .....	146
5.6.2. Раздел транспортного модуля .....	146
5.6.3. Раздел модуля регистрации.....	147
5.6.4. Раздел геометрического модуля .....	151
5.6.5. Качественное обсуждение результатов.....	152
<b>Список использованной литературы.....</b>	<b>157</b>
<b>Указатель примеров.....</b>	<b>158</b>

## Введение

Программа MCU предназначена для численного моделирования процессов переноса различного вида излучений в трёхмерных системах методом Монте-Карло. Все программы семейства MCU осуществляют моделирование взаимодействия излучения с веществом на основе информации из файлов оценённых ядерных данных. Для задания геометрии используется набор тел и комбинаторный подход, что позволяет описывать геометрию рассматриваемых практически без приближений. Подробно применение метода Монте-Карло и программы для расчетов систем, размножающих нейтроны, описано в [1].

В данном пособии рассматриваются примеры, отражающие основные потребности начинающего пользователя. Предполагается, что читатель знаком с материалом, изложенным в [1] или Руководстве пользователя любой программы MCU. Все примеры могут быть рассчитаны с помощью свободно распространяемой программы MCU-FREE, предназначенной для учебных и научно-поисковых целей.

Пособие можно условно разделить на две части: главы с 1 по 4 и глава 5. В пятой главе подробно разобран пример задания исходных данных для расчета международного математического эксперимента по анализу гибридной активной зоны БН-600. Эту главу можно читать отдельно, вне связи с предыдущими главами. В примерах глав 1 – 4 рассматриваются решения основных задач, возникающих перед начинающим пользователем MCU. Материалы этих глав в определенном смысле дополняют практический материал, представленный в главе пять.

Во всех примерах используются размерности, принятые в MCU, а именно: размеры – см, температура – К, углы – градусы, энергия – эВ. Кроме того, необходимо помнить, что в файле исходных данных все буквы должны быть латинскими, а *использовать табуляцию нельзя*. Последнее обстоятельство часто вызывает затруднения, так как аппарат проверки исходных данных MCU не позволяет легко распознать данную ошибку. Для того чтобы ее избежать, рекомендуется включать отображение символов табуляции в используемом для задания исходных данных текстовом редакторе и проявлять осторожность при переносе данных из программ для работы с электронными таблицами, например, Microsoft Excel.

## 1. Материалы

Физический модуль при выполнении расчета оперирует концентрациями изотопов в материалах, выраженными в размерности ядер/см<sup>3</sup> без указания множителя 10<sup>24</sup>. Иногда говорят, что концентрация изотопов в MSU задается в размерности ядер/(б·см), используя для выражения концентрации внесистемную единицу измерения площади 1 барн, численно равный 10<sup>-24</sup> см<sup>2</sup>.

При задании исходных данных можно задавать плотность материала в г/см<sup>3</sup>, а для нуклидов, составляющих данный материал задавать весовые или атомные проценты. Программа автоматически выполнит пересчет концентраций изотопов в ядер/(б·см).

Однако воспользоваться возможностями такой автоматизации удастся не всегда. Трудности возникают, например, при задании уранового топлива, поскольку обогащение часто дается в весовых процентах <sup>235</sup>U в уране, а не в материале топлива (UO<sub>2</sub>). Вторым типичным примером может служить вода, с растворенной в ней борной кислотой, концентрация которой часто указывается в граммах борной кислоты на литр воды.

### Пример 1.1. Вода

При описании материала, содержащего только воду (H<sub>2</sub>O), достаточно задать плотность воды и указать, что молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Программа автоматически выполнит нормировку заданных атомных долей таким образом, чтобы их сумма равнялась единице, после чего рассчитает ядерные концентрации водорода и кислорода в размерности ядер/(б·см). Результат этой автоматической обработки можно проверить в листинге (файл с расширением LST), если для карты PIN задать второй параметр равным 1.

```
PIN 1 1
MATR 1 DENSWA=0.998
H 2
O 1
FINISH
```

В листинг поступит дополнительная информация (приводится в сокращенном виде):

```
Debug print for material: 1
denswa: 0.998
H 6.67222E-02 ...
O 3.33611E-02 ...
End of debug print for material 1
```

Вместо атомных долей можно использовать весовые [2]. Рассчитаем весовые доли атомов водорода и кислорода в молекуле воды, используя

информацию из файла AW.LIB библиотеки MCU, в котором хранится информация по атомным весам нуклидов. Относительная атомная масса водорода равна 1,00794 а.е.м., а кислорода – 15,9994 а.е.м.. Учитывая, что значение молярной массы численно совпадает с относительной молекулярной массой вещества или относительной атомной массой элемента, рассчитываем молярную массу воды и весовые доли водорода и кислорода:

$$M_{H_2O} = 2M_H + M_O = 2 \cdot 1,00794 + 15,9994 = 18,01528 \text{ (г/моль)};$$

$$w_H = 2M_H / M_{H_2O} = 0,11189834;$$

$$w_O = M_O / M_{H_2O} = 0,88810166.$$

Подставим полученные значения в исходные данные, заменив при этом параметр DENSWA на DENSWW.

```
PIN 1 1
MATR 1 DENSWW=0.998
H 0.11189834
O 0.88810166
FINISH
```

Просмотрев листинг, можно убедиться, что концентрации, рассчитанные автоматически, не изменились.

Отметим, что для получения весовых долей можно было воспользоваться следующими формулами перевода атомных долей в весовые:

$$w_H = \frac{a_H \cdot A_H}{a_H \cdot A_H + a_O \cdot A_O},$$

$$w_O = \frac{a_O \cdot A_O}{a_H \cdot A_H + a_O \cdot A_O}.$$

Здесь  $w_H$ ,  $w_O$  – весовые доли,  $a_H$ ,  $a_O$  – атомные доли,  $A_H$ ,  $A_O$  – атомные веса H и O соответственно.

### Пример 1.2. Топливо

Для данного примера воспользуемся данными экспериментальных исследований на критической сборке ZR-6. В экспериментах, выполненных на этой сборке, использовалось топливо обогащением 1,6 %вес, 3,6 %вес и 4,6 %вес. Рассчитаем концентрации для уранового топлива ( $UO_2$ ) с обогащением по  $^{235}U$  1,6 %вес с содержанием  $^{234}U$  0,01 %вес.

При определении плотности  $UO_2$  необходимо принять во внимание, что ядерное топливо на сборке ZR-6 используется в виде таблеток. При их размещении в тепловыделяющий элемент остаются зазоры. Таким образом, средняя плотность топлива в тепловыделяющем элементе будет меньше, чем его плотность в таблетке. Радиографический контроль пока-

зал, что средняя величина зазора между таблетками составила 0,9 мм. Учет зазоров дает несколько процентов разницы между средней плотностью топлива в тепловыделяющем элементе ( $10,17 \text{ г/см}^3$ ) и его плотностью в таблетке ( $10,33 \text{ г/см}^3$ ). Для корректного моделирования экспериментов на ZR-6 в данном случае необходимо воспользоваться средней плотностью топлива.

Переведем весовые проценты в атомные. Для этого воспользуемся следующими формулами:

$$a_4 = \frac{w_4}{A_4} / \left( \frac{w_4}{A_4} + \frac{w_5}{A_5} + \frac{w_8}{A_8} \right),$$

$$a_5 = \frac{w_5}{A_5} / \left( \frac{w_4}{A_4} + \frac{w_5}{A_5} + \frac{w_8}{A_8} \right),$$

$$a_8 = 1 - a_4 - a_5.$$

Здесь  $a_4$ ,  $a_5$ ,  $a_8$  – атомные доли изотопов  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  в U,  $w_4$ ,  $w_5$ ,  $w_8$  – весовые доли изотопов  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  в U,  $A_4$ ,  $A_5$ ,  $A_8$  – атомные веса изотопов  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ .

Таким образом, учитывая, что

$$w_8 = 1 - w_4 - w_5$$

и используя информацию из файла AW.LIB библиотеки MCU, в котором хранится информация по атомным весам нуклидов, получаем

$$a_4 = 0,0001;$$

$$a_5 = 0,0162;$$

$$a_8 = 0,9837.$$

Поскольку в молекуле  $\text{UO}_2$  один атома урана и два атома кислорода можно задать исходные данные следующим образом.

```
PIN 1 1
MATR 1 DENSWA=10.17
U234 0.0001
U235 0.0162
U238 0.9837
O 2
FINISH
```

Программа автоматически выполнит расчет ядерных концентраций с использованием формулы, определяющей концентрацию  $N$  молекул  $\text{UO}_2$ :

$$N = \frac{\rho N_a}{M},$$

где  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>;  $N_a$  – число Авогадро, равное  $0,60221367 \cdot 10^{24}$  моль<sup>-1</sup>, заданное в программе без множителя  $10^{24}$ ;  $M$  – молярная масса, г/моль, рассчитываемая в данном случае как

$$M = a_4 A_4 + a_5 A_5 + a_8 A_8 + 2A_O,$$

где  $A_O$  – атомный вес кислорода.

Поскольку в молекуле  $UO_2$  один атом урана, то искомая концентрация всех изотопов урана в материале будет определяться полученным числом  $N$ , а каждого изотопа в отдельности, соответственно,  $a_4 \cdot N$ ,  $a_5 \cdot N$ ,  $a_8 \cdot N$ . Концентрация ядер кислорода в данном случае будет равна  $2N$ .

Результат можно посмотреть в листинге (приводится в сокращенном виде):

```
Debug print for material: 1
denswa: 10.17
U234 2.26833E-06 ...
U235 3.67470E-04 ...
U238 2.23136E-02 ...
O 4.53667E-02 ...
End of debug print for material 1
```

### Пример 1.3. Водный раствор борной кислоты

При проведении экспериментов на критической сборке ZR-6 замедлителем служила либо чистая вода, либо водный раствор борной кислоты  $H_3BO_3$  различной концентрации  $C_{H_3BO_3}$  [г/литр], т.е. грамм борной кислоты на литр воды. Основной сложностью в данном случае является то, что при добавлении в воду борной кислоты плотность получающегося раствора не равна исходной плотности воды. Описание эксперимента содержит следующие рекомендации по расчету концентраций водорода, кислорода и бора [3].

Предлагается использовать следующую формулу для расчета плотности раствора борной кислоты  $d(C_{H_3BO_3})$  для 21 °С:

$$d(C_{H_3BO_3}) = \frac{0,99799 + C_{H_3BO_3}/1000}{1 + C_{H_3BO_3}/1920} = \frac{0,99799}{1 + C_{H_3BO_3}/1920} + \frac{C_{H_3BO_3}}{1000 + C_{H_3BO_3}/1,92}.$$

Два слагаемых в правой части формулы определяют парциальные плотности  $H_2O$  и  $H_3BO_3$  в растворе. Предполагается, что для других температур плотность раствора будет изменяться пропорционально изменению плотности чистой воды.

Исходя из этого, ядерные концентрации Н, О и В в растворе борной кислоты при 21 °С можно рассчитать следующим образом.

$$N_H(21) = 2 \frac{0,60221 D_{H_2O}}{2A_H + A_O} + 3 \frac{0,60221 D_{H_3BO_3}}{3A_H + A_B + 3A_O},$$



$$N_O(21) = \frac{0,60221D_{H_2O}}{2A_H + A_O} + 3 \frac{0,60221D_{H_3BO_3}}{3A_H + A_B + 3A_O},$$

$$N_B(21) = \frac{0,60221D_{H_3BO_3}}{3A_H + A_B + 3A_O},$$

где

$$D_{H_2O} = \frac{0,99799}{1 + C_{H_3BO_3}/1920},$$

$$D_{H_3BO_3} = \frac{C_{H_3BO_3}}{1000 + C_{H_3BO_3}/1,92}.$$

При расчете концентраций для других температур необходимо воспользоваться плотностью воды  $\rho_{H_2O}$  при необходимой температуре и давлении:

$$N(T) = N(21)\rho_{H_2O}/0,99799.$$

Если вместо природного бора в расчете предполагается использовать его изотопы  $^{10}\text{B}$  и  $^{11}\text{B}$ , входящие в состав природного бора с концентрациями 19,8 и 80,2 ат. % соответственно, то:

$$N_{B10}(T) = 0,198N_B(T),$$

$$N_{B11}(T) = 0,802N_B(T).$$

Рассчитаем ядерные концентрации водорода, кислорода и бора для замедлителя при температуре 80 °С и концентрации борной кислоты 1 г/л. Воспользовавшись приведенными выше формулами и информацией из файла AW.LIB библиотеки MCU, в котором хранится информация по атомным весам нуклидов, получим:

$$D_{H_2O} = 0,99747 \text{ (г/см}^3\text{)},$$

$$D_{H_3BO_3} = 0,001 \text{ (г/см}^3\text{)},$$

$$N_H(21) = 6,6716\text{E-}02 \text{ (}10^{24} \text{ ядер/см}^3\text{)},$$

$$N_O(21) = 3,3372\text{E-}02 \text{ (}10^{24} \text{ ядер/см}^3\text{)},$$

$$N_B(21) = 9,7342\text{E-}06 \text{ (}10^{24} \text{ ядер/см}^3\text{)}.$$

Учитывая, что вода при температуре 80 °С и давлении в одну атмосферу имеет плотность 0,97182 г/см<sup>3</sup>, получаем искомые концентрации:

$$N_H(T) = 6,4966\text{E-}02 \text{ (}10^{24} \text{ ядер/см}^3\text{)},$$

$$N_O(T) = 3,2497\text{E-}02 \text{ (}10^{24} \text{ ядер/см}^3\text{)},$$

$$N_B(T) = 9,4790\text{E-}06 \text{ (}10^{24} \text{ ядер/см}^3\text{)}.$$

Часто единицей измерения концентрации борной кислоты является грамм борной кислоты на килограмм воды [г/кг]. Для того чтобы воспользоваться приведенными выше формулами необходимо сначала перевести это значение в [г/л]:

$$C_{H_3BO_3}[\text{г/л}] = 0,99799 C_{H_3BO_3}[\text{г/кг}].$$

Наряду с концентрацией борной кислоты  $C_{H_3BO_3}$  используется концентрация бора  $C_B$ , выражаемая в граммах бора на килограмм воды. Перевод в концентрацию борной кислоты осуществляется по формуле:

$$C_{H_3BO_3}[\text{г/кг}] = 5,72 C_B[\text{г/кг}]$$

## 2. Геометрия

Большая часть примеров не относится к реально рассчитываемым устройствам, поэтому они содержат данные только для геометрического модуля. Их можно визуализировать с помощью графического интерфейса MCU Office, поставляемого со всеми версиями программы MCU. Все рисунки получались с помощью этого интерфейса, потом к части из них было применено дополнительное редактирование. В каждом рисунке в фигурных скобках указываются параметры визуализации (координаты верхнего левого угла, правого нижнего угла и направление сверху вниз по экрану) с помощью которых можно получить данный разрез, однако, масштабы представления на страницах могут быть разными.

Во всех приведенных примерах координаты векторов или точек в пространстве будут представляться в виде вектор-строк. Соответственно, матрицы линейных преобразований записываются *справа* от вектора. Например, поворот вокруг оси OZ вектора  $(a, b, c)$  на угол 30 градусов запишется так

$$\begin{aligned} (a_1, b_1, c_1) &= (a \cos 30 - b \sin 30, a \sin 30 + b \cos 30, c) = \\ &= (a, b, c) \begin{vmatrix} \cos 30 & \sin 30 & 0 \\ -\sin 30 & \cos 30 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \end{aligned}$$

Последовательность выполнения преобразований для произведения матриц идет *слева направо*, например, для преобразования  $\vec{P}\vec{Q}$  сначала выполняется  $\vec{P}$ , а потом  $\vec{Q}$ .

### Пример 2.1. Основы комбинаторного описания геометрии

Одну и ту же конструкцию можно описать многими разными способами, которые будут все допустимы, но не одинаково хороши. В данном примере описан отрезок трубы, на внешней поверхности которой имеется

5 цилиндрических канавок для лучшего удержания резинового шланга (см. рис. 2.1).

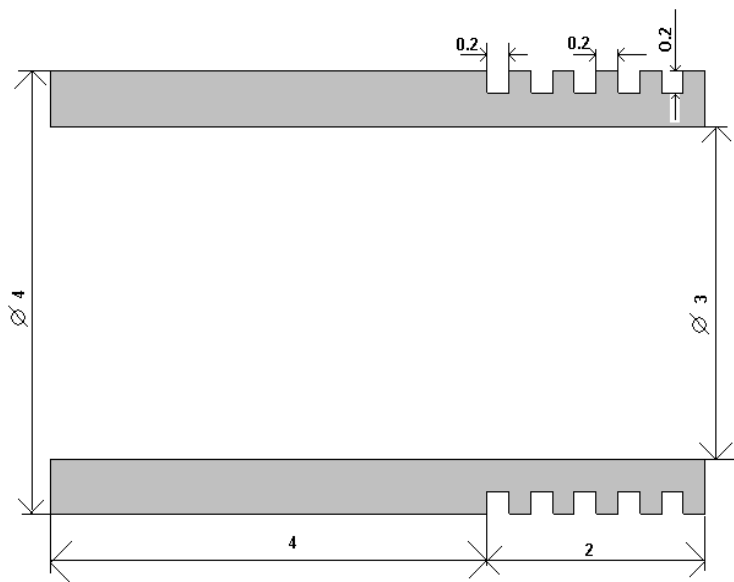


Рис. 2.1. Конец трубы для насадки шланга, размеры в сантиметрах.  
 $\{(-1, 3.1, 0) (7, -3.1, 0) (0, 1, 0)\}$

Далее будут приведены и прокомментированы три способа задания этой простой геометрии.

Чисто условно внешняя среда считается материалом с номером 2, а материал трубы имеет номер 4.

Для величин, которые из них следуют, используются имена, значения которым заданы с помощью интерпретатора арифметических выражений. Например, общая длина отрезка трубы задается с помощью выражения. В первых двух способах для описания канавок используются прямо числа, заданные цифрами.

$$\text{EQU LAL} = 4+2$$

В качестве контейнера взят достаточно большой цилиндр, в данном случае он не имеет большого значения, но лучше всегда задавать геометрию с каким-то контейнером. Точно также, в этом случае не играет роли, какие граничные условия заданы на гранях контейнера, для визуализатора это вообще не существенно.

Труба расположена горизонтально, то есть ее ось направлена по оси OX. Поэтому для цилиндров используется тело RCC.

Первый способ состоит в использовании тела RCC, цилиндры используются для описания металла, канавки получают вычитанием.

```

HEAD 1 0 0
CONT B B B
* container is a cylinder
RCZ CON 0 0 -5 10 10 ; цилиндр контейнера
EQU LAL = 4+2 ; длина отрезка трубы
EQU RI = 3/2 ; внутренний радиус трубы
EQU RE = 4/2 ; внешний радиус трубы
EQU RM = RE-0.2 ; радиус трубы в канавке
RCC TUBI -3 0 0 LAL 0 0 RI ; внутренняя полость
RCC TUBM -3 0 0 LAL 0 0 RM ; цилиндр под канавками
RCC TE00 -3 0 0 4 0 0 RE ; цилиндр трубы без канавок
RCC TE01 1.2 0 0 0.2 0 0 RE ;цилинд левее канавок
RCC TE02 1.6 0 0 0.2 0 0 RE ;первый зуб
RCC TE03 2.0 0 0 0.2 0 0 RE ;второй зуб
RCC TE04 2.4 0 0 0.2 0 0 RE ;третий зуб
RCC TE05 2.8 0 0 0.2 0 0 RE ;четвертый зуб
END
*
* Область, внешняя трубе
OUTGEN CON -TUBM -TE00
        -TE01 -TE02 -TE03 -TE04 -TE05 # Z=1 M=1
* Внутренняя полость
OUTIN TUBI # Z=3 M=1
* металл ближе к центру, чем дно канавок
PAM TUBM -TUBI # Z=4 M=4
        Метал правее канавок и зубы.
PAE TE00 -TUBM U TE01 -TUBM U
        TE02 -TUBM U TE03 -TUBM U
        TE04 -TUBM U TE05 -TUBM # Z=4 M=4
END
FINISH

```

Металлическая деталь описана в виде двух отдельных зон геометрического модуля: PAM и PAE. Однако в обеих этих зонах совпадают как номера регистрационных зон, так и номера материалов. Фактически, это одна зона. Ее можно было бы так и описать, пользуясь символом объединения U, но это не дало бы никакого улучшения, а читать описание геометрии было бы труднее. Внешняя полость (зона OUTGEN) и внутренняя полость (зона OUTIN) имеют одинаковые номера материалов, но разные номера регистрационных зон. Их нельзя объединить, не нарушая регистрации функционалов.

Второй способ принадлежит пользователю, который избегает использования для описания не вертикальных цилиндров тела RCC, предпочитая бесконечный цилиндр UCX и плоскости.

```

HEAD 1 0 0
CONT B B B
* container is a cylinder
RCZ CON 0 0 -5 10 10
EQU LAL = 4+2
EQU RI = 3/2
EQU RE = 4/2
EQU RM = RE-0.2
UCX TUBI 0 0 RI
UCX TUBM 0 0 RM
UCX TUBE 0 0 RE
PLX PKL -3
PLX PKR 3
PLX A00 1
PLX A01 1.2
PLX A02 1.4
PLX A03 1.6
PLX A04 1.8
PLX A05 2.0
PLX A06 2.2
PLX A07 2.4
PLX A08 2.6
PLX A09 2.8
END
*
OUTGEN CON -TUBE U CON -PKL U CON PKR # Z=1 M=1
OUTIN TUBI PKL -PKR # Z=3 M=1
OUTAD TUBE -TUBM A00 -A01 U TUBE -TUBM A02 -A03 U
      TUBE -TUBM A04 -A05 U TUBE -TUBM A06 -A07 U
      TUBE -TUBM A08 -A09 # Z=2 M=1
PAM TUBM -TUBI PKL -PKR # Z=4 M=4
PAE TUBE -TUBM PKL -A00 U TUBE -TUBM A01 -A02 U
      TUBE -TUBM A03 -A04 U TUBE -TUBM A05 -A06 U
      TUBE -TUBM A07 -A08 U TUBE -TUBM A09 -PKR
                                     # Z=4 M=4
END
FINISH

```

Отметим, что радиусы цилиндров заданы с помощью арифметических выражений, исходя из заданных диаметров и глубины канавок. Громоздкость описания вызвана тем, что для описания канавок и зубцов между ними получились длинные булевские выражения (зоны OUTAD и PAE).

Третий способ, самый простой для чтения. В нем используется тело RCC. Для описания металла задаются два цилиндра: с радиусом по дну канавок и с полным радиусом. Так же как в первом варианте фактически труба рассматривается как две вложенных трубы: та, что «под» канавками и та, что «над» канавками. В этом способе явно использованы только цифры с чертежа, то, что центр отрезка трубы лежит в начале координат, а так же счет канавок – 1,2,3,4,5.

```

HEAD 1 0 0
CONT B B B
*      container is a cylinder
RCZ CON 0 0 -5 10 10 ; цилиндр контейнера
EQU LAL = 4+2 ; длина отрезка трубы
EQU LFT = -LAL/2 ; левый край отрезка трубы
EQU RI = 3/2 ; внутренний радиус
EQU RE = 4/2 ; внешний радиус
EQU RM = RE-0.2 ; радиус дна канавок
RCC tubm LFT 0 0 LAL 0 0 RI ;внутренняя полость
RCC TUBM LFT 0 0 LAL 0 0 RM ;метал под дном канавок
RCC TUBE LFT 0 0 LAL 0 0 RE ;весь металл
RCC vd1 LFT+4 0 0 0.2 0 0 RE ;канавка 1
RCC vd2 LFT+4+2*0.2 0 0 0.2 0 0 RE ;канавка 2
RCC vd3 LFT+4+4*0.2 0 0 0.2 0 0 RE ;канавка 3
RCC vd4 LFT+4+6*0.2 0 0 0.2 0 0 RE ;канавка 4
RCC vd5 LFT+4+8*0.2 0 0 0.2 0 0 RE ;канавка 5
END
*
*      область вне трубы без учета канавок
OUTGEN CON -TUBE # Z=1 M=1
*      Внутренность трубы
OUTIN tubm # Z=3 M=1
*      канавки
OUTAD vd1 -TUBM U vd2 -TUBM vd2 U vd3 -TUBM U
vd4 -TUBM U vd5 -TUBM # Z=2 M=1
*      металл
PAM TUBM -tubm U
TUBE -TUBM -vd1 -vd2 -vd3 -vd4 -vd5 # Z=4 M=4
END
FINISH

```

Отметим, что в этом способе задания геометрии цилиндр внутренней полости и следующий по размеру цилиндр имеют имена из одних и тех же букв в одинаковом порядке, но в первом случае использованы строчные буквы, а во втором – заглавные. Это сделано, чтобы продемонстрировать, что строчные и заглавные буквы различаются.

### Пример 2.2. Движение тел

Описываемая система состоит из цилиндрического бака с водой, высотой 20 см, радиусом 10 см и толщиной стенки 0,7 см. Внутри бака в центральной горизонтальной плоскости, но смещенный на 1 см по оси  $OX$  относительно центра бака, находится сферический источник нейтронов. На расстояниях в 3 см от него в горизонтальной плоскости находятся два датчика, состоящие из прямоугольной коробки размерами 1,2х1,2х4 см и цилиндрического детектора с высотой 4 см и радиусом 0,4 см. Один датчик лежит на оси  $OX$ , другой повернут относительно первого на угол 30 градусов вокруг вертикальной оси, проходящей через центр источника. Горизонтальное сечение системы приведено на рис. 2.2.

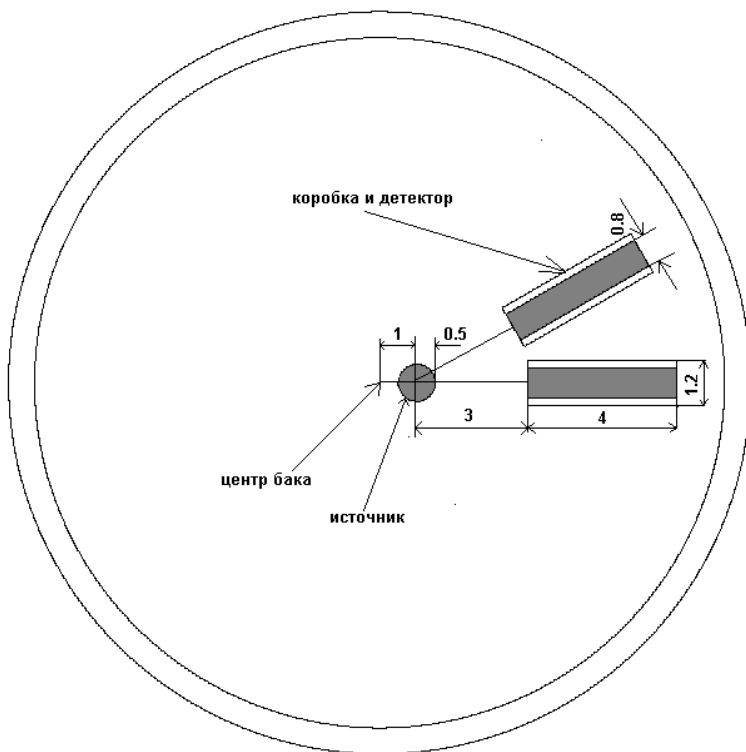


Рис. 2.2. Горизонтальное сечение по центральной плоскости  
 $\{(-11, 10.3, 0) (11, -10.3, 0) (0, 1, 0)\}$

Далее приведено задание геометрии для этого варианта.

```

HEAD 5 0 400
CONT B B B
EQU HSM = 20 ; высота контейнера
EQU RSM = 10 ; радиус контейнера
EQU WL = 0.7 ; толщина стенки
EQU SH0 = 1 ; смещение источника относительно центра
EQU SD = 4 ; длина датчика
EQU DD = 1.2 ; толщина датчика
EQU RD = 0.4 ; радиус детектора
*
RCZ CN 0 0 -HSM/2 HSM RSM
RCZ C0 0 0 -HSM/2 HSM RSM-WL
SPH SOU SH0,0,0 0.5
RPP DCH0 SH0+3, SH0+3+SD -DD/2, DD/2 -DD/2, DD/2
RCC RCH0 SH0+3, 0, 0 SD, 0, 0 RD
TRANSF DCH1 DCH0 RZ 1 0 0 30
TRANSF RCH1 RCH0 RZ 1 0 0 30
END
WA CN -C0 # Z=3 M=6
VD C0 -SOU -DCH0 -DCH1 # Z=1 M=1
SO SOU # Z=2 M=4
CHL DCH0 -RCH0 U DCH1 -RCH1 # Z=4 M=3
DT0 RCH0 # Z=5 M=2
DT0 RCH1 # Z=6 M=2
END
FINISH

```

В заданиях геометрий, созданных другими пользователями можно вместо конструкции

RZ x y 0 φ

встретить конструкцию

R x y φ

Она осталась от устаревшего модуля, когда возможностей для движения было намного меньше. Эти конструкции эквивалентны.

Двигать можно не только тела, прямо заданные, но и тела, ранее определенные с помощью движений. Ниже приведен пример данных с тремя датчиками, приме тела третьего получены из тел второго, поворотом на 60 градусов. Рисунок легко получить с помощью разреза с теми же параметрами, что у предыдущего.

```

HEAD 5 0 400
CONT B B B
EQU HSM = 20 ; высота контейнера

```



```

EQU RSM = 10 ; радиус контейнера
EQU WL = 0.7 ; толщина стенки
EQU SH0 = 1 ; смещение источника относительно центра
EQU SD = 4 ; длина датчика
EQU DD = 1.2 ; толщина датчика
EQU RD = 0.4 ; радиус детектора
*
RCZ CN      0 0 -HSM/2      HSM      RSM
RCZ C0      0 0 -HSM/2      HSM      RSM-WL
SPH      SOU      SH0,0,0      0.5
RPP DCH0     SH0+3, SH0+3+SD      -DD/2, DD/2      -DD/2, DD/2
RCC RCH0     SH0+3, 0, 0      SD, 0, 0      RD
TRANSF DCH1   DCH0      RZ 1 0 0      30
TRANSF RCH1   RCH0      RZ 1 0 0      30
TRANSF DCH2   DCH1      RZ 1 0 0      60
TRANSF RCH2   RCH1      RZ 1 0 0      60
END
WA      CN -C0                                     # Z=3      M=6
VD      C0 -SOU -DCH0 -DCH1 -DCH2                # Z=1      M=1
SO      SOU                                     # Z=2      M=4
CHL     DCH0 -RCH0 U      DCH1 -RCH1 U
        DCH2 -RCH2 # Z=4      M=3
DT0     RCH0 # Z=5      M=2
DT1     RCH1 # Z=6      M=2
DT2     RCH2 # Z=7      M=2
END
FINISH

```

### Пример 2.3. Решетка

Если бы в предыдущем примере датчиков было больше, то задавать каждый из них вручную с помощью движений тел было бы неудобно. Разумнее использовать решетку, что и демонстрирует этот пример.

```

HEAD 5 0 400
CONT B B B
EQU HSM = 20 ; высота контейнера
EQU RSM = 10 ; радиус контейнера
EQU WL = 0.7 ; толщина стенки
EQU SH0 = 1 ; смещение источника относительно центра
EQU SD = 4 ; длина датчика
EQU DD = 1.2 ; толщина датчика
EQU RD = 0.4 ; радиус детектора
*
RCZ CN      0 0 -HSM/2      HSM      RSM
RCZ C0      0 0 -HSM/2      HSM      RSM-WL
SPH      SOU      SH0,0,0      0.5
END

```

```

WA      CN  -C0                      # Z=3  M=6
VD      C0  -SOU                     # Z=1  M=1
SO      SOU                          # Z=2  M=4
END
*
LCELL   P
RPP     DD    3, 3+SD                -DD/2, DD/2    -DD/2, DD/2
RCC     RD    3, 0, 0                SD, 0, 0      RD
END
CH       DD -RD                      # Z=4  M=3   ;   /4:3
DT       RD                          # iZ=1 M=2   ;   /-1:2
END
ENDL
*
LATT     GLTL                      VD
LISTEL   P
PARM     SH0,0,0                    /RZG SH0,0,0 30      /RZG SH0,0,0 60
                                                /RZG SH0,0,0 90      /RZG SH0,0,0 120
FINISH

```

Здесь имеются пять датчиков, расположенных в горизонтальной плоскости, вокруг источника по кругу с шагом в 30 градусов.

Горизонтальный срез этого варианта представлен на рис. 2.3.

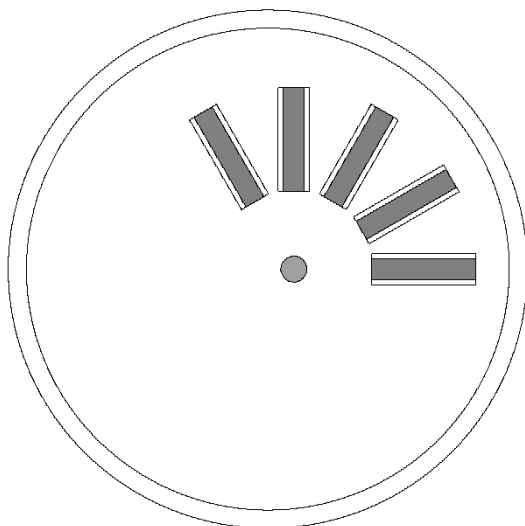


Рис. 2.3. Горизонтальный срез решетки датчиков  
 $\{(-11, 10.3, 0) (11, -10.3, 0) (0, 1, 0)\}$

В прототипе элемента решетки цилиндр уже сдвинут от начала координат для того, чтобы при описании решетки не было нужды задавать различные сдвиги для разных элементов.

Рассмотрим теперь более сложное движение, также реализуемое с помощью конструкции решетки. В этом случае в системе с тем же баком и тем же источником имеется только 2 датчика. Первый расположен на оси  $OX$  в прежней позиции. Второй получается из положения первого путем двух последовательных поворотов. Первый – это поворот на 50 градусов вокруг оси, параллельной  $OY$  и проходящей через центр датчика. Второй – это поворот на 45 градусов вокруг оси, параллельной  $OZ$  и проходящей через центр датчика.

Кроме того в вариант добавлена шестиугольная призма из того же материала, что и у коробки, у которой есть цилиндрический вкладыш из того же материала. Размер призмы под ключ составляет 1,2 см, высота совпадает с толщиной коробки, радиус цилиндра равен 0,3 см. Центр нижнего основания призмы лежит в плоскости  $OXY$  на расстоянии 4 см от центра источника по направлению биссектрисы осей  $OX$  и  $OY$ . Для этой детали существует отдельный прототип элемента решетки с именем Q. Это имя помещено в список имен прототипов элементов (предложение LISTEL) и занимает там вторую по счету позицию. В предложении PARM перед тем как задать положение этой детали стоят символы /2, означающие, что данный элемент соответствует второму прототипу. Данный элемент сдвигается на свое место без поворота.

Проще всего задать поворот с помощью конструкции G, перемножив матрицу поворота на угол  $\beta$  вокруг оси  $OY$  на матрицу поворота на угол  $\alpha$  градусов вокруг оси  $OZ$ .

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \\ = \begin{vmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{vmatrix} \end{aligned}$$

На рис. 2.4 и 2.5 показаны сечения этой системы.

В примере для угла  $\alpha = 45$  синус и косинус обозначены константами  $sa$  и  $ca$ , а для угла  $\beta = 50$  синус и косинус обозначены константами  $sb$  и  $cb$ .

Обратите внимание, что для конструкции GG, как и для конструкции G **матрица вводится по строкам**.

```
HEAD 5 0 400
CONT В В В
EQU HSM = 20 ; высота контейнера
EQU RSM = 10 ; радиус контейнера
```

```

EQU WL = 0.7 ; толщина стенки
EQU SH0 = 1 ; смещение источника относительно центра
EQU SD = 4 ; длина датчика
EQU DD = 1.2 ; толщина датчика
EQU RD = 0.4 ; радиус детектора
*
RCZ CN 0 0 -HSM/2 HSM RSM
RCZ C0 0 0 -HSM/2 HSM RSM-WL
SPH SOU SH0,0,0 0.5
END
WA CN -C0 # Z=3 M=6
VD C0 -SOU # Z=1 M=1
SO SOU # Z=2 M=4
END
* прототип датчика
LCELL P
RPP DD 3, 3+SD -DD/2, DD/2 -DD/2, DD/2
RCC RD 3, 0, 0 SD, 0, 0 RD
END
CH DD -RD /4:3
DT RD /-1:2
END
ENDL
* прототип шестигранной детали
LCELL Q
HEXY H0 0, 0, -DD/2 DD 1.2
RCZ R0 0, 0, -DD/2 DD 0.3
END
CH H0 -R0 /4:3
DT R0 /5:5
END
ENDL
*
EQU ca = cos(45)
EQU sa = ca ; sin(45)
EQU cb = cos(50)
EQU sb = sin(50)
LATT GLTL VD
LISTEL P Q
PARM SH0,0,0
/GG SH0,0,0 ca*cb sa*cb sb
-sa ca 0
-ca*sb -sa*sb cb
/2 SH0+4*ca, 4*sa, 0
FINISH

```

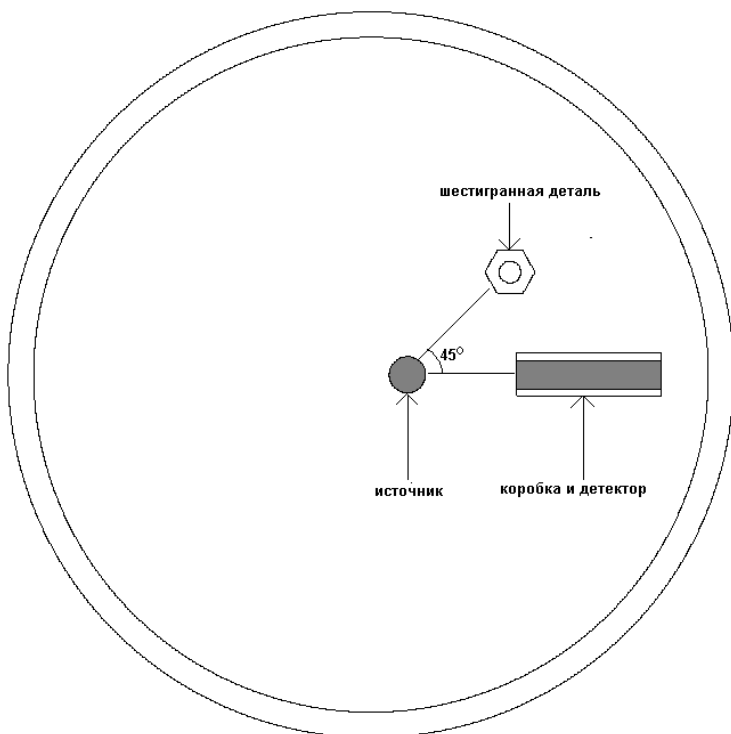


Рис. 2.4. Горизонтальный разрез третьего варианта  
 $\{(-11, 10.3, 0) (11, -10.3, 0) (0, 1, 0)\}$

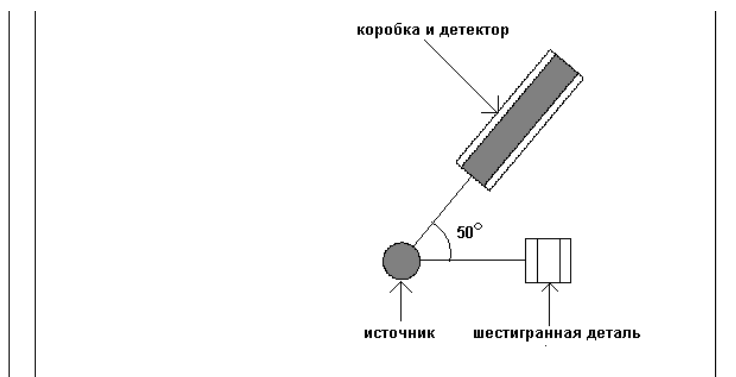


Рис. 2.5. Вертикальный разрез третьего варианта  
 $\{(-2, -2, 6.5) (11, 11, -2.3) (0, 0, 1)\}$

#### Пример 2.4. Задание кассеты с помощью решетки

В этой группе вариантов система – это двумерная бесконечная по горизонтали решетка кассет. Сверху и снизу вакуум, так что происходит утечка.

Все кассеты одинаковы и имеют форму шестигранной призмы. Бесконечную решетку можно представить одной кассетой, на боковых гранях которой заданы условия трансляции.

Внутри кассеты расположена правильная шестигранная решетка из девятнадцати стержней. В центральной позиции расположена трубочка из нержавеющей стали, внутри которой находится цилиндрический поглотитель из карбида бора; между поглотителем и трубочкой пустота. Остальные стержни – это тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ). Это циркониевые трубочки, внутри которых цилиндр топлива из оксида обогащенного урана. Между топливом и трубочкой пустой зазор.

Шаг решетки стержней – 1,27 см.

Наружный диаметр трубочки поглотителя – 0,96 см.

Толщина трубочки – 0,05 см.

Диаметр поглотителя – 0,8 см.

Наружный радиус трубочки ТВЭЛ – 0,4525 см.

Внутренний радиус трубочки ТВЭЛ – 0,3875 см.

Радиус топлива – 0,38 см.

Высота всех стержней – 85 см.

Кассета имеет внутреннюю полость с водой и чехол из нержавеющей стали. Чехол закрывает полость не только сбоку, но и сверху и снизу. Размер кассеты под ключ выбран так, чтобы грани с малым зазором проходили по внешней границе стержней.

Таким образом, размер под ключ полости – это

$$4 \cdot 1,27 \cdot \sin(60) + 2 \cdot 0,4525 + \epsilon.$$

Толщина чехла – 0,1 см.

Размеры кассеты не имеют никакого реального смысла, но подобраны так, чтобы бесконечная решетка была критичной.

Горизонтальный разрез кассеты представлен на рис. 2.6, где поглотитель и топливо изображены разными штриховками.

Рассмотрены три варианта задания с помощью конструкции решетки, все они содержат все строки, необходимые для запуска на счет.

В первом варианте в качестве элементов решетки выступают ТВЭЛы и поглотитель, внешние формы которых есть цилиндры. Эти цилиндры «вытесняют» часть объема полости с водой, но далеко не весь объем.

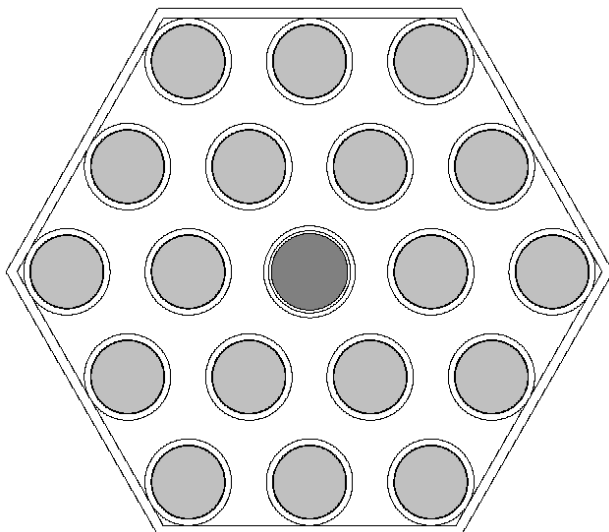


Рис. 2.6. Горизонтальный разрез кассеты  
 $\{(-3.6, 3.1, 10) (3.6, -3, 10) (0, 1, 0)\}$

```

PIN 1 0
TEMPR 300.
MATR 1
U235 0.0008255
U238 0.022105
O 0.045861
MATR 2
ZR 0.04273
NB 0.000432
HF 6.6E-6
MATR 3
H 0.066714
O 0.033357
MATR 4
AL 1.E-10
MATR 5
FE 0.0567821
CR 0.0163826
NI 0.0074519
C 4.600027E-4
MN 1.67625E-3
SI 1.63945E-3
TI 9.61271E-6
MATR 6

```

```

C      7.350E-02
B10    0.260E-02
B11    1.056E-02
END
EGRC    1.0E+19,  1.,  0.
FINISH
HEAD    1      0      500
CONT    B B T T T T T T
EQU      HG = 85
EQU      EPS = 1E-4
EQU      a  = 1.27      ; шаг решетки
EQU      rc = 0.4525    ; радиус твэл
EQU      rz = 0.3875    ; радиус зазора в твэл
EQU      rf = 0.38      ; радиус топлива
EQU      dt = 0.96      ; диаметр трубки с поглотителем
EQU      tw = 0.05      ; толщина стенки трубки
EQU      da = 0.8       ; диаметр поглотителя
EQU      tt = 0.1       ; толщина бака
EQU      DKCI = a*sin(60)*4+2*rc+EPS
EQU      DKCE = DKCI+2*tt
*
HEXY CNT 0 0 -tt HG+tt*2 DKCE
HEXY KAC 0 0 0 HG DKCI
END
CHEHOL CNT -KAC /5:5
KACCET KAC /3:3
END
C=C SHOW
LCELL FU ; твэл
RCZ CL 0,0,0 HG rc
RCZ Z 0,0,0 HG rz
RCZ F 0,0,0 HG rf
END
CLD CL -Z /2:2
ZAR Z -F /4:4
FUL F /1:1
END
ENDL
LCELL TU ; поглотитель
RCZ S 0,0,0 HG dt/2
RCZ Z 0,0,0 HG dt/2-tw
RCZ A 0,0,0 HG da/2
END
CLD S -Z /5:5
ZAR Z -A /4:4
FUL A /6:6
END
ENDL

```



```

LATT   G2AR   KACCET
LISTEL  FU TU
PARM    -2:2   -2:2   0,0,0  a,0,0  -a/2  a*SIN(60),0
          1:2,-2   2,-1   -2,1   -2:-1,2   /2 0,0
FINISH
SPNT    0.2, 0.15, HG/2
FINISH
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY      0
RCT      18   101
ZRCT     0
END
FINISH
BRG 1 0
FINISH
NTOT    1000
NBAT     5
FINISH
NAMVAR   ex15
MAXSER   250
NPRINT   0
DTZML    5
FINISH

```

Используется решетка вида G2AR. Нулевая позиция есть начало координат системы, совпадающее с центром нижнего основания полости. Диапазон изменения индексов симметричен: Диапазон изменения индексов симметричен:  $-2 \leq i \leq 2$ ,  $-2 \leq j \leq 2$ . Вектора сдвигов, порождающие решетку, заданы как  $(a, 0, 0)$  и  $(a \cos(120), a \sin(120), 0)$ . Для того чтобы убрать 6 лишних позиций  $(-2,1)$ ,  $(-2,2)$ ,  $(-1,2)$ ,  $(1,-2)$ ,  $(2,-2)$ ,  $(2,-1)$  в нижнем правом и верхнем левом углах получающегося параллелограмма из 25 позиций, они перечислены в предложении PARM сразу после векторов сдвига.

В предложении LISTEL дан список используемых прототипов элементов решетки: FU – твэл и TU – поглотитель.

В предложении PARM после перечисления не используемых позиций стоит конструкция /2 0,0. Она означает, что в позиции 0,0 должен стоять элемент, соответствующий второму прототипу из списка, то есть TU. В позиции, для которых не указан явно номер прототипа, ставится первый прототип, то есть FU. Явно задавать позиции для первого прототипа не следует.

Решетка налагается на геометрическую зону с именем KACCET. Все элементы полностью лежат в этой зоне, ни один не пересекается с дополнением, *это важно*.

После окончания задания основной геометрии стоит карта

C=C SHOW

Она вызывает печать значений всех именованных с помощью карт EQU или SET констант.

Если эта карта стоит внутри определения прототипа элемента решетки или прототипа ячейки сети, то печатаются как константы, определенные в основной геометрии, так и локальные константы, определенные в данном прототипе и только в нем доступные. Если, как в данном примере, она стоит вне прототипа, то печатаются лишь константы основной геометрии. Ниже приводится результат ее действия.

```

= = = = = TABLE OF GLOBAL CONSTANTS = = = = =
              SCALARS
HG 8.50000E+01 EPS 1.00000E-04 a    1.27000E+00 rc    4.52500E-01
rz 3.87500E-01 rf  3.80000E-01 dt    9.60000E-01 tw    5.00000E-02
da 8.00000E-01 tt  1.00000E-01 DKCI 5.30451E+00 DKCE 5.50451E+00
= = = = =

```

В данном случае интерес могут представить константы DKCI, DKCE, определенные через параметры решетки и размер стержня с топливом.

Такой способ задания с помощью решетки наиболее прост и надежен, Однако, он имеет один существенный дефект.

При наложении решетки на зону KACCET получается зона вида шестигранной призмы (исходное описание зоны), из которой вычтено 19 цилиндров. Получается зона, образованная 20 телами. Это число еще не велико, и замедление работы геометрического модуля будет незначительным. Предположим, однако, что использована кассета с  $2 \cdot n + 1$  рядами стержней. Легко подсчитать, что всего получится  $3 \cdot n \cdot (n + 1) + 1$  стержень. Для кассеты ВВЭР-1000, например,  $n$  равно 10, то есть число стержней составит 331, и зона с водой будет уже достаточно сложна, что может сказаться на быстродействии. При этом существенен объем такой сложной зоны, если она мала, то доля нейтронов в ней также мала и значительного замедления не произойдет. Существенны те события, которые требуют для моделирования большого времени и часто встречаются. В нашем же случае, шаг решетки ощутимо превосходит диаметр стержней, и объем воды превышает объем стержней.

Было бы лучше полностью или почти полностью заполнить зону элементами решетки, каждый из которых был бы достаточно прост. Для работы геометрического модуля такая конструкция более предпочтительна.

Для данной системы естественная форма элементов, заполняющих полость – это шестигранная призма. Далее показано, как это можно описать.

```

PIN 1 0
TEMPR 300.
MATR 1
U235 0.0008255
U238 0.022105
O 0.045861
MATR 2
ZR 0.04273
NB 0.000432
HF 6.6E-6
MATR 3
H 0.066714
O 0.033357
MATR 4
AL 1.E-10
MATR 5
FE 0.0567821
CR 0.0163826
NI 0.0074519
C 4.600027E-4
MN 1.67625E-3
SI 1.63945E-3
TI 9.61271E-6
MATR 6
C 7.350E-02
B10 0.260E-02
B11 1.056E-02
END
EGRC 1.0E+19, 1., 0.
FINISH
HEAD 5 0 500
CONT B B T T T T T T
EQU HG = 85
EQU EPS = 1E-4
EQU a = 1.27 ; шаг решетки
EQU rc = 0.4525 ; радиус твэл
EQU rz = 0.3875 ; радиус зазора в твэл
EQU rf = 0.38 ; радиус топлива
EQU dt = 0.96 ; диаметр трубки с поглотителем
EQU tw = 0.05 ; толщина стенки трубки
EQU da = 0.8 ; диаметр поглотителя
EQU tt = 0.1 ; толщина бака
EQU DKCI = a*sin(60)*4+2*rc+EPS
EQU DKCE = DKCI+2*tt

```

```

*
HEXY CNT      0 0 -tt HG+tt*2 DKCE
HEXY KAC(GKC) 0 0 0   HG      DKCI
END
C=C SHOW
CHEHOL  CNT -KAC      /5:5
KACCET  KAC          /3:3
END
LCELL    FU                      ; ТВЭЛ
HEXX W   0,0,0   HG a+1E-6
RCZ  CL  0,0,0   HG rc
RCZ  Z   0,0,0   HG rz
RCZ  F   0,0,0   HG rf
END
WAT    W  -CL      /7:3
CLD    CL  -Z      /2:2
ZAR    Z   -F      /4:4
FUL    F          /1:1
END
ENDL
LCELL    TU                      ; ПОГЛОТИТЕЛЬ
HEXX W   0,0,0   HG a+1E-6
RCZ  S   0,0,0   HG dt/2
RCZ  Z   0,0,0   HG dt/2-tw
RCZ  A   0,0,0   HG da/2
END
WAT    W  -S      /7:3
CLD    S  -Z      /5:5
ZAR    Z   -A      /4:4
FUL    A          /6:6
END
ENDL
LATT    G2AR    KACCET
LISTEL  FU(GKC) TU
PARM    -2:2  -2:2  0,0,0 a,0,0  -a/2 a*SIN(60),0
        1:2,-2   2,-1   -2,1   -2:-1,2   /2 0,0
FINISH
SPNT    0.2, 0.15, HG/2
FINISH
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY      0
RCT      18    101
ZRCT     0
END

```

```

FINISH
BRG 1 0
FINISH
NTOT 1000
NBAT 5
FINISH
NAMVAR ex15
MAXSER 250
NPRINT 0
DTZML 5
FINISH

```

Теперь прототип элемента FU и прототип элемента TU в качестве формы (первого тела) имеют шестигранную призму, ориентация которой иная, чем ориентация шестигранника полости. Также добавлена одна зона, между формой элемента и внешним цилиндром. Она заполнена водой, но номер ее регистрационной зоны выбран другим, чтобы отличить ее от собственно зоны КАССЕТ.

На рис. 2.7 показано, что при этом получается, причем, зона КАССЕТ, не заполненная решеткой, помечена штриховкой.

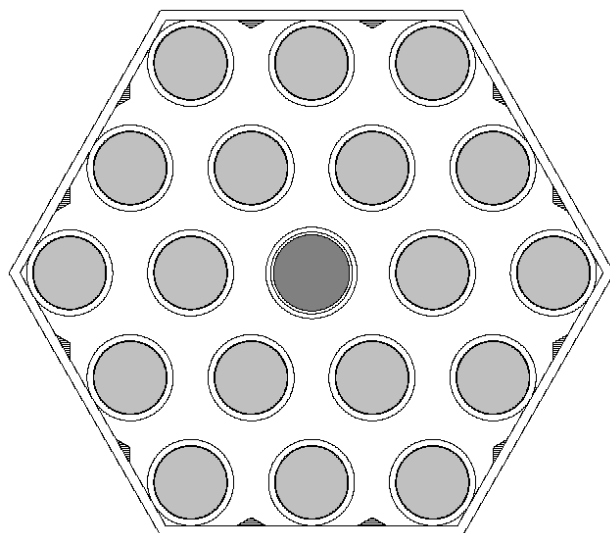


Рис. 2.7. Горизонтальное сечение  
 $\{(-3.6, 3.1, 10) (3.6, -3, 10) (0, 1, 0)\}$

Зона КАССЕТ не полностью вытеснена – остались маленькие уголки, но их объем уже мал, и геометрический модуль будет редко работать со сложной зоной и терять на это время.

На рис. 2.8 для того, чтобы были видны границы отдельных элементов, регистрационные зоны для воды во всех элементах сделаны разными. Для этого в прототипе элемента FU в соответствующей зоне номер регистрационной зоны задан как размножаемый указатель, то есть строка

WTF      W -CL      /7:7

заменена на строку

WTF      W -CL      /-1:7

При генерации решетки все геометрические зоны с таким указателем автоматически получают различные номера регистрационных зон, не совпадающие ни с одним прямо указанным номером. Полезно получить такой рисунок с помощью визуализации в цветном режиме.

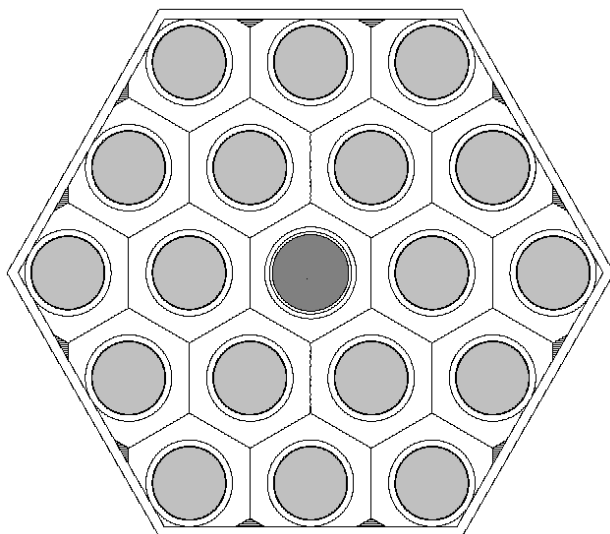


Рис. 2.8. Покрывание шестиугольными элементами  
 $\{(-3.6, 3.1, 10) (3.6, -3, 10) (0, 1, 0)\}$

Из рис. 2.8 видно, что часть шестиугольных элементов оказывается перерезанными границами зоны КАССЕТ, то есть тела КАС. В программе

MCU такое усечение автоматически не предусмотрено, поэтому, пользователь должен его сам организовать.

Для этого служат так называемые глобальные имена тел основной геометрии. Эти имена доступны при описании прототипов элементов решетки, причем при размещении элемента данные тела остаются на своих местах в пространстве. Также их можно использовать при задании решетки. Глобальное имя указывается в скобках после основного имени. В данном случае это конструкция KAC(GKC).

В предложении LISTEL после имени прототипа можно указать в скобках одно или несколько глобальных имен, разделенных пробелами. Некоторые из них могут иметь знак минус, что означает дополнение. Такая конструкция обеспечивает «усечение» зон любого элемента, полученного из этого прототипа пересечением с заданными телами или их дополнениями. В данном примере это конструкция FU(GKC) в строке LISTEL.

Для прототипа TU «усечение» не указано, так как соответствующий элемент не лежит на периферии решетки.

Следует отметить, что шестиугольная призма в обоих прототипах элементов вместо очевидной конструкции

```
HEXX W 0,0,0 HG a
```

задана как

```
HEXX W 0,0,0 HG a+1E-6
```

Размер под ключ несколько увеличен. Это связано с тем, что при точном описании шестигранника необходимы величины типа

$$\sin(60) = \sqrt{3}/2,$$

а ЭВМ имеет дело с ограниченной точностью представления чисел. Поэтому, при задании без увеличения размера прототипа между элементами могут образовываться микроскопические щели. Геометрический модуль не знает, должен ли быть вытеснен весь объем зоны, на которую идет наложение, поэтому он будет иногда генерировать микроскопические отрезки между двумя элементами. При расчете объемных функционалов это не важно, но при расчете токов между элементами это может существенно исказить результат.

Подобный дефект легко заметить, если элементы решетки полностью вытесняют зону наложения. Для демонстрации этого в следующем варианте задания данных зона KACCET разбита на внешнее шестиугольное кольцо (зона KACCЕ7) и внутренний шестигранник (KACCЕ3).

```
PIN 1 0  
TEMPR 300.  
MATR 1
```

```

U235 0.0008255
U238 0.022105
O 0.045861
MATR 2
ZR 0.04273
NB 0.000432
HF 6.6E-6
MATR 3
H 0.066714
O 0.033357
MATR 4
AL 1.E-10
MATR 5
FE 0.0567821
CR 0.0163826
NI 0.0074519
C 4.600027E-4
MN 1.67625E-3
SI 1.63945E-3
TI 9.61271E-6
MATR 6
C 7.350E-02
B10 0.260E-02
B11 1.056E-02
END
EGRC 1.0E+19, 1., 0.
FINISH
HEAD 5 0 500
CONT B B T T T T T T
EQU HG = 85
EQU EPS = 1E-4
EQU a = 1.27 ; шаг решетки
EQU rc = 0.4525 ; радиус твэл
EQU rz = 0.3875 ; радиус зазора в твэл
EQU rf = 0.38 ; радиус топлива
EQU dt = 0.96 ; диаметр трубки с поглотителем
EQU tw = 0.05 ; толщина стенки трубки
EQU da = 0.8 ; диаметр поглотитель
EQU tt = 0.1 ; толщина бака
EQU DKCI = a*sin(60)*4+2*rc+EPS
EQU DKCE = DKCI+2*tt
*
HEXY CNT 0 0 -tt HG+tt*2 DKCE
HEXY KAC(GKC) 0 0 0 HG DKCI
HEXY KA0 0 0 0 HG DKCI-0.4
END
CHEHOL CNT -KAC /5:5
KACCET KAC -KA0 /7:3

```



```

KK          KA0          /3:3
END
LCELL      FU          ; ТВЭЛ
HEXX W 0,0,0 HG a
RCZ C 0,0,0 HG rc
RCZ Z 0,0,0 HG rz
RCZ F 0,0,0 HG rf
END
WAT W -C          /7:3
CLD C -Z          /2:2
ZAR Z -F          /4:4
FUL F          /1:1
END
ENDL
LCELL      TU          ; поглотитель
HEXX W 0,0,0 HG a
RCZ S 0,0,0 HG dt/2
RCZ Z 0,0,0 HG dt/2-tw
RCZ A 0,0,0 HG da/2
END
WAT W -S          /7:3
CLD S -Z          /5:5
ZAR Z -A          /4:4
FUL A          /6:6
END
ENDL
LATT G2AR KACCET KK
LISTEL FU(GKC) TU
PARM -2:2 -2:2 0,0,0 a,0,0 -a/2 a*SIN(60),0
      1:2,-2 2,-1 -2,1 -2:-1,2 /2 0,0
FINISH
SPNT 0.2, 0.15, HG/2
FINISH
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY 0
ZFLU 0
END
FINISH
BRG 1 0
FINISH
NTOT 1000
NBAT 5
FINISH
NAMVAR ex15

```

```

MAXSER 25
NPRINT 500
DTZML 5
FINISH

```

В кольце номер регистрационной зоны воды совпадает с номером воды в элементах, то есть 7, а во внутреннем шестиграннике он оставлен равным 3. Также убрано увеличение размеров прототипов. Решетка накладывается сразу на две зоны: КАССЕ7 и КАССЕ3. Вода зоны КАССЕ3 должна была бы быть полностью вытеснена элементами решетки, однако, в приведенном ниже отрывке из результатов расчета видно, что очень малый поток в регистрационной зоне 3 присутствует.

FLUX.	Zone	ENERGY: Mean	0.00000E+00 StdDev
	1	1.16880E+01	1.51559E-01
	2	4.40327E+00	1.46504E-01
	3	6.14006E-12	2.48243E+01
	4	5.67713E-01	1.68567E-01
	5	2.86561E+00	1.87639E-01
	6	6.20782E-01	7.80268E-01
	7	1.71421E+01	1.51146E-01

Блок ввода геометрического модуля не способен распознать, какие внутренние зоны каких элементов нуждаются в усечении, поэтому он вставляет пересечение с глобальными телами и/или их дополнениями во все зоны всех элементов, что, конечно, усложняет геометрию. Можно слегка ускорить вычисления, вводя два фактически одинаковых прототипа элемента решетки, один из которых будет усекаться, а другой – нет. Далее дан вариант, демонстрирующий такую конструкцию.

```

PIN 1 0
TEMPR 300.
MATR 1
U235 0.0008255
U238 0.022105
O 0.045861
MATR 2
ZR 0.04273
NB 0.000432
HF 6.6E-6
MATR 3
H 0.066714
O 0.033357
MATR 4
AL 1.E-10
MATR 5

```

```

FE      0.0567821
CR      0.0163826
NI      0.0074519
C       4.600027E-4
MN      1.67625E-3
SI      1.63945E-3
TI      9.61271E-6
MATR 6
C       7.350E-02
B10     0.260E-02
B11     1.056E-02
END
EGRC    1.0E+19,  1.,  0.
FINISH
HEAD    5      0      500
CONT    B B T T T T T
EQU     HG = 85
EQU     EPS = 1E-4
EQU     a  = 1.27      ; шаг решетки
EQU     rc = 0.4525    ; радиус твэл
EQU     rz = 0.3875    ; радиус зазора в твэл
EQU     rf = 0.38      ; радиус топлива
EQU     dt = 0.96      ; диаметр трубки с поглотителем
EQU     tw = 0.05      ; толщина стенки трубки
EQU     da = 0.8       ; диаметр поглотителя
EQU     tt = 0.1       ; толщина бака
EQU     DKCI = a*sin(60)*4+2*rc+EPS
EQU     DKCE = DKCI+2*tt
*
HEXY CNT      0 0 -tt HG+tt*2 DKCE
HEXY KAC (GKC) 0 0 0  HG      DKCI
END
CHEHOL  CNT -KAC      /5:5
KACCET  KAC          /3:3
END
LCELL   FU                      ; твэл с усечением
HEXX W   0,0,0    HG a
RCZ  C   0,0,0    HG rc
RCZ  Z   0,0,0    HG rz
RCZ  F   0,0,0    HG rf
END
WAT    W -C          /7:3
CLD    C -Z          /2:2
ZAR    Z -F          /4:4
FUL    F             /1:1
END
ENDL
LCELL   FV                      ; твэл без усечения

```

```

HEXX W 0,0,0 HG a
RCZ C 0,0,0 HG rc
RCZ Z 0,0,0 HG rz
RCZ F 0,0,0 HG rf
END
WAT W -C /7:3
CLD C -Z /2:2
ZAR Z -F /4:4
FUL F /1:1
END
ENDL
LCELL TU ; поглотитель
HEXX W 0,0,0 HG a
RCZ S 0,0,0 HG dt/2
RCZ Z 0,0,0 HG dt/2-tw
RCZ A 0,0,0 HG da/2
END
WAT W -S /7:3
CLD S -Z /5:5
ZAR Z -A /4:4
FUL A /6:6
END
ENDL
LATT G2AR KACCET
LISTEL FU(GKC) TU FV
PARM -2:2 -2:2 0,0,0 a,0,0 -a/2 a*SIN(60),0
      1:2,-2 2,-1 -2,1 -2:-1,2 /2 0,0
      /3 -1:0,-1 /3 -1,0 /3 1,0 /3 0:1,1
FINISH
SPNT 0.2, 0.15, HG/2
FINISH
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY 0
RCT 18 101
ZRCT 0
END
FINISH
BRG 1 0
FINISH
NTOT 1000
NBAT 5
FINISH
NAMVAR ex15
MAXSER 250

```

```

NPRINT  0
DTZML   5
FINISH

```

Центральный круг твэлов состоит из элементов, не пересекаемых границей зоны КАССЕТ, и они получены из дублирующего прототипа элемента FV, для которого не указано глобальных тел усечения.

Однако такое усложнение редко дает существенное ускорение и чревато ошибками, поэтому начинающему пользователю не стоит его применять.

### Пример 2.5. Задание кассеты с помощью двумерной сети

Решетки стержней и другие подобные структуры выгоднее задавать не с помощью решетки (LATT), а с помощью сети (NET). Этот пример демонстрирует, как можно задать кассету из предыдущего примера, используя эту возможность. Сеть здесь и далее двумерная.

```

PIN 1 0
TEMPR 300.
MATR 1
U235 0.0008255
U238 0.022105
O 0.045861
MATR 2
ZR 0.04273
NB 0.000432
HF 6.6E-6
MATR 3
H 0.066714
O 0.033357
MATR 4
AL 1.E-10
MATR 5
FE 0.0567821
CR 0.0163826
NI 0.0074519
C 4.600027E-4
MN 1.67625E-3
SI 1.63945E-3
TI 9.61271E-6
MATR 6
C 7.350E-02
B10 0.260E-02
B11 1.056E-02
END
EGRC 1.0E+19, 1., 0.
FINISH

```

```

HEAD 1      0      500
CONT  В В Т Т Т Т Т Т
EQU   HG = 85
EQU   EPS = 1E-4
EQU   a  = 1.27      ; шаг решетки
EQU   rc = 0.4525    ; радиус твэл
EQU   rz = 0.3875    ; радиус зазора в твэл
EQU   rf = 0.38      ; радиус топлива
EQU   dt = 0.96      ; диаметр трубки с поглотителем
EQU   tw = 0.05      ; толщина стенки трубки
EQU   da = 0.8       ; диаметр поглотителя
EQU   tt = 0.1       ; толщина бака
EQU   DKCI = a*sin(60)*4+2*rc+EPS
EQU   DKCE = DKCI+2*tt
* ТЕЛА И ЗОНЫ ОСНОВНОЙ ГЕОМЕТРИИ
HEXY CNT 0 0 -tt HG+tt*2 DKCE
HEXY KAC 0 0 0 HG DKCI
END
CHENOL CNT -KAC /5:5
KACCET (NET1) KAC /3:3 ; зона, несущая сеть
END
* ПРОТОТИП ЯЧЕЙКИ СЕТИ С ТОПЛИВОМ
CELL F ; твэл
SHEX CC a HG
RCZ CL 0,0,0 HG rc
RCZ ZA 0,0,0 HG rz
RCZ FU 0,0,0 HG rf
END
WAF CC -CL /-1:3
CLD CL -ZA /2:2
ZAR ZA -FU /4:4
FUL FU /1:1
END
* ПРОТОТИП ЯЧЕЙКИ СЕТИ С ПОГЛОТИТЕЛЕМ
CELL T ; поглотитель
SHEX CC a HG
RCZ ST 0,0,0 HG dt/2
RCZ ZA 0,0,0 HG dt/2-tw
RCZ AB 0,0,0 HG da/2
END
WAF CC -ST /7:3
CLD ST -ZA /5:5
ZAR ZA -AB /4:4
FUL AB /6:6
END
* СЕТЬ
NET NET1 -2*a*0.5, -2*a*sin(60), 0 5,5
* КАРТОГРАММА ТИПОВ ЯЧЕЕК

```

```

T05      0 0 F F F
T04      0 F F F F
T03      F F T F F
T02      F F F F 0
T01      F F F 0 0
* КАРТОГРАММА НОМЕРОВ РЕГИСТРАЦИОННЫХ ЗОН N 1
P0105    0   0 10 11 10
P0104      0 12 13 12 13
P0103      10 11   0 10 11
P0102      12 13 12 13   0
P0101      10 11 10   0   0
END
FINISH
SPNT      0.2, 0.15, HG/2
FINISH
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY      0
RCT      18   101
ZRCT      0
END
FINISH
BRG 1 0
FINISH
NTOT      1000
NBAT      5
FINISH
NAMVAR      ex15
MAXSER      250
NPRINT      0
DTZML      5
FINISH

```

Конструкция сеть подразумевает покрытие всей зоны, несущей сеть, одинаковыми по форме ячейками, в данном случае это шестигранные призмы с размером под ключ  $a = 1,27$  см (шаг решетки стержней). В приведенных входных данных вода в ячейках получает разные номера регистрационных зон так, чтобы в соседних ячейках они были бы различными, и на разрезе, представленном на рис. 2.9, ячейки были бы выделены.

Рис. 2.9 полностью совпадает с рис. 2.8, за исключением того, что в каждой ячейке проставлена соответствующая пара индексов.

Так же видны уголки, не покрытые явно заданными ячейками — ячейками со стержнями. Однако есть принципиальная разница: в случае сетей зона полностью покрыта ячейками, и, если явно заданных ячеек для

этого недостаточно, то сеть дополняется стандартными для нее гомогенными ячейками, прототип которых автоматически генерируется. В такой ячейке атрибуты единственной зоны, то есть ее регистрационная зона, регистрационный объект и материал совпадают с заданными для зоны, несущей сеть. Уголочки на рисунке – это кусочки таких стандартных ячеек. Совпадение атрибутов легко проверить с помощью MCU Office.

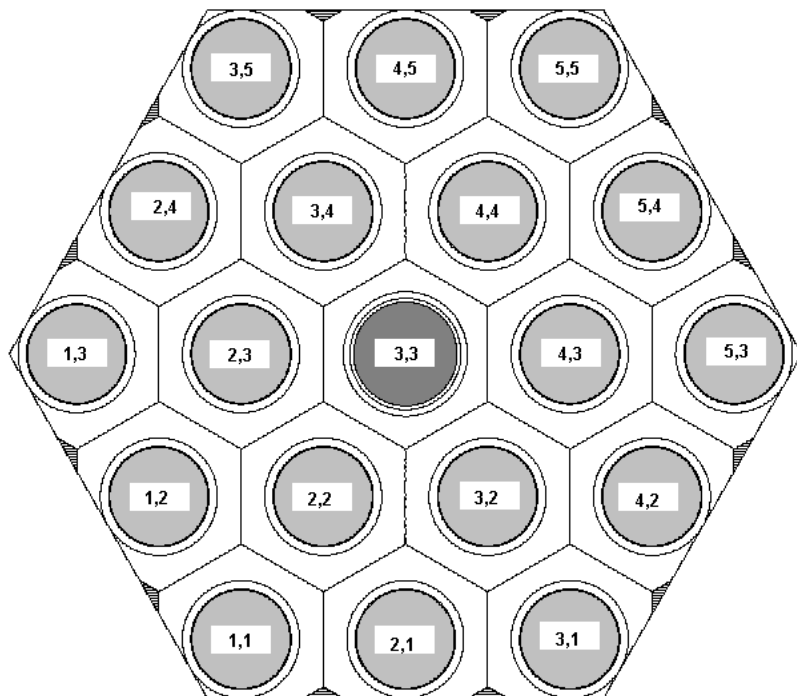


Рис. 2.9. Кассета, заданная с помощью сети  
 $\{(-3.6, 3.1, 10) (3.6, -3, 10) (0, 1, 0)\}$

В отличие от решеток то, что геометрическая зона несет сеть, отмечается прямо в ее описании (имя сети в скобках). Это связано с тем, что геометрическая зона не может нести больше одной сети, в то время как несколько решеток на нее наложить можно.

Существенно, что усечение ячеек, выходящих за границу несущей зоны, делается автоматически.

Поскольку подразумевается полное заполнение геометрической зоны ячейками сети, включая стандартные, никаких «щелей» возникнуть не может. В описании первых тел прототипов ячеек указан просто шаг ре-



шетки 1,27 без всякого увеличения. Более того, такое увеличение вредно, так как векторы сдвигов автоматически извлекаются из параметров первого тела прототипа ячейки – ее контейнера. Во всех прототипах, используемых в одной сети контейнеры должны быть одинаковыми, как и сделано для прототипов F и T.

В данном примере в качестве контейнера использовано тело SHEX – шестигранная призма с центром нижнего основания в начале *локальной системы координат*, и ориентированная по оси *OZ*. В примере не задан угол поворота (третий параметр тела SHEX), поэтому оно ориентировано стандартно: одна пара граней перпендикулярна оси *OX*, первый порожденный телом вектор сдвига направлен по оси *OX*, второй получен из первого поворотом на угол 120 градусов вокруг оси *OZ*. При задании поворота  $\phi$  призма вместе с векторами сдвига поворачивается на угол  $\phi$  градусов вокруг оси *OZ*.

Для сети индексы явно заданных ячеек есть последовательные натуральные числа, начиная с 1. Поэтому положение или корень сети (первые три числа в предложении NET) должны относиться к ячейке с индексами (1,1), которая лежит совсем не в середине сети. Положение центров явно заданных ячеек образует параллелограмм на плоскости, содержащей корень сети и параллельной векторам сдвига. Положение корня сети соответствует «левому нижнему углу этого» параллелограмма. В примере размерность сети 5x5, начало основной системы координат соответствует центральной ячейке с индексами (3,3), так что корень должен лежать в

$$(-2 \cdot \langle \text{первый вектор сдвига} \rangle, -2 \cdot \langle \text{второй вектор сдвига} \rangle).$$

Это и указано в предложении NET.

Как видно из рис. 2.9, не все варианты индексов из набора

$$\{i, j \mid 1 \leq i \leq 5, 1 \leq j \leq 5\}$$

соответствуют нужным ячейкам со стержнями. Часть пар индексов должна быть исключена, точнее, в эти позиции должны быть помещены стандартные для сети гомогенные ячейки.

В сети могут использоваться ячейки с разными прототипами, в данном примере F и T. Для определения местоположения используется картограмма типов ячеек. Это прямоугольник имен прототипов с размерностью сети, в данном примере это 5x5. Существует несколько способов задавать эти прямоугольники, в данном примере, как и во всех последующих, используется простейший способ, который и рекомендуется начинающему пользователю.

Для каждой строки, то есть для диапазона индексов  $(i, j)$  с фиксированным вторым индексом  $j$  и первым индексом  $i$ , пробегающим все возможные значения, задается предложение, имя которого есть T<значение

второго индекса>. Далее в нем последовательно перечисляются имена прототипов ячеек для соответствующих позиций. Если позиция не нужна, в данном примере это позиции (4,1), (4,1), (5,2), (1,4), (1,5), (2,5), на эти места ставится символ ноль.

Порядок строк картограммы типов, как и всех других картограмм, не существен, но реально используется либо порядок по возрастанию второго индекса, либо, как в приведенном примере, – по убыванию. Второй порядок часто бывает удобнее, так как второй вектор сдвига обычно бывает повернут относительно первого на угол, меньше 180 градусов, поэтому порядок по убыванию лучше поясняет расположение ячеек. Для этого же можно использовать пробелы в строках картограммы. Сравните рис. 2.9 и картограмму типов в примере.

Для возможности иметь атрибуты геометрических зон, зависящие от положения ячейки, используются условные указатели. В прототипе F в качестве номера регистрационной зоны используется условный номер со значением 1 (предложение WAF). Для определения регистрационных зон необходимо иметь картограмму регистрационных номеров. Три первые символа имен предложений этой картограммы имеют вид P01. Если бы это была картограмма для условного номера регистрационных зон со значением 2, то символы были бы P02; а для условного номера регистрационных объектов со значением 1 символы были бы O01. Следующие два символа – номер строки, аналогичны второму и третьему символам в картограмме типов. В примере строки так же заданы в порядке убывания второго индекса.

В каждой строке стоят целые числа, на которые заменяется условный номер в данной позиции. Стоит визуализировать данный пример в цветном режиме.

Для позиций, в которых прототип, определенный картограммой типов, не содержит такого указателя, может стоять что угодно, но для наглядности лучше там ставить ноль. В примере это относится к верхнему левому и нижнему правому углам параллелограмма, где стоят стандартные гомогенные ячейки, а также к центральной позиции (3,3), где стоит поглотитель, не содержащий не каких условных номеров.

В ряде случаев оказывается не удобным использовать стандартную гомогенную ячейку. В этом случае можно расширить сеть, добавив лишние явно заданные ячейки, но при этом придется самому задать для них гомогенный прототип. В следующем варианте задания, сеть сделана размерности 7x7, старая сеть окружена ячейками с прототипом E (приведены данные только для геометрического модуля, так как лишь они изменены). Отметим, что корень пришлось переместить, так как он должен быть в нижнем левом углу расширенной сети. Условных указателей в этом примере нет, так что нужна лишь картограмма типов ячеек.

```

HEAD 1      0      500
CONT  B B T T T T T
EQU   HG = 85
EQU   EPS = 1E-4
EQU   a  = 1.27      ; шаг решетки
EQU   rc = 0.4525    ; радиус ТВЭЛа
EQU   rz = 0.3875    ; радиус зазора в ТВЭЛе
EQU   rf = 0.38      ; радиус топлива
EQU   dt = 0.96      ; диаметр трубки с поглотителем
EQU   tw = 0.05      ; толщина стенки трубки
EQU   da = 0.8       ; диаметр поглотителя
EQU   tt = 0.1       ; толщина бака
EQU   DKCI = a*sin(60)*4+2*rc+EPS
EQU   DKCE = DKCI+2*tt
* ----- ТЕЛА И ЗОНЫ ОСНОВНОЙ ГЕОМЕТРИИ
HEXY CNT 0 0 -tt HG+tt*2 DKCE
HEXY KAC 0 0 0   HG      DKCI
END
CHENOL          CNT -KAC    /5:5
KACCET (NET1) KAC          /3:3
END
CELL           F              ; ТВЭЛ
SHEX CC   a HG
RCZ  CL   0,0,0   HG rc
RCZ  ZA   0,0,0   HG rz
RCZ  FU   0,0,0   HG rf
END
WAF   CC -CL      /6:3
CLD   CL -ZA      /2:2
ZAR   ZA -FU      /4:4
FUL   FU          /1:1
END
CELL           T              ; поглотитель
SHEX CC   a HG
RCZ  ST   0,0,0   HG dt/2
RCZ  ZA   0,0,0   HG dt/2-tw
RCZ  AB   0,0,0   HG da/2
END
WAF   CC -ST      /6:3
CLD   ST -ZA      /5:5
ZAR   ZA -AB      /4:4
FUL   AB          /6:6
END
*
CELL           E              ;
SHEX CC   a HG
END
WAF   CC          /9:3

```

```

END
*
NET      NET1  -3*a*0.5,  -3*a*sin(60),  0      7,7
T07 0 0 0 E E E E
T06 0 0 E F F F E
T05 0 E F F F F E
T04 E F F T F F E
T03 E F F F F E 0
T02 E F F F E 0 0
T01 E E E E 0 0 0
*
END
FINISH

```

### Пример 2.6. Задание кассеты с помощью сети, когда стержни не помещаются в ячейки

В случае сети из одинаковых цилиндрических стержней легко понять, что диаметр стержня должен быть меньше или равен шагу решетки, и каждый стержень помещается в свою призму. Если же у стержней разные диаметры, то возможен случай и превышения диаметром стержня размера ячейки. Достаточно, чтобы диаметр стержня плюс диаметр стержня из любой соседней ячейки были бы меньше удвоенного шага решетки.

Можно модифицировать предыдущий пример, задав диаметр трубочки поглотителя равным 1,45 см. Это геометрически допустимо. Поглотитель окружен топливными стержнями, сумма диаметров есть

$$1,45+0,4525=1,9025,$$

что меньше удвоенного шага решетки 2,54 с большим запасом. Попробуйте заменить в первом варианте данных нашего примера 2.5 размер трубочки с 0,96 на 1,45. Результат визуализации модели после такой замены приведен на рис. 2.10. Геометрический модуль не знает, чему отдать предпочтение – трубочке или соседней ячейке.

В этом случае такой большой стержень следует задать вне сети, включив его в основную геометрию или с помощью решетки.

В первом варианте большой стержень (стержни) прямо описывается в основной геометрии, а зона, несущая сеть соответственно усекается. Следующий вариант исходных данных это демонстрирует.

```

TEMPR 300.
MATR 1
U235 0.0008255
U238 0.022105
O 0.045861
MATR 2
ZR 0.04273

```

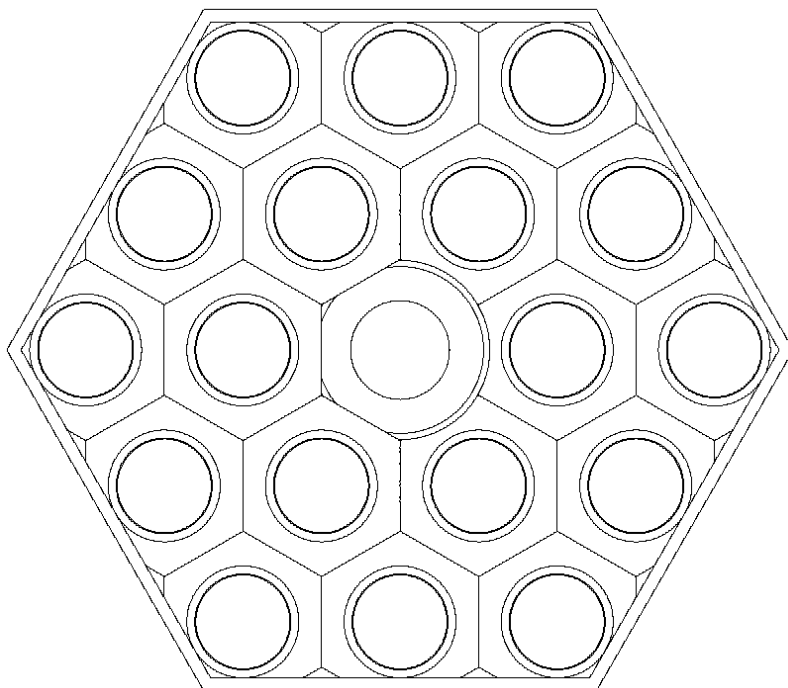


Рис. 2.10. Стержень выходит за границы ячейки  
 $\{(-3.6, 3.1, 10) (3.6, -3, 10) (0, 1, 0)\}$

```

NB 0.000432
HF 6.6E-6
MATR 3
H 0.066714
O 0.033357
MATR 4
AL 1.E-10
MATR 5
FE 0.0567821
CR 0.0163826
NI 0.0074519
C 4.600027E-4
MN 1.67625E-3
SI 1.63945E-3
TI 9.61271E-6
MATR 6
C 7.350E-02
B10 0.260E-02

```

```

B11 1.056E-02
END
EGRC 1.0E+19, 1., 0.
FINISH
HEAD 1 0 500
CONT B B T T T T T T
EQU HG = 85
EQU EPS = 1E-4
EQU a = 1.27 ; шаг решетки
EQU rc = 0.4525 ; радиус ТВЭЛа
EQU rz = 0.3875 ; радиус зазора в ТВЭЛе
EQU rf = 0.38 ; радиус топлива
EQU dt = 1.45 ; диаметр трубки с поглотителем
EQU tw = 0.05 ; толщина стенки трубки
EQU da = 0.8 ; диаметр поглотителя
EQU tt = 0.1 ; толщина бака
EQU DKCI = a*sin(60)*4+2*rc+EPS
EQU DKCE = DKCI+2*tt
* ----- ТЕЛА И ЗОНЫ ОСНОВНОЙ ГЕОМЕТРИИ
HEXY CNT 0 0 -tt HG+tt*2 DKCE
HEXY KAC 0 0 0 HG DKCI
*. ТЕЛА ЯЧЕЙКИ С ПОГЛОТИТЕЛЕМ
RCZ ST 0,0,0 HG dt/2
RCZ ZA 0,0,0 HG dt/2-tw
RCZ AB 0,0,0 HG da/2
END
CHENOL CNT -KAC /5:5
КАССЕТ (NET1) KAC -ST /7:3 ; зона, несущая сеть
*. ЗОНЫ ЯЧЕЙКИ С ПОГЛОТИТЕЛЕМ
CLD ST -ZA /5:5
ZAR ZA -AB /4:4
FUL AB /6:6
END
*. ПРОТОТИП ЯЧЕЙКИ СЕТИ С ТОПЛИВОМ
CELL F ; ТВЭЛ
SHEX CC a HG
RCZ CL 0,0,0 HG rc
RCZ ZA 0,0,0 HG rz
RCZ FU 0,0,0 HG rf
END
WAF CC -CL /-1:3
CLD CL -ZA /2:2
ZAR ZA -FU /4:4
FUL FU /1:1
END
*. СЕТЬ
NET NET1 -2*a*0.5, -2*a*sin(60), 0 5,5
*. КАРТОГРАММА ТИПОВ ЯЧЕЕК

```

```

T05      0 0 F F F
T04      0 F F F F
T03      F F 0 F F
T02      F F F F 0
T01      F F F 0 0
*.        КАРТОГРАММ НОМЕРОВ РЕГИСТРАЦИОННЫХ ЗОН № 1
P0105    0   0 10 11 10
P0104      0 12 13 12 13
P0103      10 11   0 10 11
P0102      12 13 12 13   0
P0101      10 11 10   0   0
END
FINISH
SPNT      0.2, 0.15, HG/2
FINISH
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY      0
RCT      18   101
ZRCT      0
END
FINISH
BRG 1 0
FINISH
NTOT      1000
NBAT      5
FINISH
NAMVAR     ex15
MAXSER      250
NPRINT      0
DTZML      5
FINISH

```

Кроме введения в основную геометрию тел и зон для поглотителя в зоне КАССЕТ из полости вычтен внешний цилиндр поглотителя. Тем самым, сеть уже не может налагаться на этот цилиндр. Поэтому нет неопределенности в отнесении точек (не считая граничных) к определенной зоне. В картограмме типов в центральной позиции (3,3) стоит 0, так как поглотитель определен вне сети, надо лишь заполнить водой то, что остается для этой призмы. Получается верный рис. 2.11.

Еще проще сделать это с помощью решетки, заготовив для большого стержня соответствующий прототип элемента решетки. Это демонстрирует следующий вариант входных данных (приводится только описание геометрии).

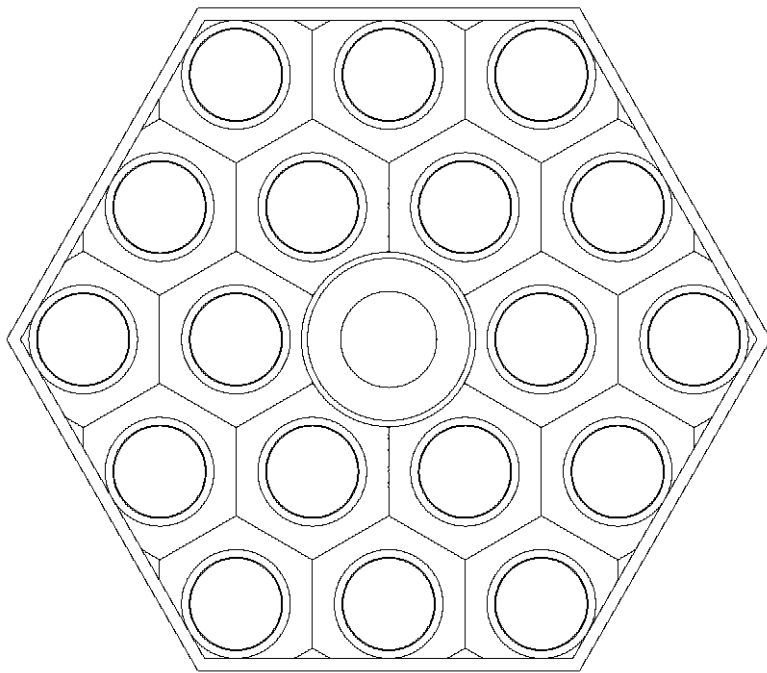


Рис. 2.11. Правильно заданный большой стержень  
 $\{(-3.6, 3.1, 10) (3.6, -3, 10) (0, 1, 0)\}$

```

HEAD 1      0      500
CONT В В Т Т Т Т Т Т
EQU   HG = 85
EQU   EPS = 1E-4
EQU   a  = 1.27      ; шаг решетки
EQU   rc = 0.4525    ; радиус ТВЭЛа
EQU   rz = 0.3875    ; радиус зазора в ТВЭЛе
EQU   rf = 0.38      ; радиус топлива
EQU   dt = 1.45      ; диаметр трубки с поглотителем
EQU   tw = 0.05      ; толщина стенки трубки
EQU   da = 0.8       ; диаметр поглотителя
EQU   tt = 0.1       ; толщина бака
EQU   DKCI = a*sin(60)*4+2*rc+EPS
EQU   DKCE = DKCI+2*tt
* ----- ТЕЛА И ЗОНЫ ОСНОВНОЙ ГЕОМЕТРИИ
HEXY CNT 0 0 -tt HG+tt*2 DKCE
HEXY KAC 0 0 0 HG DKCI
END
CHENOL CNT -KAC /5:5

```



```

КАССЕТ (NET1) КАС          /3:3          ; зона, несущая сеть
END
*. ПРОТОТИП ЯЧЕЙКИ СЕТИ С ТОПЛИВОМ
CELL      F                  ; ТВЭЛ
SHEX CC   a HG
RCZ  CL   0,0,0      HG rc
RCZ  ZA   0,0,0      HG rz
RCZ  FU   0,0,0      HG rf
END
WAF  CC -CL          /-1:3
CLD  CL -ZA          /2:2
ZAR  ZA -FU          /4:4
FUL  FU              /1:1
END
*. ПРОТОТИП ЭЛЕМЕНТА РЕШЕТКИ С ПОГЛОТИТЕЛЕМ
LCELL     TU              ; поглотитель
RCZ  ST   0,0,0      HG dt/2
RCZ  ZA   0,0,0      HG dt/2-tw
RCZ  AB   0,0,0      HG da/2
END
CLD  ST -ZA          /5:5
ZAR  ZA -AB          /4:4
FUL  AB              /6:6
END
ENDL
*.          СЕТЬ
NET      NET1  -2*a*0.5,  -2*a*sin(60),  0          5,5
*.          КАРТОГРАММА ТИПОВ ЯЧЕЕК
T05      0 0 F F F
T04      0 F F F F
T03      F F 0 F F
T02      F F F F 0
T01      F F F 0 0
*.          КАРТОГРАММА НОМЕРОВ РЕГИСТРАЦИОННЫХ ЗОН № 1
P0105    0   0 10 11 10
P0104     0 12 13 12 13
P0103     10 11   0 10 11
P0102      12 13 12 13   0
P0101      10 11 10   0   0
END
LATT  GLTL  КАССЕТ
LISTEL TU
PARM   0,0,0
FINISH

```

В прототипе элемента решетки первым телом служит внешний цилиндр поглотителя, также в центральной позиции картограммы типов стоит ноль. Можно убедиться с помощью MCU Office, что получится раз-

рез, аналогичный рис. 2.11. Если бы больших стержней было больше, достаточно было бы просто указать все их положения в параметрах решетки (предложение PARM) где сейчас указано только одно положение – начало координат. Эффект «вытеснения решеткой сети» (выражение не совсем правильное, но наглядное) объясняется тем, что геометрический модуль при вводе сначала налагает на зону решетку, вычитая из нее первые тела всех элементов решетки, и, только потом, в оставшуюся после такого усеечения область вкладывает сеть.

### Пример 2.7. Использование симметрий

Рассматривается выдуманная система, состоящая из кассеты в виде прямоугольного параллелепипеда. Кассета имеет полость с водой, внутри нее помещена решетка из двух типов стержней: твэлов и поглотителей, геометрические параметры которых совпадают с параметрами стержней из примеров 2.4 и 2.5. Состав топлива и материала поглотителя в этом примере изменен, в топливе больше половины урана составляет  $^{235}\text{U}$ , а в поглотителе увеличена доля  $^{10}\text{B}$ . Эти составы не имеют никакого отношения к реальным установкам и взяты для примера.

Решетка квадратная с таким шагом, что площадь горизонтального разреза одной ячейки совпадает с площадью разрезов шестиугольных ячеек предыдущих двух примеров. Размер решетки 17x17.

Размер полости есть 19,8168x19,8168x200. Горизонтальный размер выбран так, чтобы поместилась решетка с маленьким зазором. Толщина кожуха составляет 0,2 см. Сбоку со всех сторон от кассеты имеется отражатель из воды, толщиной 60 см. Сверху и снизу заданы условия трансляционной симметрии, так что система бесконечна по вертикали, но не полностью однородна по вертикали – имеются горизонтальные пластины кожуха.

Ниже приведены исходные данные для геометрии данной системы.

```
HEAD 1      0      500
CONT  T T В В В В
EQU   HG = 200
EQU   EPS = 1E-3
EQU   a  = 1.27      ; шаг решетки
EQU   b  = a*sqrt(sqrt(3)/2.0)
EQU   rc = 0.4525    ; радиус ТВЭЛа
EQU   rz = 0.3875    ; радиус зазора в ТВЭЛе
EQU   rf = 0.38      ; радиус топлива
EQU   dt = 0.96      ; диаметр трубки с поглотителем
EQU   tw = 0.05      ; толщина стенки трубки
EQU   da = 0.8       ; диаметр поглотителя
EQU   tt = 0.02      ; толщина бака
EQU   XYI = 8*b+rc+EPS
```

```

EQU   XYE = XYI+2*tt
EQU   WW = 60           ; толщина отражателя
*
RPP   CNT -XYE-WW,XYE+WW   -XYE-WW,XYE+WW -tt,HG+tt*2
RPP   WAL -XYE,XYE        -XYE,XYE   -tt,HG+tt*2
RPP   KAC -XYI,XYI        -XYI,XYI    0,HG
END
REFL          CNT -WAL      /3:3
CHEHOL        WAL -KAC      /5:5
KACCET (NET1) KAC          /3:3
END
C=C SHOW
CELL      F                ; ТВЭЛ
RPP   CC -b/2,b/2   -b/2,b/2   0,HG
RCZ   CL  0,0,0     HG rc
RCZ   ZA  0,0,0     HG rz
RCZ   FU  0,0,0     HG rf
END
WAF    CC -CL        /7:3
CLD    CL -ZA        /2:2
ZAR    ZA -FU        /4:4
FUL    FU           /1:1
END
CELL    T                ; поглотитель
RPP   CC -b/2,b/2   -b/2,b/2   0,HG
RCZ   ST  0,0,0     HG dt/2
RCZ   ZA  0,0,0     HG dt/2-tw
RCZ   AB  0,0,0     HG da/2
END
WAF    CC -ST        /7:3
CLD    ST -ZA        /5:5
ZAR    ZA -AB        /4:4
FUL    AB           /6:6
END
*
NET      NET1  -8*b,   -8*b,   0           17,17
*
T17     F F F F F F F F F F F F F F F F
T16     F F F F F F F F F F F F F F F F
T15     F F F F F F F T F T F F F F F F
T14     F F F F F F F F F F F F F F F F
T13     F F F F F F F T F T F F F F F F
T12     F F F F F F F F F F F F F F F F
T11     F F F F F F F T F T F F F F F F
T10     F F F F F F F F F F F F F F F F
T09     F F F F F F F F T F F F F F F F
T08     F F F F F F F F F F F F F F F F
T07     F F F F F F F T F T F F F F F F

```

```

T06  F F F F F F F F F F F F F F F F
T05  F F F F F F F T F T F F F F F F
T04  F F F F F F F F F F F F F F F F
T03  F F F F F F F T F T F F F F F F
T02  F F F F F F F F F F F F F F F F
T01  F F F F F F F F F F F F F F F F
END
FINISH

```

Размеры ячейки определены, исходя их упомянутого равенства площадей. Горизонтальные размеры полости определены так, чтобы уместить решетку. Значения этих величин можно увидеть при запуске MCU Office в файле LIST.P.

```

= = = = = = = TABLE OF GLOBAL CONSTANTS = = = = = = = =
                        SCALARS
HG  200.0000 EPS  0.0010  a  1.2700 b   1.1819
rc  0.4525  rz  0.3875  rf  0.3800 dt  0.9600
tw  0.0500  da  0.8000  tt  0.0200 XYI 9.9084
XYE 9.9484  WW  60.0000
= = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = = =

```

Разрез всей системы по горизонтали дан на рис. 2.12.

Горизонтальный разрез собственно кассеты, дан на рис. 2.13. Поглотители помечены перекрещивающейся штриховкой, твэлы – редкой косой штриховкой.

Видно, что система имеет симметрию в виде поворота на угол в 90 градусов. Этим можно воспользоваться, описав геометрию только в первом квадранте и задав условие поворотной симметрии на его границах. Ниже приведен соответствующий вариант исходных данных, не только геометрии, а так, чтобы можно было пускать на счет.

```

PIN 1 0
MATR 1  DENSAA=0.0687915
*  U235 12.0000
*  U238 21.3333
U235 20.0000
U238 13.3333
O 66.6667
MATR 2
ZR 0.04273
NB 0.000432
HF 6.6E-6
MATR 3
H 0.066714
O 0.033357
MATR 4
AL 1.E-10

```

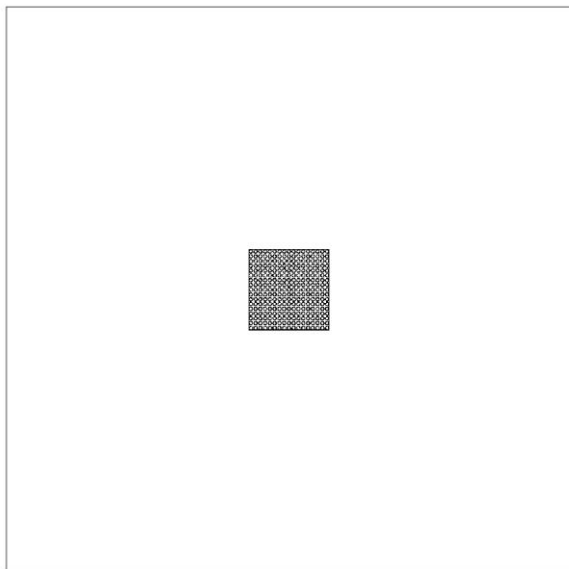


Рис. 2.12. Горизонтальный разрез кассеты с отражателем  
 $\{(-73, 72.4, 10) (73, -72.3, 10) (0, 1, 0)\}$

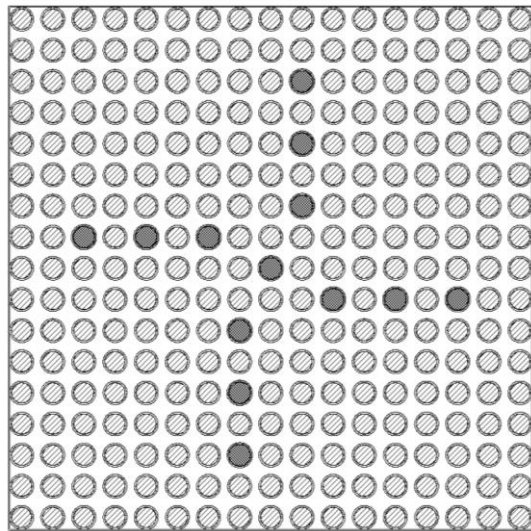


Рис. 2.13. Горизонтальный разрез кассеты  
 $\{(-11, 10.2, 10) (11, -10.1, 10) (0, 1, 0)\}$

```

MATR 5
FE 0.0567821
CR 0.0163826
NI 0.0074519
C 4.600027E-4
MN 1.67625E-3
SI 1.63945E-3
TI 9.61271E-6
MATR 6 DENSAA=0.8666
C 84.814
* B10 3.0
* B11 12.186
B10 7.0
B11 8.186
END
EGRC 1.0E+19, 1., 0.
FINISH
HEAD 1 0 500
CONT T T B B B B
EQU HG = 200
EQU EPS = 1E-3
EQU a = 1.27 ; шаг решетки
EQU b = a*sqrt(sqrt(3)/2.0)
EQU rc = 0.4525 ; радиус ТВЭЛа
EQU rz = 0.3875 ; радиус зазора в ТВЭЛе
EQU rf = 0.38 ; радиус топлива
EQU dt = 0.96 ; диаметр трубки с поглотителем
EQU tw = 0.05 ; толщина стенки трубки
EQU da = 0.8 ; диаметр поглотителя
EQU tt = 0.02 ; толщина бака
EQU XYI = 8*b+rc+EPS
EQU XYE = XYI+2*tt
EQU WW = 60 ; толщина отражателя
*
RPP CNT -XYE-WW,XYE+WW -XYE-WW,XYE+WW -tt,HG+tt*2
RPP WAL -XYE,XYE -XYE,XYE -tt,HG+tt*2
RPP KAC -XYI,XYI -XYI,XYI 0,HG
PLX YZ 0 ; полупространство {x > 0} граница OYZ
PLY ZX 0 ; полупространство {y > 0} граница OXZ
END
REFL CNT -WAL YZ ZX /3:3
CHEHOL WAL -KAC YZ ZX /5:5
KACCET (NET1) KAC YZ ZX /3:3
XMIN CNT -YZ /R270 ; зона поворота на -90
YMIN CNT YZ -ZX /R90 ; зона поворота на +90
END
C=C SHOW
CELL F ; ТВЭЛ

```

```

RPP  CC  -b/2,b/2  -b/2,b/2  0,HG
RCZ  CL  0,0,0  HG rc
RCZ  ZA  0,0,0  HG rz
RCZ  FU  0,0,0  HG rf
END
WAF  CC  -CL  /7:3
CLD  CL  -ZA  /2:2
ZAR  ZA  -FU  /4:4
FUL  FU  /1:1
END
CELL  T ; поглотитель
RPP  CC  -b/2,b/2  -b/2,b/2  0,HG
RCZ  ST  0,0,0  HG dt/2
RCZ  ZA  0,0,0  HG dt/2-tw
RCZ  AB  0,0,0  HG da/2
END
WAF  CC  -ST  /7:3
CLD  ST  -ZA  /5:5
ZAR  ZA  -AB  /4:4
FUL  AB  /6:6
END
*
NET  NET1  0, 0, 0  9,9
*
T09  F F F F F F F F F
T08  F F F F F F F F F
T07  F T F F F F F F F
T06  F F F F F F F F F
T05  F T F F F F F F F
T04  F F F F F F F F F
T03  F T F F F F F F F
T02  F F F F F F F F F
T01  T F F F F F F F F
END
FINISH
NPS  1
PROB  1.
ANGLEN SPEC NO
MDIS  S
EDIS  S
TYPE  N
RPP  0.,XYI*0.75  0.,XYI*0.75  20,180
REPER  1 1 0
SNAM  SPEC
NOBJ  0
FINISH source
RGS 1 0
KEFF

```

```

BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY      0
RCT      18      101
ZRCT      0
END
FINISH
BRG 1 0
FINISH
NTOT      1000
NBAT      5
FINISH
NAMVAR      ex18
MAXSER      2500
NPRINT      0
DTZML      10
FINISH

```

Фактически система ограничена двугранным углом

$$\{(x,y,z) \mid x \geq 0, y \geq 0\}.$$

В программе MCU-FREE поворотная симметрия может быть задана только с помощью специальных зон, вхождение частицы в которые вызывает обработку граничного условия. В данном варианте для их задания служат два тела.

Первое (PLX YZ 0) это полупространство  $\{(x,y,z) \mid x \geq 0\}$ , границей которого служит плоскость  $OYZ$ . При достижении частицей этой области, ее надо повернуть на 90 градусов *по часовой стрелке* или на 270 градусов против часовой стрелки.

Второе (PLY ZX 0) это полупространство  $\{(x,y,z) \mid y \geq 0\}$ , границей которого служит плоскость  $OXZ$ . При достижении частицей этой области, ее надо повернуть на 90 градусов *против часовой стрелки*.

Чтобы сократить области моделирования частицы в описаниях отражателя (зона REFL), кожуха (зона СНЕНОЛ) и полости (зона КАССЕТ) добавлены имена YZ и ZX, т.е. пересечение с упомянутым двугранным углом симметрии.

Кроме того в исходные данные добавлены 2 зоны.

```

XMIN      CNT -YZ      /R270

```

это пересечение внутренности контейнера CNT с «левым полупространством». Попасть туда из области моделирования можно только через плоскость  $OYZ$ . Зона помечена условием, что частица, попавшая в нее, будет повернута на 270 градусов.



это пересечение внутренности контейнера CNT с «нижним правым двугранным углом». Попасть туда из области моделирования можно только через плоскость  $OXZ$ . Зона помечена условием, что частица, попавшая в нее, будет повернута на 90 градусов.

Горизонтальный разрез системы, соответствующий этому варианту представлен на рис. 2.14, топливо и материал поглотителя помечены штриховкой так же, как на рис. 2.13.

Шестнадцать твэлов и центральный поглотитель оказываются перерезанными плоскостями, образующими угол симметрии. Никаких дополнительных указаний во входных данных делать не требуется. Все эти области относятся к сети и автоматически ограничены несущей сетью, то есть зоной КАССЕТ, в которую уже добавлено ограничение углом симметрии.

Другая ситуация возникла бы, если система стержней была задана с помощью решетки. Элементы решетки образованы зонами, занимающими при вычислениях тот же уровень, что зоны основной геометрии и автоматически усекаются лишь телом-контейнером. Усечение элементов решетки необходимо провести явно, как во втором варианте примера 2.4.

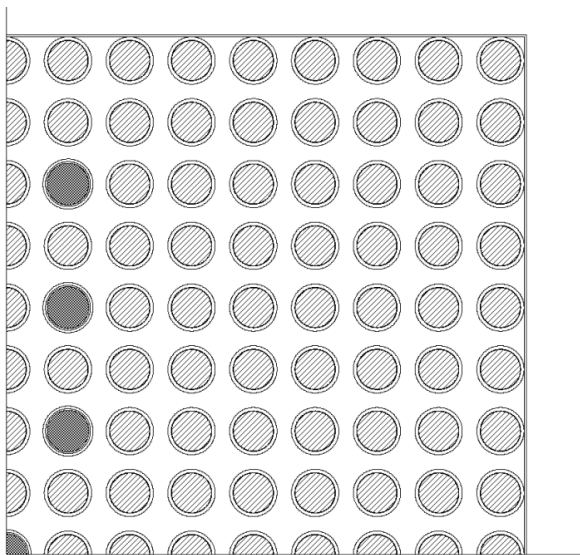


Рис. 2.14. Горизонтальный разрез кассеты  
 $\{(-0.5, 10.2, 10) (11, -0.4, 10) (0, 1, 0)\}$

Ниже приводится вариант правильного задания геометрии примера с помощью решетki.

```

HEAD 1      0      500
CONT  T T B B B B
EQU   HG = 200
EQU   EPS = 1E-3
EQU   a  = 1.27      ; шаг решетки
EQU   b  = a*sqrt(sqrt(3)/2.0)
EQU   rc = 0.4525    ; радиус твэл
EQU   rz = 0.3875    ; радиус зазора в твэл
EQU   rf = 0.38      ; радиус топлива
EQU   dt = 0.96      ; диаметр трубки с поглотителем
EQU   tw = 0.05      ; толщина стенки трубки
EQU   da = 0.8       ; диаметр поглотителя
EQU   tt = 0.02      ; толщина бака
EQU   XYI = 8*b+rc+EPS
EQU   XYE = XYI+2*tt
EQU   WW = 60        ; толщина отражателя
*
RPP  CNT  -XYE-WW,XYE+WW  -XYE-WW,XYE+WW  -tt,HG+tt*2
RPP  WAL  -XYE,XYE      -XYE,XYE  -tt,HG+tt*2
RPP  KAC  -XYI,XYI      -XYI,XYI   0,HG
PLX  YZ(GY)  0          ; полупространство {x > 0} граница OYZ
PLY  ZX(GX)  0          ; полупространство {y > 0} граница OXZ
END
REFL          CNT -WAL  YZ ZX  /3:3
CHEHOL        WAL -KAC  YZ ZX  /5:5
KACCET (NET1) KAC  YZ ZX  /3:3
XMIN  CNT -YZ          /R270    ; зона поворота на -90
YMIN  CNT  YZ -ZX      /R90     ; зона поворота на +90
END
C=C SHOW
LCELL  F              ; твэл
RPP  CC  -b/2,b/2      -b/2,b/2   0,HG
RCZ  CL  0,0,0         HG rc
RCZ  ZA  0,0,0         HG rz
RCZ  FU  0,0,0         HG rf
END
WAF  CC  -CL          /7:3
CLD  CL  -ZA          /2:2
ZAR  ZA  -FU          /4:4
FUL  FU              /1:1
END
ENDL
LCELL  T              ; поглотитель
RPP  CC  -b/2,b/2      -b/2,b/2   0,HG
RCZ  ST  0,0,0        HG dt/2

```

```

RCZ  ZA  0,0,0    HG dt/2-tw
RCZ  AB  0,0,0    HG da/2
END
WAF   CC  -ST      /7:3
CLD   ST  -ZA      /5:5
ZAR   ZA  -AB      /4:4
FUL   AB                /6:6
END
ENDL
*
LATT  G2AR  KACCET
LISTEL F(GY GX) T(GY GX)
PARM   0:8  0:8  0,0,0    b,0,0    0,b,0
        /2  0,0  /2  1,2  /2  1,4  /2  1,6
FINISH

```

В предложении LISTEL для каждого прототипа элемента решетки указано два глобальных имени, так как усечение производится как одним из них, так и другим.

К сожалению, MCU Office при генерации изображения сразу отсекает все, что находится вне тела контейнера системы, и все, что лежит внутри специальных зон. Поэтому, если забыть указать глобальные имена в предложении LISTEL рис. все равно будет правильным и ошибка проявится лишь на счете, поэтому задание поворотной симметрии требует внимания.

Если посмотреть на рис. 2.14, то сразу не очевидно, что требуется поворотная симметрия – угол в 90 градусов может соответствовать и зеркальной симметрии относительно плоскостей *OXZ* и *OYZ*. Однако, эти симметрии совершенно не эквивалентны. Если задать подобную зеркальную симметрию, то она будет соответствовать системе без симметрий, представленной на рис. 2.15.

Сравнение с рис. 2.13 показывает, что это другая система, хотя шаг решетки, количество стержней каждого типа в этих системах совпадает. Эти системы дают разные результаты моделирования, что можно проверить с помощью следующих исходных данных.

```

PIN 1 0
MATR 1  DENSAA=0.0687915
*  U235 12.0000
*  U238 21.3333
U235 20.0000
U238 13.3333
O 66.6667
MATR 2
ZR 0.04273
NB 0.000432
HF 6.6E-6

```

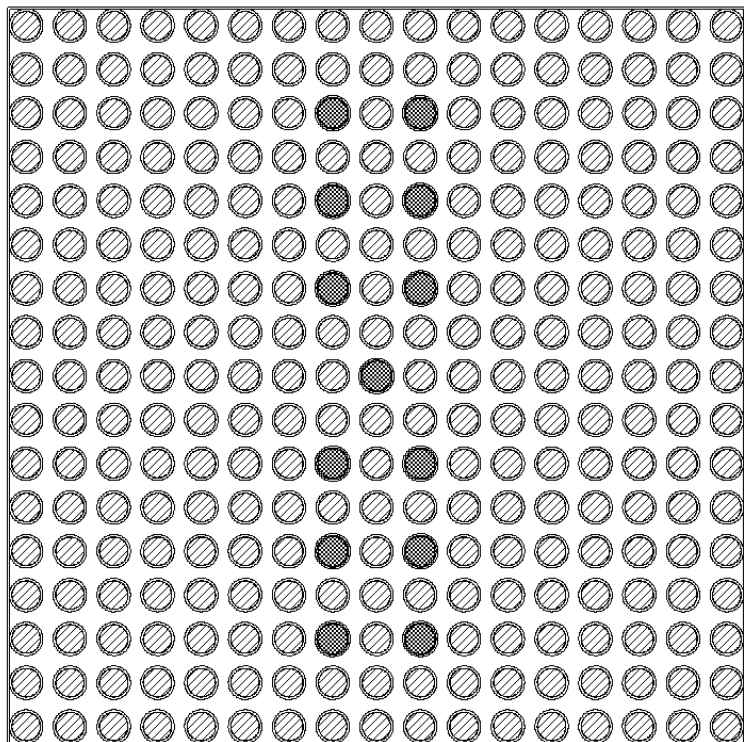


Рис. 2.15. Горизонтальный разрез кассеты  
 $\{(-11, 10.2, 10) (11, -10.1, 10) (0, 1, 0)\}$

```

MATR 3
H 0.066714
O 0.033357
MATR 4
AL 1.E-10
MATR 5
FE 0.0567821
CR 0.0163826
NI 0.0074519
C 4.600027E-4
MN 1.67625E-3
SI 1.63945E-3
TI 9.61271E-6
MATR 6 DENSAA=0.8666
C 84.814
* B10 3.0

```

```

* B11 12.186
B10 7.0
B11 8.186
END
EGRC 1.0E+19, 1., 0.
FINISH
HEAD 1 0 500
CONT T T B B B S90
EQU HG = 200
EQU EPS = 1E-3
EQU a = 1.27 ; шаг решетки
EQU b = a*sqrt(sqrt(3)/2.0)
EQU rc = 0.4525 ; радиус ТВЭЛа
EQU rz = 0.3875 ; радиус зазора в ТВЭЛе
EQU rf = 0.38 ; радиус топлива
EQU dt = 0.96 ; диаметр трубки с поглотителем
EQU tw = 0.05 ; толщина стенки трубки
EQU da = 0.8 ; диаметр поглотителя
EQU tt = 0.02 ; толщина бака
EQU XYI = 8*b+rc+EPS
EQU XYE = XYI+2*tt
EQU WW = 60 ; толщина отражателя
*
RPP CNT -XYE-WW,XYE+WW -XYE-WW,XYE+WW -tt,HG+tt*2
RPP WAL -XYE,XYE -XYE,XYE -tt,HG+tt*2
RPP KAC -XYI,XYI -XYI,XYI 0,HG
END
REFL CNT -WAL /3:3
CHEHOL WAL -KAC /5:5
KACCET (NET1) KAC /3:3
END
C=C SHOW
CELL F ; ТВЭЛ
RPP CC -b/2,b/2 -b/2,b/2 0,HG
RCZ CL 0,0,0 HG rc
RCZ ZA 0,0,0 HG rz
RCZ FU 0,0,0 HG rf
END
WAF CC -CL /7:3
CLD CL -ZA /2:2
ZAR ZA -FU /4:4
FUL FU /1:1
END
CELL T ; поглотитель
RPP CC -b/2,b/2 -b/2,b/2 0,HG
RCZ ST 0,0,0 HG dt/2
RCZ ZA 0,0,0 HG dt/2-tw
RCZ AB 0,0,0 HG da/2

```

```

END
WAF      CC  -ST          /7:3
CLD      ST  -ZA          /5:5
ZAR      ZA  -AB          /4:4
FUL      AB                /6:6
END
*
NET      NET1  0,  0,  0      9,9
*
T09      F F F F F F F F F
T08      F F F F F F F F F
T07      F T F F F F F F F
T06      F F F F F F F F F
T05      F T F F F F F F F
T04      F F F F F F F F F
T03      F T F F F F F F F
T02      F F F F F F F F F
T01      T F F F F F F F F
END
FINISH
NPS      1
PROB     1.
ANGLEN   SPEC NO
MDIS     S
EDIS     S
TYPE     N
RPP      0.,XYI*0.75      0.,XYI*0.75      20,180
REPER    1  1  0
SNAM     SPEC
NOBJ     0
FINISH   source
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY      0
RCT      18      101
ZRCT     0
END
FINISH
BRG 1 0
FINISH
NTOT     1000
NBAT     5
FINISH
NAMVAR   ex18a_s
MAXSER   25

```

NPRINT 1000  
DTZML 10  
FINISH

Задать такую систему проще, не нужны специальные зоны и тела для их определения, достаточно просто указать в предложении CONT угол зеркальной симметрии фрагментом S90 (угол от 0 до 90 градусов).

То, что эти две системы не эквивалентны, видно из результата расчета по приведенным входным данным. Для варианта с поворотной симметрией получен результат

Keff comb. : 9.91921E-01 4.14503E-02

Для варианта с поворотной симметрией получен результат

Keff comb. : 9.97713E-01 4.20957E-02

Так как это независимые расчеты, оценки среднеквадратичного отклонения независимы. Они примерно равны, поэтому абсолютное среднеквадратичное отклонение разности может быть оценено как 0.007 третьей цифры. Разность результатов есть 0.058, что превышает среднеквадратичное отклонение больше чем в 8 раз. Поэтому гипотеза об одинаковости результатов может быть отброшена с почти стопроцентным уровнем значимости.

#### Пример 2.8. Решетка, содержащая сети

В этой выдуманной системе в водяной отражатель помещена решетка из 9 кассет двух типов. Отражатель имеет форму прямоугольного параллелепипеда, горизонтальные размеры одинаковы по обоим направлениям и составляют 140 см. Вертикальный размер – 2002 см, причем начало координат отстоит от центра нижнего основания на 0,2 см по вертикали.

Первый тип кассеты – это первая кассета предыдущего примера, имеющая поворотную симметрию на 90 градусов, она изображена на рис. 2.13. Единственное ее отличие состоит в том, что несколько изменены нуклидные составы топлива и поглотителя, чтобы сделать систему критичной. Однако в предыдущем примере кассета была описана в основной геометрии, а теперь – это прототип элемента решетки с именем TP0.

Второй тип кассеты имеет такие же размеры, толщину чехла, шаг решетки и виды используемых стержней, что и первый тип, но в ней имеется лишь 8 стержней поглотителя, расположенных в виде крестов. Кассета также имеет поворотную симметрию на 90 градусов, ее горизонтальный разрез представлен на рис. 2.16. Она описана как прототип элемента решетки с именем TP1.

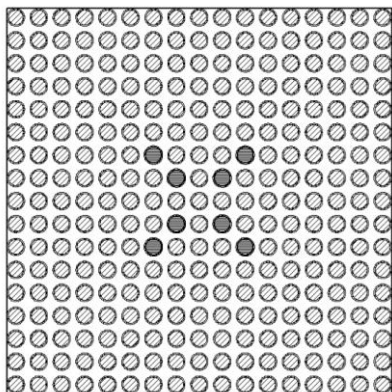


Рис. 2.16. Горизонтальный разрез кассеты второго типа,  
детали вне кассеты из рисунка удалены  
 $\{(-11, 10.2, 10) (11, -10.1, 10) (0, 1, 0)\}$

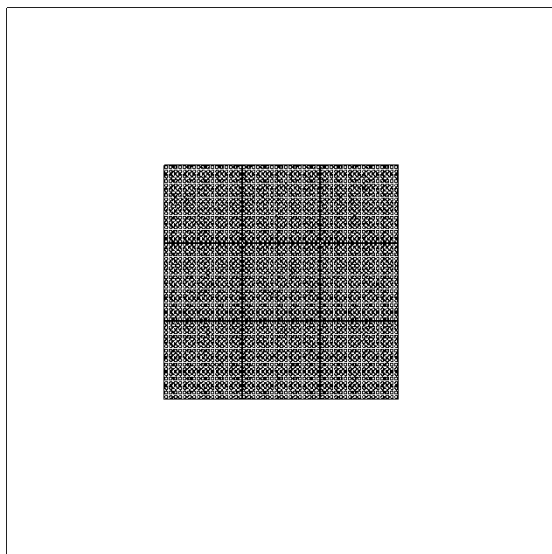


Рис. 2.17. Горизонтальный разрез системы, включая отражатель  
 $\{(-11, 10.2, 10) (11, -10.1, 10) (0, 1, 0)\}$



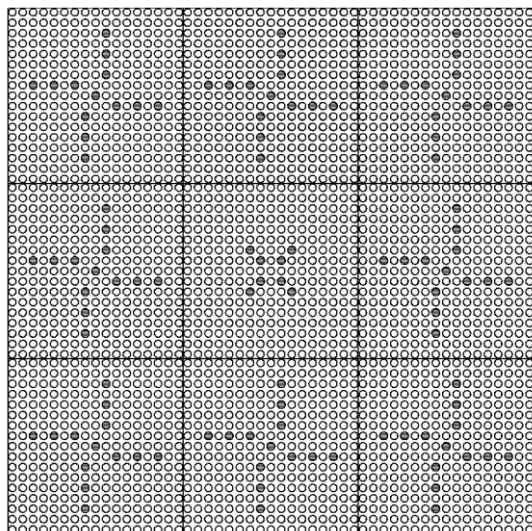


Рис. 2.18. Горизонтальный разрез решетки кассет  
 $\{(-11, 10.2, 10) (11, -10.1, 10) (0, 1, 0)\}$

Решетка представляет квадрат  $3 \times 3$  (индексы  $-1 \leq i \leq 1, -1 \leq j \leq 1$ ), причем центральную позицию  $(0,0)$  занимает кассета второго типа, а остальные позиции – кассета первого типа. Центр нижнего основания центральной кассеты совпадает с центром нижнего основания всей системы.

Горизонтальные разрезы всей системы и собственно решетки приведены на рис. 2.17 и 2.18.

Ниже приведен полный вариант исходных данных.

```
PIN 1 0
MATR 1 DENSAA=0.0687915
U235 1.3333
U238 32.0000
O 66.6667
MATR 2
ZR 0.04273
NB 0.000432
HF 6.6E-6
MATR 3
H 0.066714
O 0.033357
MATR 4
AL 1.E-10
MATR 5
FE 0.0567821
```

```

CR      0.0163826
NI      0.0074519
C       4.600027E-4
MN      1.67625E-3
SI      1.63945E-3
TI      9.61271E-6
MATR 6  DENSAA=0.8666
C       84.814
B10     6.8
B11     8.386
END
EGRC    1.0E+19, 1., 0.
FINISH
HEAD 5   0   500
CONT B B B B B B
EQU HG = 200
EQU EPS = 1E-3
EQU a = 1.27 ; шаг решетки
EQU b = a*sqrt(sqrt(3)/2.0)
EQU rc = 0.4525 ; радиус ТВЭЛа
EQU rz = 0.3875 ; радиус зазора в ТВЭЛе
EQU rf = 0.38 ; радиус топлива
EQU dt = 0.96 ; диаметр трубки с поглотителем
EQU tw = 0.05 ; толщина стенки трубки
EQU da = 0.8 ; диаметр поглотителя
EQU tt = 0.02 ; толщина бака
EQU XYI = 8*b+rc+EPS
EQU XYE = XYI+2*tt
EQU WW = 70 ; толщина отражателя
*
RPP CNT -WW,WW -WW,WW -tt,HG+tt*2
END
REFL CNT /3:3 ; водяной отражатель
END
C=C SHOW
CELL F ; ТВЭЛ
RPP CC -b/2,b/2 -b/2,b/2 0,HG
RCZ CL 0,0,0 HG rc
RCZ ZA 0,0,0 HG rz
RCZ FU 0,0,0 HG rf
END
WAF CC -CL /7:3
CLD CL -ZA /2:2
ZAR ZA -FU /4:4
FUL FU /1:1
END
CELL T ; поглотитель
RPP CC -b/2,b/2 -b/2,b/2 0,HG

```

```

RCZ  ST  0,0,0  HG dt/2
RCZ  ZA  0,0,0  HG dt/2-tw
RCZ  AB  0,0,0  HG da/2
END
WAF   CC  -ST           /7:3
CLD   ST  -ZA           /5:5
ZAR   ZA  -AB           /4:4
FUL   AB           /6:6
END
*
*   прототип кассеты с деформированным крестом
LCELL      TP0
RPP  WAL  -XYE,XYE      -XYE,XYE  -tt,HG+tt*2
RPP  KAC  -XYI,XYI      -XYI,XYI   0,HG
END
CHEHOL      WAL  -KAC    /5:5
KACCET (NET1) KAC      /3:3
END
*
NET          NET1  -8*b,  -8*b,  0          17,17
T17  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T16  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T15  F F F F F F F F F F T F F F F F F
T14  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T13  F F F F F F F F F F T F F F F F F F
T12  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T11  F F F F F F F F F F T F F F F F F F
T10  F F T F T F T F F F F F F F F F F
T09  F F F F F F F F F F T F F F F F F F
T08  F F F F F F F F F F F F T F T F F F
T07  F F F F F F F F T F F F F F F F F F
T06  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T05  F F F F F F F F T F F F F F F F F F
T04  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T03  F F F F F F F F T F F F F F F F F F
T02  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T01  F F F F F F F F F F F F F F F F F
END
ENDL
*
*   прототип кассеты с маленьким косым крестом
LCELL      TP1
RPP  WAL  -XYE,XYE      -XYE,XYE  -tt,HG+tt*2
RPP  KAC  -XYI,XYI      -XYI,XYI   0,HG
END
CHEHOL      WAL  -KAC    /5:5
KACCET (NET1) KAC      /3:3
END

```

```

*
NET          NET1  -8*b,  -8*b,  0          17,17
T17  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T16  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T15  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T14  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T13  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T12  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T11  F F F F F F F T F F F T F F F F F F
T10  F F F F F F F T F T F F F F F F F F
T09  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T08  F F F F F F F T F T F F F F F F F F
T07  F F F F F F F T F F F T F F F F F F F
T06  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T05  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T04  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T03  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T02  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T01  F F F F F F F F F F F F F F F F F
END
ENDL
*
LATT  G2AR  REFL
LISTEL  TP0  TP1
PARM   -1:1  -1:1      0,0,0    2*XYE,0,0    0,2*XYE,0
        /2 0,0
FINISH
NPS      1
PROB     1.
ANGLEN   SPEC NO
MDIS     S
EDIS     S
TYPE     N
RPP      0.001,XYI*2.75    0.001,XYI*2.75    20,180
REPER    1    1    0
SNAM     SPEC
NOBJ      0
FINISH   source
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY      0
RCT      18    101
ZRCT     0
END
FINISH

```

```

BRG 1 0
FINISH
NTOT 1000
NBAT 5
FINISH
NAMVAR ex19
MAXSER 450
NPRINT 0
DTZML 5
FINISH

```

Вся внешняя геометрия состоит из единственной зоны REFL (параллелепипеда с водой). Это связано с тем, что все детали системы помещены в решетку, а вне ее остается лишь однородный отражатель.

Так же как в предыдущем примере имеются два прототипа ячеек сети: F – шестигранная ячейка с твэлом, и T – шестигранная ячейка с поглотителем. Прототипы ячеек описываются совершенно независимо от того, используются в сетях, вложенных в зоны основной геометрии, или в сетях в элементах решетки.

Далее следует прототип элемента решетки TP0 – первый тип кассеты. После заголовка описания прототипа элемента решетки (предложение LCELL) следует описание тел и зон прототипа. В данном случае имеется две зоны: чехол и полость, в которую вложена сеть. Эти строки просто скопированы из предыдущего примера, где они относились к основной геометрии. Далее следует описание сети, полностью совпадающее с описанием сети предыдущего примера. Все это заканчивается признаком окончания описания прототипа элемента решетки – предложением ENDL.

Обратите внимание, что описание сети есть часть описания прототипа элемента решетки, в то время как используемые прототипы ячеек описывают отдельно. Один и тот же прототип ячейки может быть одновременно использован в сетях, вложенных в зоны основной геометрии, и в сетях в разных прототипах элементов решетки. Вторая возможность присутствует в данном варианте.

За прототипом элемента решетки TP0 следует TP1 – второй тип кассеты. Он почти полностью совпадает с предыдущим, за исключением того, что картограмма типов ячеек изменена. Прототипы ячеек же используются те же самые.

Наконец в конце описания геометрии стоит решетка вида G2AR, наложенная на зону REFL.

В решетке используются два прототипа элемента решетки: TP0 и TP1.

Решетка имеет границы изменения индексов  $(-1:1, -1:1)$ , начало решетки в точке 0,0,0. Вектора сдвига направлены по оси *OX* и оси *OY* и равны по модулю размерам кассет.

В разделе источника точки рождения нейтронов сосредоточены в первом квадранте, что будет использовано в следующем варианте задания той же системы.

Из рис. 2.18 легко увидеть, что система имеет симметрию относительно поворота на 90 градусов относительно оси *OZ*. В следующем варианте показано, как можно этим воспользоваться и задать геометрию только в первом квадранте. Приводятся лишь данные геометрического модуля, так как все прочее полностью совпадает с предыдущим вариантом.

```

HEAD 5      0      500
CONT  В В В В В В
EQU   HG = 200
EQU   EPS = 1E-3
EQU   a  = 1.27      ; шаг решетки
EQU   b  = a*sqrt(sqrt(3)/2.0)
EQU   rc = 0.4525    ; радиус ТВЭЛа
EQU   rz = 0.3875    ; радиус зазора в ТВЭЛе
EQU   rf = 0.38      ; радиус топлива
EQU   dt = 0.96      ; диаметр трубки с поглотителем
EQU   tw = 0.05      ; толщина стенки трубки
EQU   da = 0.8       ; диаметр поглотителя
EQU   tt = 0.02      ; толщина бака
EQU   XYI = 8*b+rc+EPS
EQU   XYE = XYI+2*tt
EQU   WW = 70        ; толщина отражателя
*
RPP  CNT -WW,WW      -WW,WW -tt,HG+tt*2
PLX  YZ(M90)      0      ; плоскость OYZ
PLY  ZX(P90)      0      ; плоскость OXZ
END
REFL  CNT  YZ  ZX      /3:3      ; отражатель
XMIN  CNT -YZ      /R270      ; зона поворота на -90
YMIN  CNT  YZ -ZX      /R90      ; зона поворота на +90
END
C=C SHOW
CELL  F      ; ТВЭЛ
RPP  CC -b/2,b/2 -b/2,b/2  0,HG
RCZ  CL  0,0,0  HG rc
RCZ  ZA  0,0,0  HG rz
RCZ  FU  0,0,0  HG rf
END
WAF  CC -CL      /7:3
CLD  CL -ZA      /2:2
ZAR  ZA -FU      /4:4
FUL  FU      /1:1
END
CELL  T      ; поглотитель

```

```

RPP  CC  -b/2,b/2    -b/2,b/2    0,HG
RCZ  ST  0,0,0      HG dt/2
RCZ  ZA  0,0,0      HG dt/2-tw
RCZ  AB  0,0,0      HG da/2
END
WAF   CC  -ST          /7:3
CLD   ST  -ZA          /5:5
ZAR   ZA  -AB          /4:4
FUL   AB          /6:6
END
*
LCELL      TP0
RPP  WAL  -XYE,XYE      -XYE,XYE  -tt,HG+tt*2
RPP  KAC  -XYI,XYI      -XYI,XYI   0,HG
END
CHEHOL      WAL  -KAC    /5:5
KACCET (NET1) KAC      /3:3
END
*
NET          NET1  -8*b,  -8*b,  0          17,17
T17  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T16  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T15  F F F F F F F F F F T F F F F F F
T14  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T13  F F F F F F F F F F T F F F F F F F
T12  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T11  F F F F F F F F F F T F F F F F F F
T10  F F T F T F T F F F F F F F F F F
T09  F F F F F F F F F F T F F F F F F F
T08  F F F F F F F F F F F F T F T F F F
T07  F F F F F F F F T F F F F F F F F F
T06  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T05  F F F F F F F F T F F F F F F F F F
T04  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T03  F F F F F F F F T F F F F F F F F F
T02  F F F F F F F F F F F F F F F F F
T01  F F F F F F F F F F F F F F F F F
END
ENDL
*
LCELL      TP1
RPP  WAL  -XYE,XYE      -XYE,XYE  -tt,HG+tt*2
RPP  KAC  -XYI,XYI      -XYI,XYI   0,HG
END
CHEHOL      WAL  -KAC    /5:5
KACCET (NET1) KAC      /3:3
END
*
```

```

NET          NET1  -8*b,  -8*b,  0          17,17
T17  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T16  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T15  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T14  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T13  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T12  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T11  F F F F F F F T F F F T F F F F F F F
T10  F F F F F F F T F T F F F F F F F F F
T09  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T08  F F F F F F F T F T F F F F F F F F F
T07  F F F F F F F T F F F T F F F F F F F
T06  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T05  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T04  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T03  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T02  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
T01  F F F F F F F F F F F F F F F F F F
END
ENDL
*
LATT  G2AR  REFL
LISTEL  TP0(M90 P90)  TP1(M90 P90)
PARM    0:1  0:1      0,0,0  2*XYE,0,0  0,2*XYE,0
        /2 0,0
FINISH

```

Горизонтальный разрез получившейся системы приведен на рис. 2.19.

Как и в предыдущем примере в основную геометрию введены два полупространства  $YZ$  и  $ZX$ , граничные плоскости которых есть  $OYZ$  и  $OXZ$  соответственно. Так же область моделирования с помощью этих тел ограничена первым квадрантом и введены две специальные зоны для отражения на углы  $-90$  и  $+90$  градусов.

В отличие от предыдущего примера на зону REFL накладывается решетка. Как уже говорилось в примере 2.4, пользователь должен сам организовать усечение элементов решетки зоной, на которую она накладывается. Для этого полупространства  $YZ$  и  $ZX$  получают глобальные имена M90 и P90 соответственно. Эти номера в скобках следуют за обоими именами прототипов элементов в предложении LISTEL. Глобальные имена приведены без знаков минус, так как для усечения использованы сами тела, а не их дополнения.

Сразу двумя полупространствами усекается только элемент с индексами (0,0). Элемент с индексами (0,1) усекается лишь полупространством  $YZ(M90)$ , элемент с индексами (1,0) усекается лишь полупространством  $ZX(P90)$ , а элемент с индексами (1,0) вообще не усекается. Однако для





Кассета имеет чехол толщиной 0,2 см.

Размер всей системы по горизонтали составляет  $9 \cdot 2 = 18$  см.

В центре расположена кассета второго типа, остальные 8 кассет относятся к первому типу.

Разрезы обоих видов кассет представлены на рис. 2.20. Штриховкой помечены материалы поглотителя.

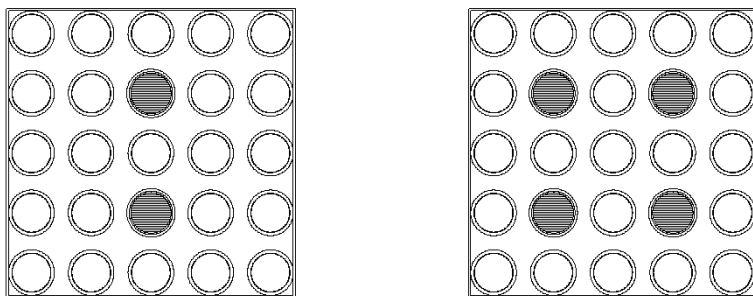


Рис. 2.20. Горизонтальный разрез двух видов кассет на высоте 7 см для измененных входных данных

Обе кассеты симметричны относительно плоскостей  $OXZ$  и  $OYZ$  локальной системы координат. Расположение 9 кассет также симметрично, поэтому вычисления можно проводить только в первом квадранте с условием зеркальной симметрии на плоскостях  $OXZ$  и  $OYZ$  глобальной системы координат. В приводимых ниже исходных данных это сделано с помощью конструкции S90 в предложении CONT. Обратите внимание, что в параметрах решетки (предложение PARM) диапазон изменения индексов взят не  $(-1:1, -1:1)$ , а только  $(0:1, 0:1)$ , так как элементы с отрицательными индексами не пересекаются с первым квадрантом. Их можно было бы и оставить, но это вызовет лишь бесполезный расход памяти.

```
PIN 1 0
* MATR 1 DENSAA=0.0687915
* U235 1.3333
* U238 32.0000
* O 66.6667
MATR 1
U235 0.0008255
U238 0.022105
O 0.045861
MATR 2
ZR 0.04273
NB 0.000432
HF 6.6E-6
```

```

MATR 3
H 0.066714
O 0.033357
MATR 4
AL 1.E-10
MATR 5
FE 0.0567821
CR 0.0163826
NI 0.0074519
C 4.600027E-4
MN 1.67625E-3
SI 1.63945E-3
TI 9.61271E-6
* MATR 6 DENSAA=0.8666
* C 84.814
* B10 6.8
* B11 8.386
MATR 6
C 7.350E-02
B10 0.260E-02
B11 1.056E-02
END
EGRC 1.0E+19, 1., 0.
FINISH
HEAD 5 0 500
CONT B B M M M M S90
EQU HG = 200
EQU EPS = 1E-3
EQU a = 1.27 ; шаг решетки
EQU b = a*sqrt(sqrt(3)/2.0)
EQU rc = 0.4525 ; радиус ТВЭЛа
EQU rz = 0.3875 ; радиус зазора в ТВЭЛе
EQU rf = 0.38 ; радиус топлива
EQU dt = 0.96 ; диаметр трубки с поглотителем
EQU tw = 0.05 ; толщина стенки трубки
EQU da = 0.8 ; диаметр поглотителя
EQU tt = 0.02 ; толщина бака
EQU XYI = 2*b+rc+EPS
EQU XYE = XYI+2*tt
EQU WW = 9 ; размер системы, деленный на 2
*
RPP CNT -WW,WW -WW,WW -tt,HG+tt*2
END
REFL CNT /3:3
END
C=C SHOW
CELL F ; ТВЭЛ
RPP CC -b/2,b/2 -b/2,b/2 0,HG

```

```

RCZ CL 0,0,0 HG rc
RCZ ZA 0,0,0 HG rz
RCZ FU 0,0,0 HG rf
END
WAF CC -CL /7:3/-1
CLD CL -ZA /2:2/-1
ZAR ZA -FU /4:4/-1
FUL FU /-1:1/-1
END
CELL T ; поглотитель
RPP CC -b/2,b/2 -b/2,b/2 0,HG
RCZ ST 0,0,0 HG dt/2
RCZ ZA 0,0,0 HG dt/2-tw
RCZ AB 0,0,0 HG da/2
END
WAF CC -ST /7:3/-1
CLD ST -ZA /5:5/-1
ZAR ZA -AB /4:4/-1
FUL AB /-1:6/-1
END
*
LCELL TPO
RPP WAL -XYE,XYE -XYE,XYE -tt,HG+tt*2
RPP KAC -XYI,XYI -XYI,XYI 0,HG
END
CHEHOL WAL -KAC /5:5
KACCET (NET1) KAC /3:3
END
*
NET NET1 -2*b, -2*b, 0 5,5
T05 F F F F F
T04 F F T F F
T03 F F F F F
T02 F F T F F
T01 F F F F F
*
P0105 -1 -1 -1 -1 -1
P0104 -1 -1 -2 -1 -1
P0103 -1 -1 -1 -1 -1
P0102 -1 -1 -2 -1 -1
P0101 -1 -1 -1 -1 -1
*
O0105 2 2 2 2 2
O0104 2 3 3 3 2
O0103 2 3 -1 3 2
O0102 2 3 3 3 2
O0101 2 2 2 2 2
END

```

```

ENDL
*
LCELL      TP1
RPP  WAL  -XYE,XYE      -XYE,XYE  -tt,HG+tt*2
RPP  KAC  -XYI,XYI      -XYI,XYI   0,HG
END
CHEHOL      WAL -KAC    /5:5
KACCET (NET1) KAC      /3:3
END
*
NET          NET1  -2*b,  -2*b,  0          5,5
T05   F F F F F
T04   F T F T F
T03   F F F F F
T02   F T F T F
T01   F F F F F
*
P0105 -1 -1 -1 -1 -1
P0104 -1 -3 -1 -3 -1
P0103 -1 -1 -2 -1 -1
P0102 -1 -3 -1 -3 -1
P0101 -1 -1 -1 -1 -1
*
O0105  7  6  5  6  7
O0104 10  9  8  9 10
O0103 13 12 11 12 13
O0102 10  9  8  9 10
O0101  7  6  5  6  7
END
ENDL
*
LATT  G2AR  REFL
LISTEL  TP0  TP1
PARM    0:1  0:1    0,0,0    2*XYE,0,0    0,2*XYE,0
        /2 0,0
FINISH
NPS      1
PROB     1.
ANGLEN   SPEC NO
MDIS     S
EDIS     S
TYPE     N
RPP      0.001,XYI*2.75    0.001,XYI*2.75    20,180
REPER    1    1    0
SNAM     SPEC
NOBJ      0
FINISH source
RGS 1 0

```

```

KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY      0
RCT      18      101
ZRCT      0
END
FINISH
BRG 1 0
FINISH
NTOT      1000
NBAT      5
FINISH
NAMVAR      ex110_SM
MAXSER      400
NPRINT      0
DTZML      3
FINISH

```

На рис. 2.21 представлен разрез получившейся системы. Штриховкой помечен поглотитель.

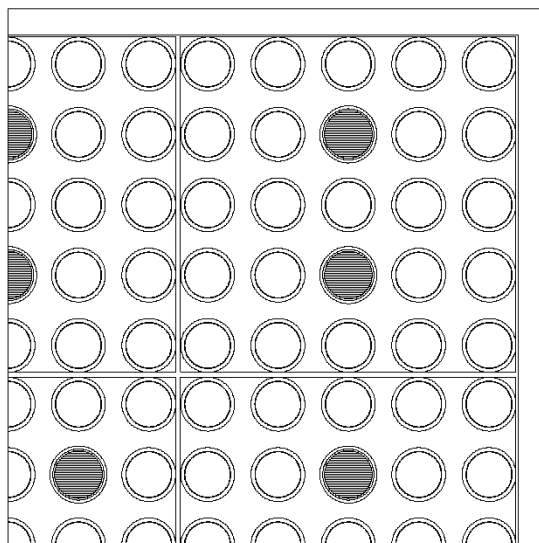


Рис. 2.21. Горизонтальный разрез решетки кассет в угле симметрии  $\{(-0.1, 10.2, 10) (11, -0.1, 10) (0, 1, 0)\}$

В варианте предусмотрено оценка зависимости скоростей реакций в стержнях от их расположения, причем положение зависит как от места стержня в кассете, так и от положения кассеты в целой системе.

Для топливных стержней кассет первого типа учитывается только положение кассеты, а внутри нее все топливо относится к одной регистрационной зоне, по которой и будут оцениваться интегралы скоростей реакций. Для того чтобы номера этих зон были различными в различных кассетах, используется условный указатель в элементах решетки.

Условный указатель в геометрической зоне, описывающей топливо, оказывается условным указателем ячейки сети, и иначе быть не может, так как эта ячейка может быть использована и в иных прототипах элемента решетки или для сети основной геометрии. Однако он позволяет сослаться на картограмму номеров регистрационных зон, которая уже находится в нужном прототипе элемента решетки. В данном случае это условный указатель  $-1$ , который отсылает к первой картограмме. В прототипе первого типа в этой картограмме во всех позициях топливных стержней стоит  $-1$ , что есть уже первый условный указатель в элементах решетки. При генерации решетки в каждом элементе он преобразуется в уникальный номер, при этом внутри элемента все номера для топлива идентичны.

В прототипе элемента решетки второго типа было желательно выделить топливо в центральном стержне кассеты. Поэтому в картограмме в его позиции стоит  $-2$ , то есть это второй условный указатель в элементах решетки, а в остальных позициях – первый указатель, как и для кассет первого типа. Поэтому будет образовано два номера регистрационных зон: для центрального стержня и для стержней, отличных от него. Они будут гарантированно отличны от номеров для топлива в прочих кассетах.

Поглотитель в каждой кассете также объединен в одну регистрационную зону, но в каждой кассете эта зона своя. Поэтому в прототипе ячейки соответствующая зона имеет тот же первый условный указатель. То, что он такой же, как для топлива, не имеет значения, так как он лишь определяет номер картограммы, а само значение будет браться из соответствующей позиции этой картограммы. В прототипе элемента решетки первого типа в позициях поглотителя стоит  $-2$ , то есть второй условный указатель, аналогично описанному выше. В прототипе элемента решетки второго типа там стоит  $-3$ , то есть третий условный указатель. То, что он различен в двух прототипах элементов решетки, не играет роли, так как для разных сгенерированных элементов решетки все условные указатели будут преобразованы в разные номера.

Результат преобразования условных указателей в номера регистрационных зон представлен на рис. 2.22.

Хотя алгоритм преобразования условных указателей в прототипах элементов решетки в номера регистрационных зон не особенно сложен,

но проводить соответствующие вычисления в уме довольно обременительно, проще посмотреть с помощью MCU Office, что получилось.

Также было желательно получить зависимость интегралов потока по ячейкам сети от положения этих ячеек. Для получения этих интегралов все зоны, как прототипа топливной ячейки, так и прототипа ячейки с поглотителем были помечены условным указателем регистрационного объекта, то есть символом /-1. Таким образом, все геометрические зоны каждой ячейки должны оказаться в одном регистрационном объекте, для разных ячеек эти объекты могут оказаться и различными.

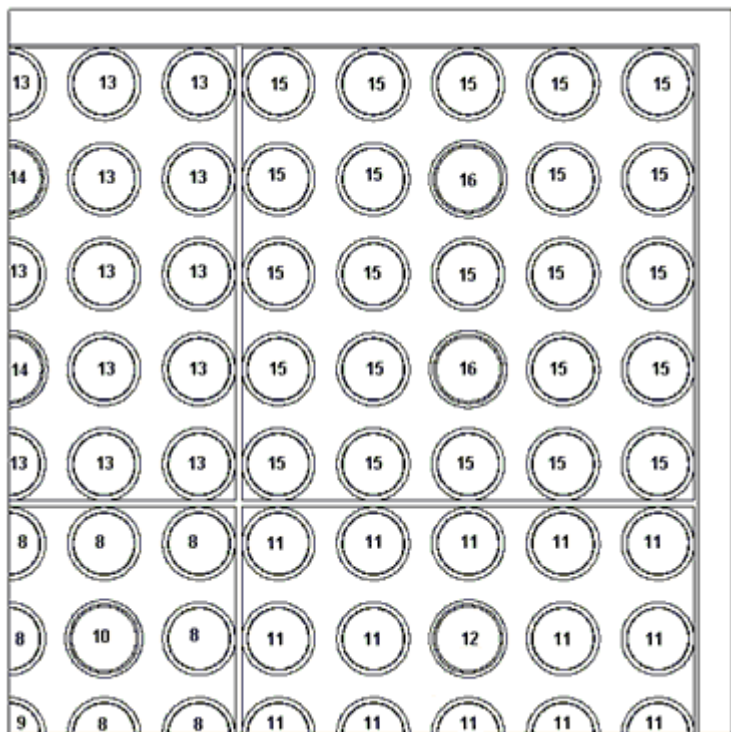


Рис. 2.22. Полученные номера регистрационных зон  
 $\{(-0.1, 10.2, 10) (11, -0.1, 10) (0, 1, 0)\}$

Для кассет первого типа все ячейки были отнесены к трем классам: периферийные ячейки, промежуточные ячейки и центральные ячейки. Все периферийные ячейки всех кассет этого типа объединены в один регистрационный объект, интеграл по которому и будет оцениваться. Точно также промежуточные ячейки всех кассет этого типа объединены в один,



но другой объект, поэтому в картограмме объектов в прототипе элемента первого типа в соответствующих позициях стоят числа 2 и 3.

Они являются уже номерами регистрационных объектов, и никак не преобразуются при разворачивании решетки. Номер один не использован, так как он автоматически присваивается в качестве номера регистрационного объекта всем геометрическим зонам, у которых нет явного указания на регистрационный объект, в данном примере это геометрические зоны внешней геометрии или чехлы кассет.

Для центральной ячейки в картограмме стоит -1, то есть первый условный указатель в прототипе элемента решетки, который, как и для регистрационных зон, преобразуется в каждом сгенерированном элементе в свой уникальный номер.

В кассете второго типа было желательно получить для каждой ячейки свою оценку потока. Так как в данном варианте кассета второго типа присутствует только в одном экземпляре, не было нужды использовать условные указатели в прототипах элементов решетки. В картограмме для разных ячеек были просто использованы разные номера – положительные целые числа. Распределение регистрационных объектов показано на рис. 2.23.

Следует обратить внимание на то, что только число 11, появляется в картограмме один раз. Это связано с тем, что прототип элемента задан целиком, но из него будет использована только одна четверть. Часть ячеек не попадают в эту четверть, и значения в картограмме для них не играют роли. Проставлены номера, совпадающие с номерами симметричных им ячеек, попадающих в первый квадрант.

Ниже представлены оценки интегралов потока регистрационных объектов 8, 9, 10 и 11. Потоки регистрировались в трех группах: [0,1 МэВ; ∞], [4,65 эВ; 0,1 МэВ], [0; 4,65 эВ].

FLUX.	Energy	OBJECT:	Mean	StdDev	8
	1.00000E+05		1.37915E-01	2.09049E-01	
	4.65000E+00		1.05320E-01	2.38522E-01	
	0.00000E+00		3.84796E-02	4.03747E-01	

FLUX.	Energy	OBJECT:	Mean	StdDev	9
	1.00000E+05		2.70250E-01	1.48392E-01	
	4.65000E+00		2.08462E-01	1.90327E-01	
	0.00000E+00		5.50375E-02	2.65626E-01	

FLUX.	Energy	OBJECT:	Mean	StdDev	10
	1.00000E+05		2.53782E-01	1.54286E-01	

FLUX.	OBJECT:		11
Energy	Mean	StdDev	
1.000000E+05	6.89511E-02	2.65726E-01	
4.650000E+00	5.28835E-02	3.13048E-01	
0.000000E+00	2.04801E-02	5.25062E-01	

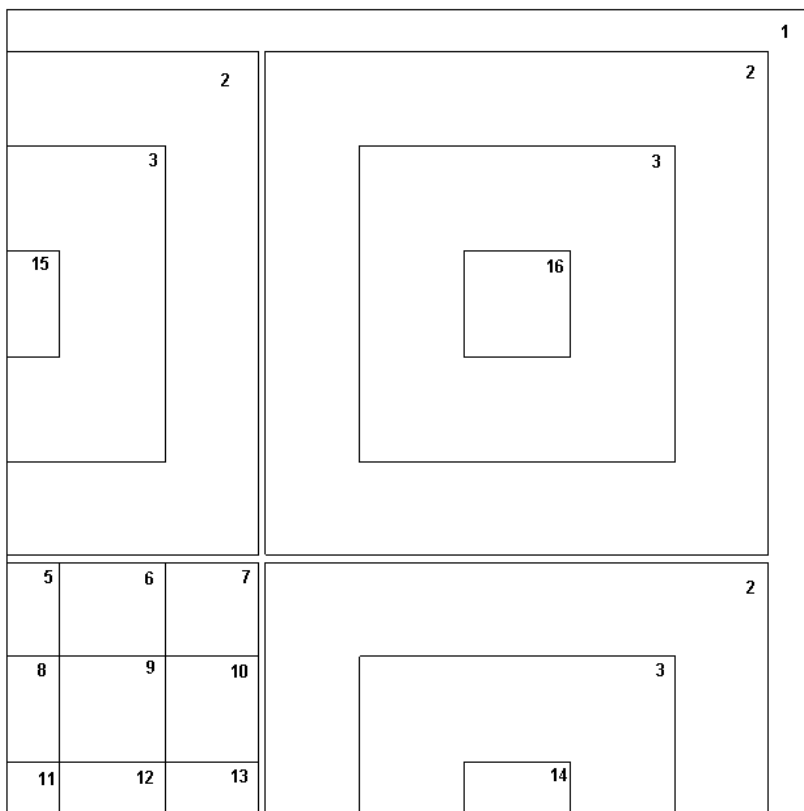


Рис. 2.23. Полученные номера регистрационных объектов  
 $\{(-0.1, 10.2, 10) (11, -0.1, 10) (0, 1, 0)\}$

Для быстрых частиц потоки в ячейках не должны сильно различаться, но видно, что потоки в ячейках с номерами 9 и 10 примерно вдвое превосходят поток в ячейке 8, а он примерно вдвое превосходит поток в ячейке 11. В этом нет ничего удивительного, мы проводим моделирование

в угле симметрии, но в действительности система лежит во всех четырех квадрантах. В полной системе ячейка 11 остается в одном экземпляре, в то время как ячейка 8 имеет одну ей симметричную по другую сторону от плоскости  $OXZ$ . Ячейки 9 и 10 имеют по три симметричных им ячейки, не попавших в первый квадрант. Поэтому интеграл по ячейке 9, например, это фактически интеграл по четырем ячейкам, а не одной. Это же можно увидеть из рисунка: от ячейки 11 остается лишь четверть, от ячейки 8 – половина, а ячейки 9 и 10 присутствуют целиком.

### 3. Источник

Модуль источника предоставляет возможность выполнять расчёты с одним из двух типов источников: простым (генерирует только нейтроны) или сложным. Оба типа могут использоваться как в задачах о критичности системы, так и в задачах с заданным внешним источником.

Вид решаемой задачи определяется в исходных данных для алгоритма моделирования с помощью карты ISTR  $istr$ . По умолчанию  $istr = 0$ . В этом случае решается задача о критичности системы и вычисляется эффективный коэффициент размножения. При  $istr = 1$  решается задача с заданным внешним источником. При  $istr = 2$  решается задача с заданным внешним источником и блокируется использование нейтронов деления. Этот режим предназначен для задач, в которых плотность нейтронов деления учтена в источнике.

Следует обратить внимание на то, что при расчете с  $istr = 1$  систем в надкритическом состоянии программа не сможет завершить расчет поколения, поскольку в процессе моделирования будет рождаться все больше и больше нейтронов. Также необходимо учитывать, что для подкритических систем, близких к критичности (эффективный коэффициент размножения больше 0,95) расчет потребует очень большого времени, так как дисперсия оценок будет очень велика, а скорость ее убывания будет, как и всегда в Монте-Карло, пропорциональна квадратному корню из количества промоделированных нейтронов.

Несмотря на возможность использования простого точечного источника для решения задач с внешним источником нейтронов, он, в основном, используется для задания нейтронов первого поколения при решении задач на критичность. В этом случае рекомендуется располагать точку рождения нейтронов в делящемся материале или, по крайней мере, не в области, занятой поглотителями нейтронов.

При решении задач со сложной геометрией, например, при моделировании активных зон реакторов, для быстрого выхода на распределение частиц, близкое к собственной функции, целесообразно сразу разбросать нейтроны по объему активной зоны. Для этого используются возможности, предоставляемые сложным источником.

Отметим, что в исходных данных для модуля источников можно использовать только один простой точечный источник.

### 3.1. Простой точечный источник

#### Пример 3.1 Точечный источник

Сфера с центром в точке (0,0,0) и радиусом 1 см. В качестве материала, заполняющего сферу, используется вакуум, что приводит к отсутствию столкновений нейтронов со средой внутри сферы. В качестве граничного условия указано поглощение, т.е. все нейтроны, покидающие сферу, уже не вернутся. Сочетание таких материальных свойств и граничных условий приводит к тому, что утечка нейтронов равна их генерации. Регистрация утечки осуществляется в 26-и группах, что позволяет получить в ответе вероятности рождения нейтронов, заданные в простом точечном источнике по умолчанию.

```
PIN 1 0
MATR 1
O 1.E-08
FINISH
HEAD 1 0 100
CONT B
SPH S 0 0 0 1
END
GZ1 S #M=1
END
FINISH
SPNT 0.5 0.5 0.5
FINISH
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY 1.0E+7 6.5E+6 4.0E+6 2.5E+6 1.4E+6
        8.0E+5 4.0E+5 2.0E+5 1.0E+5 4.65E+4
        2.15E+4 1.0E+4 4.65E+3 2.15E+3 1.0E+3
        465.0 215.0 100.0 46.5 21.5
        10.0 4.65 2.15 1.0 0.465
        0.215 0.0
LEAK
MFLU 0
END
NRET 3214 UP
FINISH
ISTR 1
FINISH
```

```
NAMV EXAMPLE
MAXS 1000
DTZML 50
FINISH
```

В этом примере генерация нейтронов определяется только картой SPNT. Все нейтроны рождаются в точке (0,5;0,5;0,5) с изотропным распределением по углу и в соответствии с 26-групповым спектром деления  $^{235}\text{U}$  тепловым нейтроном. Использование запятых в карте SPNT обязательно, однако при их использовании следует помнить, что запятую нельзя отрывать от числа.

### Пример 3.2. Точечный источник с заданным спектром

```
SPNT 0.5 0.5 0.5
ESET 1.0E+7 6.5E+6 4.0E+6 2.5E+6 1.4E+6
      8.0E+5 4.0E+5 2.0E+5 1.0E+5 4.65E+4
      2.15E+4 1.0E+4 4.65E+3 2.15E+3 1.0E+3
      465.0 215.0 100.0 46.5 21.5
      10.0 4.65 2.15 1.0 0.465
      0.215 0.0
SPEC 0.016 0.088 0.184 0.270 0.202
      0.141 0.061 0.024 0.010 0.003
      0.001 [15| 0.0]
FINISH
```

Во втором примере с помощью карт ESET и SPEC записаны значения, используемые для точечного источника по умолчанию. Задаваемые картой ESET 27 значений энергии в эВ определяют 26 интервалов, разыгрываемых с вероятностями, заданными в карте SPEC. После розыгрыша интервала нейтрону приписывается энергия, соответствующая середине выбранного интервала. Так же как и в первом примере, все нейтроны рождаются в точке (0,5;0,5;0,5) с изотропным распределением по углу.

Поскольку в данном примере используются значения по умолчанию, результаты его расчета должны совпадать с результатами примера 3.1 в пределах статистической погрешности.

### Пример 3.3. Точечный моноэнергетический источник

```
SPNT 0.5 0.5 0.5
ENSO 3.0E+06
FINISH
```

В этом примере все нейтроны рождаются в точке (0,5;0,5;0,5) с изотропным распределением по углу, однако благодаря использованию карты ENSO, все генерируемые источником нейтроны имеют энергию

3 МэВ. В этом можно убедиться подстановкой карты ENSO из этого примера в исходные данные для примера 3.1.

### 3.2. Сложный источник

Сложный источник состоит из примитивных источников. В простейших случаях, в том числе и для задания распределенного по некоторому объему источника при расчетах больших систем будет достаточно одного примитивного источника.

#### Пример 3.4 Точечный источник средствами сложного источника

Данный пример повторяет пример 3.1 для простого точечного источника, однако здесь источник задан с помощью средств сложного источника. Результаты обоих расчетов должны совпадать в пределах статистической погрешности.

```
PIN 1 0
MATR 1
O 1.E-08
FINISH
HEAD 1 0 100
CONT B
SPH S 0 0 0 1
END
GZ1 S #M=1
END
FINISH
NPS 1
PROB 1
ANGLEN SPEC1
MDIS S
EDIS S
TYPE N
SPH 0.5 0.5 0.5 0.00001
SNAM SPEC1
REPER 1 0 0
NOBJ 0
FINISH
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY 1.0E+7 6.5E+6 4.0E+6 2.5E+6 1.4E+6
        8.0E+5 4.0E+5 2.0E+5 1.0E+5 4.65E+4
        2.15E+4 1.0E+4 4.65E+3 2.15E+3 1.0E+3
        465.0 215.0 100.0 46.5 21.5
        10.0 4.65 2.15 1.0 0.465
```

```

0.215    0.0
LEAK
MFLU 0
END
NRET 3214 UP
FINISH
ISTR 1
FINISH
NAMV EXAMPLE
MAXS 1000
DTZML 50
FINISH

```

В этом примере в качестве источника задана сфера радиусом 0,00001 см. Поскольку используется только одна сфера, то сложный источник в данном случае состоит из одного примитивного источника (NPS 1), который срабатывает с вероятностью 1 (PROB 1).

Далее мы задаем характеристики спектра, который будет использоваться при генерации частиц в примитивном источнике. Описание спектра начинается с определения его имени. В данном примере это SPEC1 (ANGLEN SPEC1). Отсутствие дополнительной информации в карте ANGLEN означает независимость энергии  $E$  и косинуса  $\mu$  угла между вектором скорости частицы и реперным вектором. Далее следуют две карты, определяющие характеристики спектра SPEC1:

- используется изотропное распределение по углу (MDIS S);
- энергия определяется в соответствии со спектром деления  $^{235}\text{U}$  тепловым нейтроном (EDIS S).

После того, как спектр определен, можно задавать характеристики примитивного источника. Его описание начинается с указания типа генерируемых частиц. В данном случае это нейтроны (TYPE N). Далее следует указание на то, что источник будет генерироваться внутри сферы (SPH) с центром в точке (0,5;0,5;0,5) и радиусом 0,00001 см. Для тела SPH, также как и для тел RPP, RCZ, HEXU вероятность рождения частиц распределена равномерно по объёму. После определения тела-контейнера примитивного источника указываем название используемого спектра SPEC1 (SNAM SPEC1). Далее задаем правило выработки реперного вектора (REPER 1 0 0). В данном примере направление реперного вектора на самом деле не имеет значения, поскольку мы выбрали изотропное распределение  $\mu$ . Заканчивается описание примитивного источника указанием на то, что регистрационные объекты, определенные в исходных данных для геометрического модуля, не будут использоваться для ограничения геометрической области рождения нейтронов в данной сфере (NOBJ 0).

### Пример 3.5 Источник нейтронов, распределенный по объему активной зоны

Пример демонстрирует возможность использования распределенного по объему активной зоны источника нейтронов при расчетах больших систем для быстрого выхода на распределение частиц, близкое к собственной функции.

```
PIN 1 0
MATR 1
U235 3.6293E-4
U238 0.022318
O 0.045367
MATR 2
ZR 0.042794
NB 4.2456E-4
HF 6.6297E-6
MATR 3
H 0.06667
O 0.03344
FINISH
HEAD 1 0 2000
CONT B B B B B B
EQU HU =100.
RPP N1 -120,120 -120,120 0 HU
END
GZ1 (L1) N1 #M=3
END
CELL A
SHEX N1 12.75 HU
RCZ N2 0.,0.,0. HU 4.55
RCZ N3 0.,0.,0. HU 3.86
END
WAT N1 -N2 #M=3
CLA N2 -N3 #M=2
FUE N3 #M=1
END
NET L1 -63.75, -110.4182,0 21,21
T01 0 0 A A A A A A A 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T02 0 A A A A A A A A A 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T03 A A A A A A A A A A A A A 0 0 0 0 0 0 0
T04 A A A A A A A A A A A A A A 0 0 0 0 0 0
T05 A A A A A A A A A A A A A A A 0 0 0 0 0
T06 A A A A A A A A A A A A A A A A 0 0 0 0
T07 A A A A A A A A A A A A A A A A A 0 0 0
T08 A A A A A A A A A A A A A A A A A A 0 0
T09 A A A A A A A A A A A A A A A A A A A 0
T10 0 A A A A A A A A A A A A A A A A A A 0
```



```

T11 0 A A A A A A A A A A A A A A A A A A A 0
T12 0 0 A A A A A A A A A A A A A A A A A A 0
T13 0 0 A A A A A A A A A A A A A A A A A A A
T14 0 0 0 A A A A A A A A A A A A A A A A A A
T15 0 0 0 0 A A A A A A A A A A A A A A A A A
T16 0 0 0 0 0 A A A A A A A A A A A A A A A A
T17 0 0 0 0 0 0 A A A A A A A A A A A A A A A
T18 0 0 0 0 0 0 0 0 A A A A A A A A A A A A A
T19 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 A A A A A A A A A A A
T20 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 A A A A A A A A A A 0
T21 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 A A A A A A A A 0 0
END
FINISH
NPS 1
PROB 1
ANGLEN SPEC1
MDIS S
EDIS S
TYPE N
RCZ 0,0,0 HU 120
SNAM SPEC1
REFER 1 0 0
NOBJ 0
FINISH
RGS 1 0
KEFF
FINISH
NTOT 1000
NBAT 5
FINISH
NAMV EXAMPLE
MAXS 100
DTZML 1
FINISH

```

В отличие от предыдущего примера контейнером примитивного источника здесь служит тело RCZ с серединой нижнего основания в точке (0;0;0), высотой 100 см (поскольку модулю источников доступны значения переменных, объявленных в исходных данных для геометрического модуля) и радиусом 120 см

```
RCZ 0,0,0 HU 120
```

Нейтроны генерируются внутри этого цилиндра, который практически полностью охватывает объем активной зоны (заштрихованная область на рис. 3.1, где представлено горизонтальное сечение рассматриваемой системы).

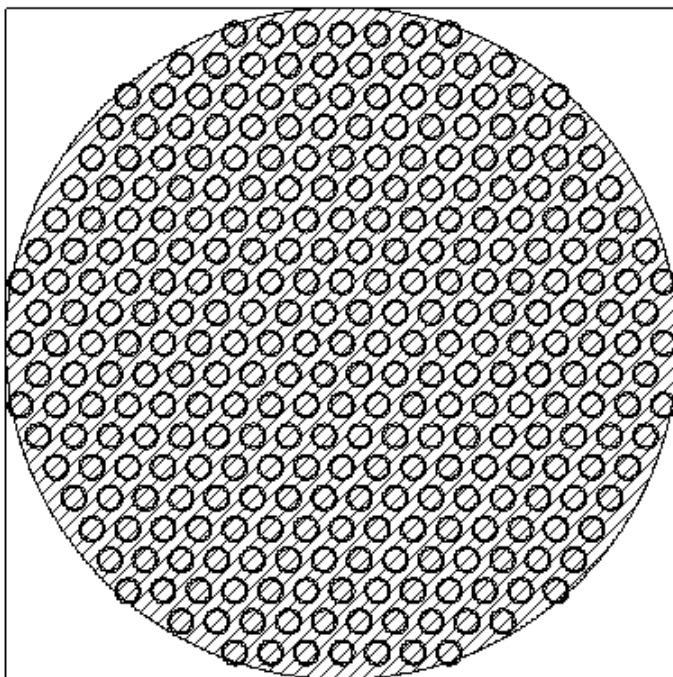


Рис. 3.1. Использование распределенного источника при расчетах больших систем

### Пример 3.6. Контейнер RCZD

В этом примере для задания примитивного источника используется контейнер RCZD, который позволяет задать цилиндр с образующей, параллельной оси  $OZ$ , с внутренним распределением вероятностей рождения. Для такого цилиндра можно задать независимое по высоте и радиусу азимутально-симметричное распределение. Оба независимых распределения могут быть дискретными и кусочно-линейными.

Под дискретным распределением понимается распределение случайной величины, принимающей только конечное число значений.

Термин кусочно-линейное распределение подразумевает, что *функция распределения* кусочно-линейна, то есть *плотность вероятности* кусочно-постоянна. Это распределение можно представить так: имеется конечный набор примыкающих один к другому отрезков и вероятности генерации точки внутри этих отрезков. Условное распределение внутри каждого отрезка равномерно.

```

PIN 1 0
MATR 1
B10 1.
FINISH
HEAD 1 0 100
CONT B B B
RCZ C 0 0 0 10 6
END
GZ1 (L1) C #M=1
END
CELL A
SBOX B1 0,0,1 12,0,0 0,12,0
RCZ C1 6 6 0 1 1
RCZ C2 6 6 0 1 2
RCZ C3 6 6 0 1 3
RCZ C4 6 6 0 1 4
RCZ C5 6 6 0 1 5
RCZ C6 6 6 0 1 6
END
GZ0 B1 -C6 #M=1 Z=1
GZ1 C6 -C5 #M=1 IZ=6
GZ1 C5 -C4 #M=1 IZ=5
GZ1 C4 -C3 #M=1 IZ=4
GZ1 C3 -C2 #M=1 IZ=3
GZ1 C2 -C1 #M=1 IZ=2
GZ1 C1      #M=1 IZ=1
END
NET L1 -6,-6,0 10 1
T01 A A A A A A A A A A
P0101 11 21 31 41 51 61 71 81 91 101
P0201 12 22 32 42 52 62 72 82 92 102
P0301 13 23 33 43 53 63 73 83 93 103
P0401 14 24 34 44 54 64 74 84 94 104
P0501 15 25 35 45 55 65 75 85 95 105
P0601 16 26 36 46 56 66 76 86 96 106
END
FINISH
NPS 1
PROB 1
ANGLEN SPEC1
MDIS S
EDIS D 1
EMES 1
EPRO 1
TYPE N
RCZD 0 0 0 3 -4
SNAM SPEC1
REPER 1 0 0

```

```

NOBJ 0
HGRI 0 4 6 10
HPC 0.0,1
    1.0,1
    1.0,1
    0.4,1
RGRI 0.5 2.5 3.5 5.5
RPC 1.0,1
    0.5,1
    0.0,1
    0.2,1
FINISH
RGS 1 0
KEFF
BAL
PTYPE 1
TTYPE 2
ENERGY 0.0
RCT 3
ZRCT 0
END
PERC 0
NRET 3241 UP
FINISH
ISTR 1
FINISH
NAMV EXAMPLE
MAXS 16000
DTZML 100
FINISH

```

Центр нижнего основания контейнера RCZD установлен в точку (0;0;0), используется кусочно-линейное распределение по высоте и дискретное распределение по радиусу.

Рассмотрим подробнее особенность моделирования источника при использовании кусочно-линейного распределения в контейнере RCZD. Поскольку формулы для истинных интенсивностей совершенно аналогичны формулам для вероятностей срабатывания, будем рассматривать только последние.

В случае кусочно-линейного распределения задается плотность вероятности в дискретном наборе точек. Однако при моделировании плотность распределения полагается ступенчатой, т.е. на каждом межточечном интервале плотность постоянна. Связь между этими значениями поясним для случая высоты.

Пусть имеется два интервала:  $(a,b)$ ,  $(b,c)$ . В них заданы плотности вероятности  $f_a, f_b, f_c$ . Интегрируя по формуле трапеций, получаем для первого и второго интервалов вероятности

$$P_{ab}=(f_a+f_b) \cdot (b-a)/2,$$

$$P_{bc}=(f_b+f_c) \cdot (c-b)/2.$$

Эти вероятности не нормированы, даже если значения в точках истинны, однако зависимость не кусочно-линейная. Окончательно вероятности корректируются умножением на

$$1/(P_{ab}+P_{bc}).$$

Для распределения по радиусу ситуация аналогична, однако необходимо учитывать, что элемент площади имеет вид не  $dr$ , а  $2\pi r dr$ .

В частности, из того следует парадоксальный факт, состоящий в том, что если имеется только один интервал, то значения на его концах не играют роли, поскольку в результате интегрирования и нормировки получается

$$P_{ab}/(P_{ab})=1.$$

Таким образом, заданные картой НРС интенсивности трех отрезков шкалы высот [0,4], [4,6] и [6,10] есть соответственно 2, 2 и 2,8. С учетом заданной по умолчанию нормализации получаем 0,29, 0,29 и 0,41.

В данном примере розыгрыш точки рождения нейтрона производится на 3 отрезках по высоте и 4 дискретных линиях по радиусу с одинаковой плотностью вероятности, но разными весами.

Регистрация в примере осуществляется в цилиндрической области разбитой на 10 слоев ( $N_h$ ) по высоте и 6 радиусов ( $N_r$ ) в каждом слое. В номере каждой регистрационной зоны закодированы номер слоя и номер радиуса. Например, регистрационная зона номер 65 соответствует шестому слою по высоте и пятому радиусу. Отметим, что при таком подходе программа выделяет память для неиспользуемых в задаче регистрационных зон, соответствующих радиусам с номером больше 6. Например, хотя регистрационная зона 39 в задаче не определена, память для нее будет выделена. В нашем случае эти затраты не существенны и мы пожертвуем памятью ради удобства работы с результатами расчета.

Составим матрицу вероятностей рождения нейтронов в зависимости от высоты и радиуса с учетом особенностей обработки кусочно-линейного распределения в контейнере RCZD. С учетом того, что модуль источников автоматически выполнит нормировку заданных вероятностей таким образом, чтобы их сумма равнялась единице, матрица будет получаться следующим образом:

$$\begin{pmatrix} 0,29 \\ 0,29 \\ 0,41 \end{pmatrix} (0,59 \quad 0,29 \quad 0 \quad 0,12) = \begin{pmatrix} 0,173 & 0,087 & 0 & 0,035 \\ 0,173 & 0,087 & 0 & 0,035 \\ 0,242 & 0,121 & 0 & 0,048 \end{pmatrix}$$

На основе этой матрицы заполним табл. 3.1 нормированных вероятностей рождения нейтронов в соответствии с используемым разбиением на регистрационные зоны.

При этом учтем, что внутри отрезков по высоте вероятность распределена равномерно, и поэтому, например, вероятность рождения нейтрона в области регистрационной зоны 11 составит четверть вероятности рождения нейтрона на нижнем отрезке по высоте самой внутренней линии по радиусу. В регистрационных областях с  $N_r$  равными 2 и 5 нейтроны не рождаются по причине отсутствия там источника, а для области с  $N_r$  равным 4 задана нулевая интенсивность источника.

Табл. 3.1. Нормированные вероятности рождения нейтронов

$N_h \backslash N_r$	1	2	3	4	5	6
1	4.33E-02	0.00E+00	2.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	8.65E-03
2	4.33E-02	0.00E+00	2.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	8.65E-03
3	4.33E-02	0.00E+00	2.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	8.65E-03
4	4.33E-02	0.00E+00	2.16E-02	0.00E+00	0.00E+00	8.65E-03
5	8.65E-02	0.00E+00	4.33E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.73E-02
6	8.65E-02	0.00E+00	4.33E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.73E-02
7	6.06E-02	0.00E+00	3.03E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.21E-02
8	6.06E-02	0.00E+00	3.03E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.21E-02
9	6.06E-02	0.00E+00	3.03E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.21E-02
10	6.06E-02	0.00E+00	3.03E-02	0.00E+00	0.00E+00	1.21E-02

В рассматриваемом примере используется только один материал, состоящий полностью из  $^{10}\text{B}$ , который является очень сильным поглотителем нейтронов. Таким образом, любой рожденный нейтрон будет поглощен в точке рождения. Это позволит нам зарегистрировать заданное в исходных данных для модуля источника распределение. Отметим, что заданный источник генерирует нейтроны с энергией 1 эВ.

Программа MCU печатает результат в нормировке «на один нейтрон источника», т.е. по сути, мы получаем нормированное распределение вероятности обнаружения нейтрона в заданной точке пространства. В данном примере оно будет совпадать с заданным распределением вероятно-

сти рождения, в чем можно убедиться, сравнив результаты расчета с данными, приведенными в табл. 3.1. Так, например, скорость реакции поглощения в регистрационной зоне 61 в пределах статистической погрешности будет равна 0,0865.

### Пример 3.7. Реперный вектор

Пример демонстрирует использование реперного вектора для определения направления полета частицы, генерируемой источником.

```
PIN 1 0
MATR 1
O16 1.0E-08
FINISH
HEAD 1 0 0
CONT B B B B B B
RPP N1 -10 10 -10 10 -10 10
PLX N2 0
PLY N3 0
END
Z01 N1 -N2 N3 #M=1 Z=1
Z02 N1 N2 N3 #M=1 Z=2
Z03 N1 N2 -N3 #M=1 Z=3
Z04 N1 -N2 -N3 #M=1 Z=4
END
FINISH
NPS 1
PROB 1
ANGLEN SPECTR
MDIS D 1
EDIS S
MMES 0.7071
MPRO 1
TYPE N
SPH 0 0 0 0.00001
SNAM SPECTR
REFER 1 0 0
NOBJ 0
FINISH
RGS 1 0
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY 0
ZFLU 0
END
FINISH
NTOT 200
ISTR 2
```

```

FINISH
NAMV EXAMPLE
MAXS 1000
NPRI 0
DTZM 1000
FINISH

```

В данном примере источником нейтронов служит сфера с радиусом 0,00001. Угол вылетающей частицы определяется с помощью дискретного распределения, состоящего из одного значения косинуса (MDIS D 1). Это значение срабатывает с вероятностью 1 (MPRO 1) и равно 0,7071 (MMES 0.7071).

Таким образом, как показано на рис. 3.2, все генерируемые источником  $S$  нейтроны вылетают с направлениями  $\vec{v}$ , разыгрываемыми на боковой поверхности кругового конуса с высотой, расположенной на луче, определяемом реперным вектором  $\vec{m}$ . Угол  $\alpha$  определяется заданным значением косинуса  $\mu$  как

$$\alpha = \arccos(\mu),$$

и в данном примере с хорошей точностью равен сорока пяти градусам. Отметим, также, что в этом примере направление реперного вектора совпадает с направлением оси  $OX$ .

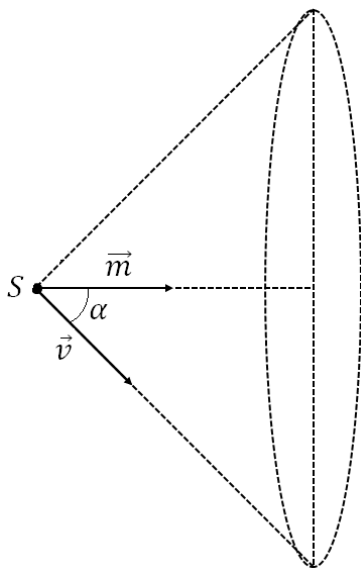


Рис. 3.2. Использование реперного вектора  $\vec{m}$  для определения направления полета  $\vec{v}$  частицы, рожденной источником  $S$



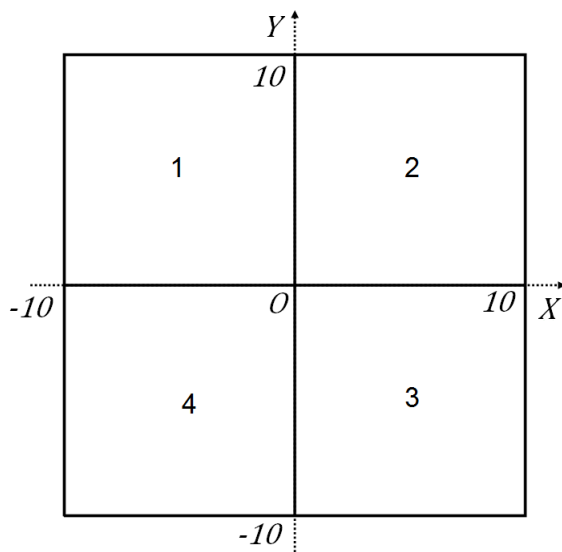


Рис. 3.3. Горизонтальное сечение модели с указанием координат и номеров регистрационных зон

Регистрация в примере осуществляется в кубе  $20 \times 20 \times 20$  см, разбитом на четыре равных части плоскостями  $OXZ$  и  $OYZ$ . На рис. 3.3 представлено горизонтальное сечение модели с указанием координат и номеров регистрационных зон.

В качестве граничного условия использовано черное поглощение, а значит нейтроны, вылетающие из системы, в нее уже не вернуться. Модель заполнена кислородом с очень низкой плотностью, то есть фактически моделируется вакуум, а значит генерируемые источником нейтроны практически не будут поглощаться или рассеиваться в системе.

Поскольку в задаче отсутствуют поглощение и рассеяние, регистрация потока осуществляется с помощью оценки по пробегам. В результате решения примера поток частиц будет зарегистрирован в зонах 2 и 3, по которым проходит боковая поверхность заданного конуса. В зоны 1 и 4 попадает незначительное количество нейтронов, все-таки испытавших рассеяние на кислороде.

В качестве упражнения можно выполнить расчеты с различными направлениями реперного вектора и различными значениями косинуса. Например, для направления всех нейтронов в регистрационную зону 2 под углом  $45^\circ$  относительно оси  $OX$  в плоскости  $OXZ$  нужно задать соответствующий реперный вектор (REPER 1 1 0), а также использовать значение косинуса, равное 1 (MMES 1), для того, чтобы угол  $\alpha$  был

равен нулю. В этом случае направление полета генерируемых частиц будет определяться только реперным вектором.

### Пример 3.8. Комбинация двух примитивных источников

Пример демонстрирует задание источника нейтронов, являющегося комбинацией двух примитивных источников с различными спектрами.

```
PIN 1 0
MATR 1
O 1.E-08
END
FINISH
HEAD 1 0 100
CONT B
SPH S 0 0 0 1
END
GZ1 S #M=1
END
FINISH
NPS 2
PROB 4 16
ANGLEN SPEC1
MDIS S
EDIS L 3
EMES 1.0 2.15 4.65 10.0
EPRO 1. 2. 1.
ANGLEN SPEC2
MDIS S
EDIS F CF52
TYPE N ;примитивный источник 1
SPH 0.5 0.5 0.5 0.00001
SNAM SPEC1
REPER 1 0 0
NOBJ 0
TYPE N ;примитивный источник 2
SPH 0.5 0.5 0.5 0.00001
SNAM SPEC2
REPER 1 0 0
NOBJ 0
FINISH
RGS 1 0
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY 1.0E+7 6.5E+6 4.0E+6 2.5E+6 1.4E+6
        8.0E+5 4.0E+5 2.0E+5 1.0E+5 4.65E+4
        2.15E+4 1.0E+4 4.65E+3 2.15E+3 1.0E+3
```

465.0	215.0	100.0	46.5	21.5
10.0	4.65	2.15	1.0	0.465
0.215	0.0			

```

LEAK
MFLU 0
END
NRET 3214 UP
FINISH
ISTR 1
FINISH
NAMV EXAMPLE
MAXS 1000
DTZML 50
FINISH

```

В примере заданы два примитивных источника с одинаковым сферическим контейнером, расположенным в одно и той же точке пространства (0,5;0,5;0,5).

Первый источник имеет интенсивность 4 н/с и использует спектр SPEC1, для которого задано изотропное распределение по углу и линейное распределение по энергии. Карта EDIS определяет, что для описания линейного (L) распределения по энергии будет задано 3 отрезка. Границы отрезков заданы далее картой EMES, а интенсивности этих отрезков определены в карте EPRO. Заданные интенсивности будут переформированы, таким образом, чтобы в сумме давать 1, и фактически являются вероятностями, с которыми при генерации нейтронов модуль источников будет выбирать тот или иной отрезок. После того, как отрезок выбран, конкретное значение энергии из этого отрезка выбирается по равномерному распределению.

Второй примитивный источник имеет интенсивность 16 н/с и использует спектр SPEC2, для которого задано изотропное распределение по углу, а для энергии используется спектр деления  $^{252}\text{Cf}$  из библиотеки BNAB/MCU (EDIS F CF52).

Необходимо отметить, что заданные картой PROB интенсивности примитивных источников будут автоматически перенормированы, таким образом, чтобы их сумма была равна 1, поэтому на самом деле они являются ненормированными вероятностями срабатывания каждого из примитивных источников. Иными словами, первый примитивный источник будет выбираться с вероятностью 0,2, а второй – с вероятностью 0,8.

Фактически это будет один источник нейтронов, с изотропным распределением по углу и спектром деления калифорния с добавкой в области энергий медленных нейтронов.

Отметим, что аналогичным образом можно задавать любые комбинированные источники, например, уран-плутониевый или нейтронно-фотонный.

### Пример 3.9. Плоский источник нейтронов из девяти частей

Пример демонстрирует использование нескольких примитивных источников для задания плоского источника нейтронов, состоящего из девяти частей разной интенсивности и излучающего нейтроны только в одном направлении.

```
PIN 1 0
MATR 1
O 1.E-08
FINISH
HEAD 1 0 100
CONT B B B B B B
RPP CNT -6 6 -6 6 -6 6
END
GZ1 (L1) CNT #M=1,Z=1
END
CELL A
RPP N1 0 4 0 4 0 4
END
GZ1 N1 #M=1,IZ=1
END
NET L1 -6 -6 -6 3 3 3
TLAYER 1
T01 A A A
T02 A A A
T03 A A A
TLAYER 2
T01 A A A
T02 A A A
T03 A A A
TLAYER 3
T01 A A A
T02 A A A
T03 A A A
P01LAY 1
P0101 11 12 13
P0102 14 15 16
P0103 17 18 19
P01LAY 2
P0101 21 22 23
P0102 24 25 26
P0103 27 28 29
P01LAY 3
```

```

P0101 31 32 33
P0102 34 35 36
P0103 37 38 39
END
FINISH
NPS 9
PROB 1 1 2 1 3 1 2 2 1
ANGLEN SPEC
MDIS D 1
EDIS D 5
MMES 1
MPRO 1
EMES 10E3 15E3 18E3 19.5E3 22E3
EPRO 1 1 4 2 2
TYPE N ;источник 1 в рег. зоне 12
RPP -0.1,0.1 -6,-2 -6,-2
REPER 1 0 0
SNAM SPEC
NOBJ 0
TYPE N ;источник 2 в рег. зоне 15
RPP -0.1,0.1 -2,2 -6,-2
REPER 1 0 0
SNAM SPEC
NOBJ 0
TYPE N ;источник 3 в рег. зоне 18
RPP -0.1,0.1 2,6 -6,-2
REPER 1 0 0
SNAM SPEC
NOBJ 0
TYPE N ;источник 4 в рег. зоне 22
RPP -0.1,0.1 -6,-2 -2,2
REPER 1 0 0
SNAM SPEC
NOBJ 0
TYPE N ;источник 5 в рег. зоне 25
RPP -0.1,0.1 -2,2 -2,2
REPER 1 0 0
SNAM SPEC
NOBJ 0
TYPE N ;источник 6 в рег. зоне 28
RPP -0.1,0.1 2,6 -2,2
REPER 1 0 0
SNAM SPEC
NOBJ 0
TYPE N ;источник 7 в рег. зоне 32
RPP -0.1,0.1 -6,-2 2,6
REPER 1 0 0
SNAM SPEC

```

```

NOBJ 0
TYPE N ;источник 8 в рег. зоне 35
RPP -0.1,0.1 -2,2 2,6
REPER 1 0 0
SNAM SPEC
NOBJ 0
TYPE N ;источник 9 в рег. зоне 38
RPP -0.1,0.1 2,6 2,6
REPER 1 0 0
SNAM SPEC
NOBJ 0
FINISH
RGS 1 0
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY 0.0
LEAK
ZFLU 0
END
FINISH
ISTR 1
FINISH
NAMV EXAMPLE
MAXS 1000
DTZML 50
FINISH

```

Плоский источник толщиной 0,2 см высотой 12 см и глубиной 12 см установлен в центре куба 12х12х12 см перпендикулярно оси  $OX$ . Источник состоит из 9 областей различной интенсивности и излучает нейтроны в направлении  $\vec{v}$  параллельно оси  $OX$  в ее положительном направлении (см. рис. 3.4 и 3.5).

Для задания примитивных источников, соответствующих каждой области, используются контейнеры RPP. Относительные интенсивности или, что то же самое, вероятности срабатывания этих примитивных источников определены картой PROB. Нумерация примитивных источников ведется в порядке их появления в исходных данных, таким образом наибольшей интенсивностью обладает примитивный источник номер 5, располагающийся в центре задаваемого сложного источника.

Все примитивные источники генерируют нейтроны в соответствии со спектром SPEC. Распределение по углу задано дискретным и состоит из одной точки (MDIS D 1). Обязательная в этом случае карта MMES задает значение косинуса  $\mu$  угла между вектором скорости частицы и реперным вектором равным 1.

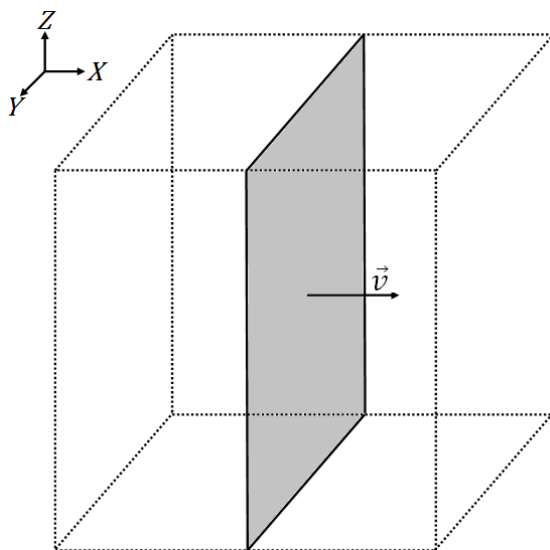


Рис. 3.4. Куб с плоским источником

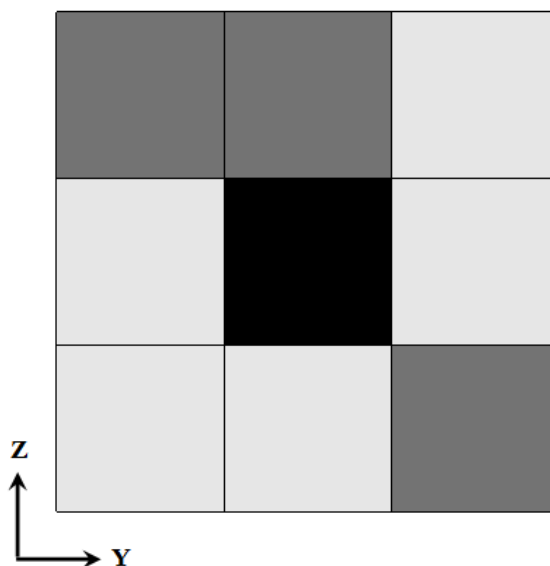


Рис. 3.5. Распределение интенсивности в плоском источнике

Таким образом, все генерируемые с использованием этого спектра частицы будут иметь направление, полностью определяемое реперным вектором соответствующего примитивного источника. В данном примере с помощью карты REPER для всех примитивных источников задан реперный вектор (1;0;0), что в итоге и обеспечивает требуемое направление генерируемых нейтронов.

Распределение энергий так же задано дискретным и состоит из 5 значений (EDIS D 5): 10; 15; 18; 19,5 и 22 кэВ. Значения определены с помощью карты EMES, а вероятности выбора того или иного значения энергии определены с помощью карты EPRO.

Таким образом, заданный в данном примере сложный источник генерирует нейтроны, вылетающие параллельно оси OX в ее положительном направлении и только пяти энергий, причем наиболее часто будут генерироваться нейтроны с энергией 18 кэВ. Максимум интенсивности приходится на центр сложного источника.

Для иллюстрации работы источника в кубе задано 27 регистрационных зон с размерами 4x4x4 см каждая.

При расчете данного примера, утечка в находящихся сзади от источника регистрационных зонах 11, 14, 17, 21, 24, 27, 31, 34 и 37 будет равна нулю. В регистрационных зонах, содержащих источник, а также в зонах перед ним результаты расчета будут полностью определяться интенсивностью соответствующего примитивного источника, поэтому максимальное значение рассчитываемой утечки будет получено в регистрационных зонах 25 и 26.

### Пример 3.10. Пример использования решетки источников

Пример по материальному составу и геометрии полностью совпадает с предыдущим. Геометрия и интенсивности квадратных областей на плоском источнике также совпадают с предыдущим примером, интенсивности представлены на рис. 3.5. Спектры изменены, в центральном квадрате источник имеет монохроматический спектр с энергией 0,5 кэВ, в восьми оставшихся квадратах – монохроматический спектр с энергией 2 кэВ. Источник задан с помощью решетки. Для того чтобы в файле с результатами расчета увидеть разницу в спектре источников, в данных модуля регистрации введено разбиение энергетического диапазона на две группы: выше и ниже 1 кэВ. Ниже приведены лишь данные модуля источника и модуля регистрации, остальные совпадают с предыдущим примером.

```
NPS      1
PROB     1
*        первый спектр E = 2 кэВ
ANGLEN   SP0
MDIS     D 1
```



```

EDIS D 1
MMES 1
MPRO 1
EMES 2000
EPRO 1
* второй спектр E = 0.5 кэВ
ANGLEN SP1
MDIS D 1
EDIS D 1
MMES 1
MPRO 1
EMES 500
EPRO 1
* первый тип элемента решетки, использует 1-й спектр
ELEM ELA N
RPP -0.1,0.1 -2,2 -2,2
REPER 1 0 0
SNAM SP0
NOBJ 0
* второй тип элемента решетки, использует 2-й спектр
ELEM ELB N
RPP -0.1,0.1 -2,2 -2,2
REPER 1 0 0
SNAM SP1
NOBJ 0
*
LATT S2AR
BOUN -1,1 -1,1
ROOT 0,0,0 0,4,0 0,0,4
E-01 ELA ELA ELA
E000 ELA ELB ELA
E001 ELA ELA ELA
I-01 1 1 2
I000 1 3 1
I001 2 2 1
F-01 1 1 2
F000 1 3 1
F001 2 2 1
PRISOU
FINISH of source
RGS 1 0
BAL
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY 1000, 0.0
ZFLU 0
END
FINISH

```

В примере существует лишь один примитивный источник, поэтому предложение NPS имеет параметром 1. Однако, этот источник несет решетку. Она состоит из двух типов элементов, которые различаются только спектром нейтронов. Так как ссылка на спектр в элементе может быть лишь одна, то необходимо иметь описания двух типов: ELA и ELB. Соответственно, есть два описание спектра, и каждый тип элемента ссылается на свой спектр.

В конце данных источника находится описание собственно решетки. Ее тип есть S2AR – единственный тип решетки источников в данной версии программы. Для нее элементы образуют двумерный плоский массив. Второе предложение содержит диапазоны индексов, в рассматриваемом примере  $-1 \leq i \leq 1$ ,  $-1 \leq j \leq 1$ . Третье предложение содержит сначала корневой вектор  $\vec{A}$ , потом сдвиг по  $i-\vec{B}$ , затем сдвиг по  $j-\vec{C}$ . Так что  $(i,j)$  элемент попадает в позицию  $\vec{A}+i\vec{B}+j\vec{C}$ .

Наш источник лежит в плоскости  $OYZ$ , сдвиги есть  $(0,1,0)$  и  $(0,0,1)$ . Центр пластинки-источника лежит в начале координат, так что корневой вектор нулевой. Этому соответствуют диапазоны индексов и то, что центры типов элементов в описаниях ELA и ELB лежат в началах координат.

Далее расположена картограмма типов элементов, ее строки соответствуют определенному в имени предложения второму индексу. Поэтому центральный квадрат с индексами  $(0,0)$  находится во втором предложении посередине. Там стоит имя второго элемента, во всех остальных позициях – имя первого.

Далее следуют так же организованные картограммы интенсивностей элементов и вероятности их срабатывания. Установлен умалчиваемый режим NORM ON, и не только вероятности, но и интенсивности нормируются на единицу. Реальному источнику соответствуют интенсивности, а вероятности – это параметры моделирования. Частица вырабатывается с весом

$$W = \frac{\langle \text{интенсивность} \rangle}{\langle \text{вероятность} \rangle},$$

что и дает правильную оценку в результатах. В простых вариантах лучше, чтобы все веса были единичными, для чего в картограмму вероятностей ставят те же числа, что и в картограмму интенсивностей, это и есть частоты появления частиц в реальном источнике.

Последняя карта PRISOU вызывает выдачу в листинг содержания внутренних массивов источников. Можно по ним убедиться, что веса частиц действительно будут единичными.

## 4. Регистрация

### Пример 4.1. Нормировка на мощность

Все функционалы, рассчитываемые МСУ, приводятся в нормировке «на одну частицу источника» для всего объема соответствующей регистрационной области.

Например, оценка потока по пробегам, приводимая в файле с результатами, получается как сумма длин пробегов частиц в объеме, деленная на общее количество промоделированных частиц и имеет размерность см. Для перевода ее к общепринятой размерности н/(см<sup>2</sup>·с) необходимо разделить полученное значение на объем соответствующей регистрационной области и умножить на мощность источника  $N$ , выраженную в н/с.

Необходимо отметить, что с помощью метода Монте-Карло нельзя определить мощность источника. Реальное число частиц в установке в секунду для нормировки «на мощность» необходимо определять самостоятельно.

В качестве иллюстрации сказанного приведем следующую формулу:

$$N = v \frac{P}{E_f q},$$

где  $N$  – мощность, выраженная в н/с;  $v$  – среднее число нейтронов деления, н;  $P$  – мощность установки, Вт или, что тоже самое, Дж/с;  $E_f$  – энергия, приходящаяся на один акт деления, эВ;  $q$  – ‘элементарный заряд, Кл, необходимый для перевода эВ в Дж.

Дробь в правой части данной формулы дает нам количество делений в секунду, а умножение его на среднее число нейтронов деления – количество нейтронов в секунду.

Так, если для реактора БН-600 тепловая мощность составляет 1470 МВт, то мощность, выраженная в н/с, будет равна

$$N \approx 2,5 \cdot \frac{1470 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} = 1,15 \cdot 10^{20} \text{ н/с.}$$

Предположим, что мы выполнили расчет модели этого реактора в 60 градусном секторе симметрии (см. главу 5). В этом случае моделируется только 1/6 часть активной зоны реактора, и, следовательно, при нормировке необходимо использовать значение мощности, деленное на шесть. Кроме того, в модели, использованной в главе 5, не заданы верхний и нижний отражатели из делящегося материала, что также должно быть учтено при определении мощности моделируемого фрагмента. В данном примере мы этого делать не будем, что приведет к некоторому завышению полученных значений.

В результате расчета для одной из топливныхборок (регистрационный объект 18) со статистической погрешностью 0,5 % получено значение

скорости реакции деления (Reaction 18) равное 5,66457E-03 делений в объеме сборки в нормировке на один нейтрон источника. В пересчете на мощность реактора это составит

$$N_{18} = 5,66457 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1,15 \cdot 10^{20}}{6} = 1,09 \cdot 10^{17} \text{ дел./сек}$$

или

$$N_{18} = 1,09 \cdot 10^{17} \cdot 200 \cdot 10^6 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = 3,48 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Обратите внимание, что в наших вычислениях мы приняли среднее число нейтронов деления равным 2,5; а среднюю энергию, приходящуюся на один акт деления, равной 200 МэВ. Это вносит погрешность в определение значения мощности топливной сборки.

Другой способ определения энерговыделения основан на том, что при регистрации скорости реакции деления во всех регистрационных объектах модели мы получаем относительное распределение скорости этой реакции по пространству нашей модели. Если разделить полученное для каждого регистрационного объекта  $i$  значение скорости реакции деления  $R_i^{18}$  на сумму по всем регистрационным объектам

$$w_i = R_i^{18} / \sum_i R_i^{18},$$

то мы получим долю энерговыделения, приходящуюся на данный регистрационный объект, или, в нашем случае, топливную сборку. Для тепловыделяющей сборки, соответствующей регистрационному объекту 18, эта доля составляет 0,0154. Тогда мощность этой сборки составит

$$N_{18} = \frac{1470}{6} \cdot w_{18} = 3,76 \text{ МВт.}$$

При этом используется предположение о том, что число нейтронов деления и средняя энергия, приходящаяся на один акт деления, одинакова для всех регистрационных объектов, что является приближением.

#### Пример 4.2. Дозиметрические реакции

Обычные реакции, регистрация которых осуществляется с помощью карт RCT, в MCU существует возможность с помощью карты DOS регистрировать так называемые дозиметрические реакции. В отличие от обычных реакций, дозиметрические реакции не участвуют в процессе моделирования частиц. При этом они вычисляются так же, как и обычные реакции, однако, без учета ядерной плотности изучаемого нуклида. Поэтому полученные для дозиметрических реакций значения необходимо умножить на ядерную концентрацию соответствующего нуклида при этом без учета множителя  $10^{24}$ .

Кроме того, использование дозиметрической реакции в объеме, в котором в модели изучаемый нуклид отсутствует, можно только в том случае, если концентрация этого нуклида настолько мала, что практически не влияет на траектории частиц в этом объеме. Исторически эти реакции использовались для расчетов активации тонких фольг из различных материалов.

Список всех доступных дозиметрических реакций можно посмотреть в библиотеке DOSIM. В разных программах MCU это могут быть разные наборы файлов. Все реакции записаны в файлах с расширением ACT. Карта DOS в исходных данных определяет имя одного из этих файлов следующим образом. Для определения одного файла всегда используется два слова. Первое соответствует символам с первого по четвертый имени файла, второе – с пятого по восьмой. При этом буквы Q в имени файла игнорируются.

Проще всего это пояснить на примере. Пусть мы хотим использовать файл для реакции 16 на углероде C12QR16.ACT. Тогда первое слово будет C12, а второе – R16. Первая буква во втором слове обычно обозначает источник данных, расшифровка приводится либо во второй строке самого файла, либо в специальном файле dosim.

В качестве иллюстрации можно рассмотреть следующий пример.

```
PIN 1 0
MATR 1
U235 0.2674E-02 / U236 0.1218E-03 / U238 0.1527E-01
PU39 0.3184E-03 / PU40 0.1002E-04 / O 0.3793E-01
MATR 2
FE 0.6097E-01 / CR 0.1643E-01
NI 0.1322E-01 / MO 0.1201E-02
MATR 3
NA 0.2074E-01
FINISH
HEAD 1 0 0
CONT T T T T T T T T
EQU PITCH=0.795
EQU RCLAD=0.345
EQU RFUEL=0.305
HEX N1 0,0,0 PITCH 0 1
RCZ N2 0,0,0 1 RCLAD
RCZ N3 0,0,0 1 RFUEL
END
Z01 1 -2 :3 ;Coolant
Z02 2 -3 :2 ;Cladding
Z03 3 :1 ;Fuel
END
FINISH
```

```

SPNT 0 0 0.5
FINISH
RGS 1 0
KEFF
PTYPE 1
TTYPE 1
ENERGY 0.
RCT 18
MRCT 0
DOS U235 A18
MDOS 0
END
FINISH
NTOT 200
NBAT 3
FINISH
NAMV BN600cell
MAXS 500
NPRI 0
DTZM 10
FINISH

```

В данном примере задана ячейка быстрого реактора [4], состоящая из трех областей: топлива, оболочки и теплоносителя. Для всех этих областей (MRCT 0 и MDOS 0) заказана регистрация как обычной реакции деления (RCT 18) для всех нуклидов, так и дозиметрической (DOS U235 A18) только для  $^{235}\text{U}$ .

Ниже приводится фрагмент файла финальной обработки с расширением FIN. Все погрешности в нем приводятся в процентах.

```

NUCLIDE:      U235, REACTION:      18, ENERGY:  0.00000E+00
      Material      Mean      StdDev
      1  4.06503E-01  1.77883E-01
. . .
DOSIMETRY. REACTION:      U235 A18 , ENERGY:  0.00000E+00
      Material      Mean      StdDev
      1  1.51144E+02  1.78711E-01
      2  4.23023E+01  1.80729E-01
      3  8.98488E+01  1.81114E-01

```

Таким образом, мы сможем сравнить результаты, полученные по обеим реакциям для  $^{235}\text{U}$  в топливной области. Для этого ответ, полученный для дозиметрической реакции необходимо умножить на ядерную плотность  $^{235}\text{U}$  в первом материале без учета множителя  $10^{24}$ :

$$R_{18}^{DOS} = 151,144 \cdot 0,002674 = 0,4042;$$

$$\Delta = \frac{R_{18}^{DOS} - R_{18}}{R_{18}} = \frac{0,4042 - 0,4056}{0,4056} = -0,0057.$$

Таким образом, при статистической погрешности 0,2 % расхождение расчетов по двум разным библиотекам сечений составило 0,6 %. Это с одной стороны демонстрирует, что использование разных источников ядерных данных влияет на результат, а с другой стороны показывает, что при обращении с результатом расчета дозиметрической реакции мы все сделали правильно.

Выполнить такое сравнение стало возможным только благодаря тому, что в топливной области модели присутствует  $^{235}\text{U}$ . На практике, дозиметрические реакции используются для расчета реакций, которые отсутствуют в основных библиотеках, либо для расчета в областях, в которых требуемый нуклид отсутствует.

В данном примере, несмотря на отсутствие  $^{235}\text{U}$  в оболочке или теплоносителе, программа рассчитала скорость реакции деления  $^{235}\text{U}$ , как если бы он там был. Это в свою очередь иллюстрирует необходимость малости концентрации нуклида при таком использовании дозиметрических реакций. Если бы концентрация  $^{235}\text{U}$  в оболочке была значительна, например, такая же, как в топливе, то очевидно характеристики потока в этой области совершенно не соответствовали бы рассчитываемым в нашей модели, и мы получили бы другие результаты. Это легко проверить, повторив расчет, добавив во второй материал  $^{235}\text{U}$  с концентрацией как в первом.

```
MATR 1
U235 0.2674E-02 / U236 0.1218E-03 / U238 0.1527E-01
PU39 0.3184E-03 / PU40 0.1002E-04 / O 0.3793E-01
MATR 2
U235 0.2674E-02
FE 0.6097E-01 / CR 0.1643E-01
NI 0.1322E-01 / MO 0.1201E-02
```

При этом эффективный коэффициент размножения нейтронов изменится с  $1,303 \pm 0,002$  на  $1,406 \pm 0,002$ ; а скорость реакции деления на  $^{235}\text{U}$  составит

```
NUCLIDE:      U235, REACTION:      18, ENERGY:  0.00000E+00
              Material              Mean              StdDev
              1  3.55390E-01        1.69267E-01
              2  9.94546E-02        1.70330E-01
              . . .
DOSIMETRY. REACTION:      U235 A18 , ENERGY:  0.00000E+00
              Material              Mean              StdDev
              1  1.32123E+02        1.70756E-01
              2  3.69662E+01        1.71217E-01
```

Таким образом, при использовании дозиметрических реакций следует проявлять определенную осторожность.

## 5. Расчетная модель реактора БН-600

### 5.1. Общее описание модели

Основываясь на данных, предлагаемых в работе по анализу гибридной активной зоны БН-600 [4], создадим расчетную модель.

Картограмма загрузки активной зоны приведена на рис. 5.1. Загрузка состоит из внутренней зоны малого обогащения (LEZ1), внешней зоны малого обогащения (LEZ1), зоны среднего обогащения (MEZ), зоны смешанного уран-плутониевого оксидного топлива (MOX), зоны высокого обогащения (HEZ). Используются управляющие стержни (SHR) и стержни аварийной защиты (SCR). Активная зона окружена рядами стальной защиты (SSA1 и SSA2).

Поскольку нашей основной целью является демонстрация возможностей задания исходных данных для программы MCU, модель будет иметь ряд упрощений, а сами исходные данные иногда будут несколько избыточны.

Во-первых, мы будем моделировать не всю высоту активной зоны, а только ее топливную часть. Согласно описанию (см. рис. 3.2 в [4]) толщина топливного слоя составляет 104,4 см. Кроме того, будем моделировать только ту часть компенсирующих стержней, которая содержит поглотитель. При заполнении активной зоны подробно зададим геометрию тепло выделяющих сборок, с некоторыми приближениями зададим управляющие стержни, а сборки стальной защиты зададим совсем приближенно с использованием гомогенного состава.

В соответствии с описанием данного расчетного теста принимается, что поток на границах расчетной модели равен нулю, стержни аварийной защиты наполовину выведены из активной зоны, которая для гомогенной модели обладает поворотной симметрией в 60-градусов.

На рис. 5.2 приведено вертикальное сечение модели БН-600 плоскостью OXZ при  $y=1$ , а на рис. 5.3 горизонтальное сечение модели БН-600 плоскостью OXY при  $z=53$ .

Обратим внимание на расположение управляющих стержней, отмеченных на рисунках наклонными линиями штриховки, отсутствие в активной зоне аварийных стержней, потвэльное задание топливных кассет и гомогенное задание стальной защиты.

При этом нужно отметить, что в хоть и приближенной, но гетерогенной модели, которую мы задаем, и которая в [4] называется «Hex-Z heterogeneous and burnup benchmark (Phase 3)», отсутствует 60-градусная симметрия. Отсутствует она потому, что ей не обладают управляющие



стержни, которые мы не гомогенизировали (см. рис. 5.4). Тем не менее, в нашей модели мы такой симметрией воспользуемся исключительно для демонстрации способа ее задания.

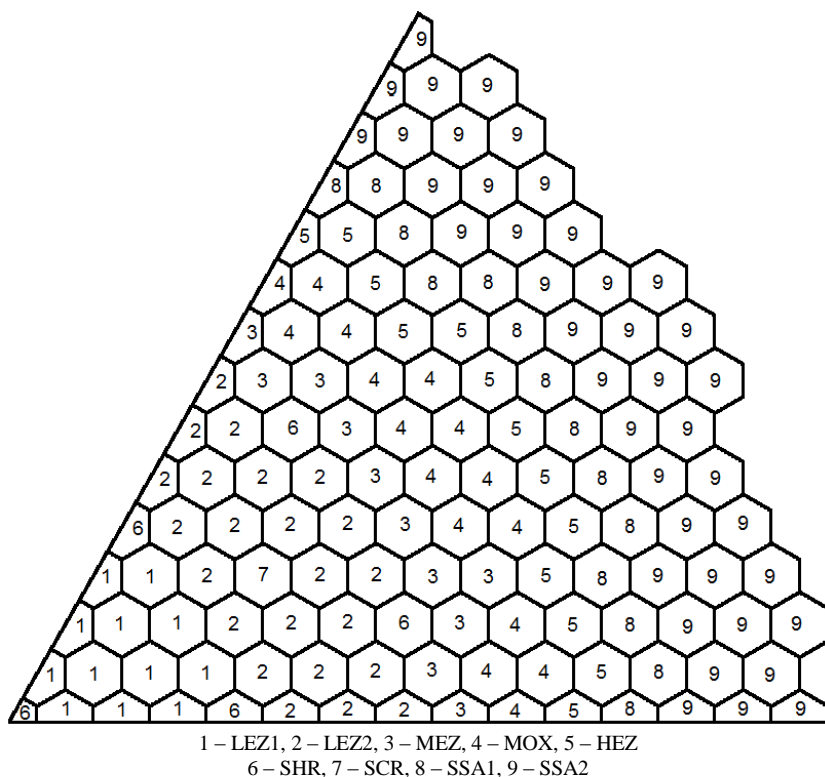


Рис. 5.1. Картограмма модели БН-600 с указанием типов сборок

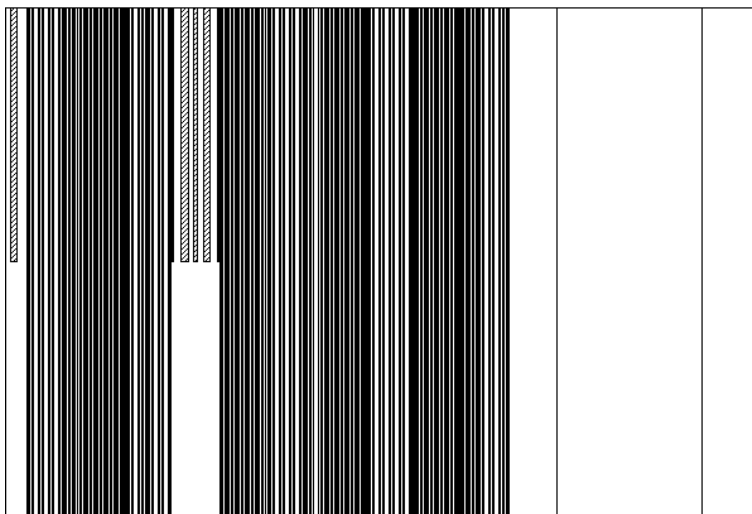


Рис. 5.2. Вертикальное сечение модели БН-600

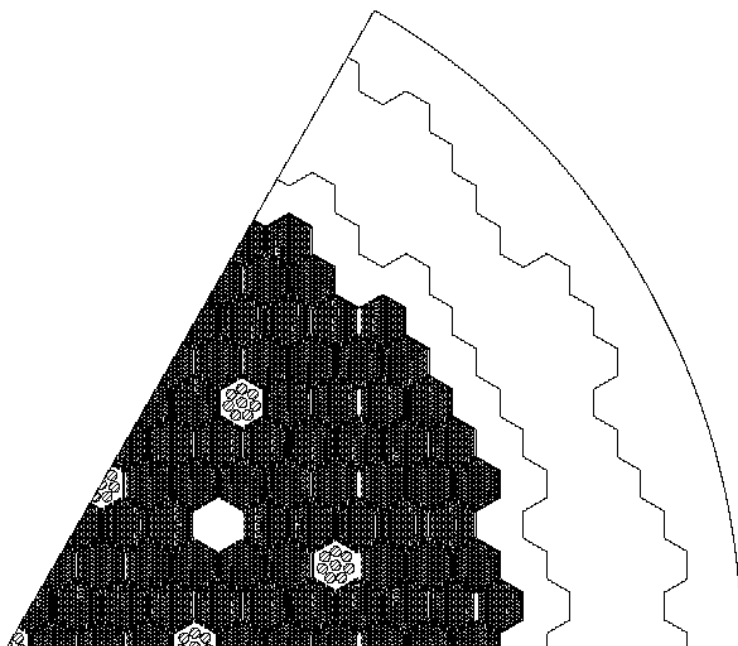


Рис. 5.3. Горизонтальное сечение модели БН-600

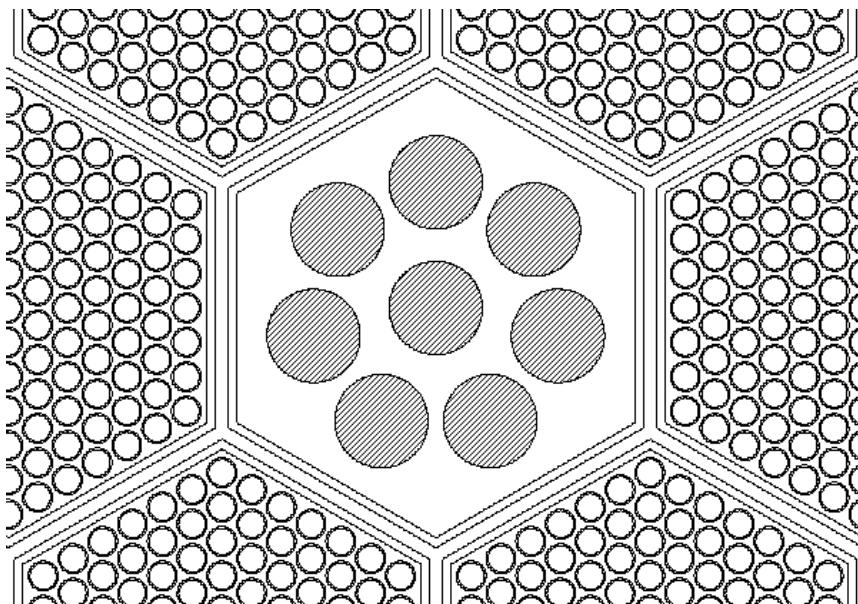


Рис. 5.4. Горизонтальное сечение управляющего стержня

## 5.2. Текст исходных данных для программы MCU

Ниже приводится текст исходных данных для расчетной модели реактора БН-600, заданной с учетом указанных приближений. Для определенности назовем этот файл bn600.

```
PIN 1 1
MATR 1, T=1500 ; (1) FSA LEZ1
U235 0.2674E-02 / U236 0.1218E-03 / U238 0.1527E-01
PU39 0.3184E-03 / PU40 0.1002E-04 / O 0.3793E-01
MATR 2, T=1500 ; (2) FSA LEZ2
U235 0.2699E-02 / U236 0.1165E-03 / U238 0.1530E-01
PU39 0.3040E-03 / PU40 0.8947E-05 / O 0.3793E-01
MATR 3, T=1500 ; (3) FSA MEZ
U235 0.3397E-02 / U236 0.1284E-03 / U238 0.1459E-01
PU39 0.2599E-03 / PU40 0.6584E-05 / O 0.3793E-01
MATR 4, T=1500 ; (4) FSA MOX
U235 0.3857E-04 / U236 0.1328E-05 / U238 0.1459E-01
PU39 0.3441E-02 / PU40 0.3072E-03 / O 0.3781E-01
MATR 5, T=1500 ; (5) FSA HEZ
U235 0.4420E-02 / U236 0.1180E-03 / U238 0.1376E-01
PU39 0.1736E-03 / PU40 0.3136E-05 / O 0.3793E-01
MATR 6, T=600 ; (27) FSA Clading
FE 0.6097E-01 / CR 0.1643E-01
```

```

NI 0.1322E-01 / MO 0.1201E-02
MATR 7, T=600 ; (26) FSA & SHR Wrapper
FE 0.7064E-01 / CR 0.1096E-01
NI 0.1580E-03 / MO 0.9238E-03
MATR 8, T=600 ; (31) SHR Absorber
B10 0.1481E-01 / B11 0.5924E-01 / C 0.1852E-01
MATR 9, T=600 ; (28) Coolant
NA 0.2074E-01
MATR 10
* Void
O 1.E-8
MATR 11, T=600 ; (31, Table3.2) SSA1
NA 0.5638E-02 / FE 0.5252E-01 / CR 0.7636E-02
NI 0.7447E-03 / MO 0.3589E-03
MATR 12, T=600 ; (32, Table3.2) SSA2
NA 0.5875E-02 / FE 0.5179E-01 / CR 0.7530E-02
NI 0.7332E-03 / MO 0.3550E-03
END
EGRC 20.0E+06 4.65 0.
DELN 1
FINISH MAT
HEAD 1 0 2000
CONT B B B
EQU ZSHR=52.2
EQU HALL=104.4
RCZ N1 0,0,0 HALL 155
RCZ N2 0,0,0 HALL 115
* Two planes of rotation
PLY CNT2(C2) 0
PLG CNT3(C3) sin(60) -0.5 0 0
END
Z01 N1 -N2 CNT2 CNT3 #M=10
Z02 N2 CNT2 CNT3 #M=9
REFM N1 -CNT2 /R60
REFP CNT2 -CNT3 /R300
END
EQU PITCH=0.795
EQU RCLAD=0.345
EQU RFUEL=0.305
CELL F1 ;LEZ1
SHEX N1 PITCH HALL 90
RCZ N2 0,0,0 HALL RCLAD
RCZ N3 0,0,0 HALL RFUEL
END
Z01 1 -2 /2:9/-1 ;Coolant
Z02 2 -3 /3:6/-1 ;Cladding
Z03 3 /4:1/-1 ;Fuel
END

```

```

CELL F2 ;LEZ2
SHEX N1 PITCH HALL 90
RCZ  N2 0,0,0 HALL RCLAD
RCZ  N3 0,0,0 HALL RFUEL
END
Z01 1 -2 /-1:9/-1
Z02 2 -3 /-2:6/-1
Z03   3 /-3:2/-1
END
CELL F3 ;MEZ
SHEX N1 PITCH HALL 90
RCZ  N2 0,0,0 HALL RCLAD
RCZ  N3 0,0,0 HALL RFUEL
END
Z01 N1 -N2 #M=9 Z=1 IO=1
Z02 N2 -N3 #M=6 Z=1 IO=1
Z03   N3 #M=3 Z=1 IO=1
END
CELL F4 ;MOX
SHEX A PITCH HALL 90
RCZ  B 0,0,0 HALL RCLAD
RCZ  C 0,0,0 HALL RFUEL
END
Z01 A -B #M=9 iz=1 IO=1
Z02 B -C #M=6 iz=1 IO=1
Z03   C #M=4 iz=1 IO=1
END
CELL F5 ;HEZ
SHEX * PITCH HALL 90
RCZ  * 0,0,0 HALL RCLAD
RCZ  * 0,0,0 HALL RFUEL
END
Z01   3 #M=5 z=1 IO=1
Z02 2 -3 #M=6 z=1 IO=1
Z03 1 -2 #M=9 z=1 IO=1
END
LCELL A ;LEZ1
HEX * 0,0,0 9.902 0 HALL
HEX * 0,0,0 9.6   0 HALL
HEX * 0,0,0 9.2   0 HALL
END
Z01      N1 -N2 #z=7 m=9 io=1
Z02      N2 -N3 #z=8 m=7 io=1
Z03 (FA) N3      #z=7 m=9 io=1
END
NET FA 6*PITCH*COS(30),-6*PITCH*SIN(30),0 13,13
T01 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 0 0 0 0 0 0
T02 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 0 0 0 0 0

```

```

T03 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 0 0 0 0
T04 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 0 0 0
T05 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 0 0
T06 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 0
T07 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1
T08 0 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1
T09 0 0 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1
T10 0 0 0 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1
T11 0 0 0 0 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1
T12 0 0 0 0 0 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1
T13 0 0 0 0 0 0 F1 F1 F1 F1 F1 F1 F1
O01ALL -1
END
ENDL
LCELL B ;LEZ2
HEX N1 0,0,0 9.902 0 HALL
HEX N2 0,0,0 9.6 0 HALL
HEX N3 0,0,0 9.2 0 HALL
END
Z01 N1 -N2 #z=7 m=9 io=1
Z02 N2 -N3 #z=8 m=7 io=1
Z03 (FA) N3 #z=7 m=9 io=1
END
NET FA 6*PITCH*COS(30),-6*PITCH*SIN(30),0 13,13
T01 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 0 0 0 0 0 0
T02 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 0 0 0 0 0
T03 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 0 0 0 0
T04 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 0 0 0
T05 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 0 0
T06 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 0
T07 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2
T08 0 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2
T09 0 0 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2
T10 0 0 0 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2
T11 0 0 0 0 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2
T12 0 0 0 0 0 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2
T13 0 0 0 0 0 0 F2 F2 F2 F2 F2 F2 F2
P01ALL 5
P02ALL 6
P03ALL 7
O01ALL -1
END
ENDL
LCELL C ;MEZ
HEX N1 0,0,0 9.902 0 HALL
HEX N2 0,0,0 9.6 0 HALL
HEX N3 0,0,0 9.2 0 HALL
END

```

```

Z01      N1 -N2 #z=7 m=9 io=1
Z02      N2 -N3 #z=8 m=7 io=1
Z03 (FA) N3      #z=7 m=9 io=1
END
NET FA 6*PITCH*COS(30),-6*PITCH*SIN(30),0 13,13
T01 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 0 0 0 0 0 0
T02 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 0 0 0 0 0
T03 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 0 0 0 0
T04 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 0 0 0
T05 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 0 0
T06 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 0
T07 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3
T08 0 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3
T09 0 0 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3
T10 0 0 0 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3
T11 0 0 0 0 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3
T12 0 0 0 0 0 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3
T13 0 0 0 0 0 0 F3 F3 F3 F3 F3 F3 F3
O01ALL -1
END
ENDL
LCELL D ;MOX
HEX      N1 0,0,0 9.902 0 HALL
HEX      N2 0,0,0 9.6 0 HALL
HEX      N3 0,0,0 9.2 0 HALL
END
Z01      N1 -N2 #z=7 m=9 io=1
Z02      N2 -N3 #z=8 m=7 io=1
Z03 (FA) N3      #z=7 m=9 io=1
END
NET FA 6*PITCH*COS(30),-6*PITCH*SIN(30),0 13,13
T01 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 0 0 0 0 0 0
T02 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 0 0 0 0 0
T03 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 0 0 0 0
T04 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 0 0 0
T05 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 0 0
T06 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 0
T07 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4
T08 0 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4
T09 0 0 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4
T10 0 0 0 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4
T11 0 0 0 0 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4
T12 0 0 0 0 0 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4
T13 0 0 0 0 0 0 F4 F4 F4 F4 F4 F4 F4
P0101    -1    -2    -3    -4    -5    -6    -7
          0     0     0     0     0     0
P0102    -8    -9   -10   -11   -12   -13   -14
          -15    0     0     0     0     0

```

```

P0103  -16  -17  -18  -19  -20  -21  -22
        -23  -24   0   0   0   0
P0104  -25  -26  -27  -28  -29  -30  -31
        -32  -33  -34   0   0   0
P0105  -35  -36  -37  -38  -39  -40  -41
        -42  -43  -44  -45   0   0
P0106  -46  -47  -48  -49  -50  -51  -52
        -53  -54  -55  -56  -57   0
P0107  -58  -59  -60  -61  -62  -63  -64
        -65  -66  -67  -68  -69  -70
P0108   0  -71  -72  -73  -74  -75  -76
        -77  -78  -79  -80  -81  -82
P0109   0   0  -83  -84  -85  -86  -87
        -88  -89  -90  -91  -92  -93
P0110   0   0   0   0  -94  -95  -96  -97
        -98  -99 -100 -101 -102 -103
P0111   0   0   0   0 -104 -105 -106
        -107 -108 -109 -110 -111 -112
P0112   0   0   0   0   0 -113 -114
        -115 -116 -117 -118 -119 -120
P0113   0   0   0   0   0   0 -121
        -122 -123 -124 -125 -126 -127
O01ALL -1

```

END

ENDL

LCELL E ;HEZ

HEX N3 0,0,0 9.902 0 HALL

HEX N2 0,0,0 9.6 0 HALL

HEX N1 0,0,0 9.2 0 HALL

END

Z01 N3 -N2 #z=7 m=9 io=1

Z02 N2 -N1 #z=8 m=7 io=1

Z03 (FA) N1 #z=7 m=9 io=1

END

NET FA 6\*PITCH\*COS(30),-6\*PITCH\*SIN(30),0 13,13

```

T01 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 0 0 0 0 0 0
T02 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 0 0 0 0 0
T03 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 0 0 0 0
T04 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 0 0 0
T05 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 0 0
T06 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 0
T07 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5
T08 0 0 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5
T09 0 0 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5
T10 0 0 0 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5
T11 0 0 0 0 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5
T12 0 0 0 0 0 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5
T13 0 0 0 0 0 0 F5 F5 F5 F5 F5 F5 F5

```



```

O01ALL -1
END
ENDL
LCELL      X
HEX W1 0 0 ZSHR 9.902 0 HALL
HEX W2 0 0 ZSHR 9.6 0 HALL
HEX W3 0 0 ZSHR 9.2 0 HALL
RCZ A0 0 0 ZSHR HALL 1.08
EQU R=2.9
EQU B=360/7
RCZ A1 R*COS(90-0*B) R*SIN(90-0*B) ZSHR HALL 1.08
RCZ A2 R*COS(90-1*B) R*SIN(90-1*B) ZSHR HALL 1.08
RCZ A3 R*COS(90-2*B) R*SIN(90-2*B) ZSHR HALL 1.08
RCZ A4 R*COS(90-3*B) R*SIN(90-3*B) ZSHR HALL 1.08
RCZ A5 R*COS(90-4*B) R*SIN(90-4*B) ZSHR HALL 1.08
RCZ A6 R*COS(90-5*B) R*SIN(90-5*B) ZSHR HALL 1.08
RCZ A7 R*COS(90-6*B) R*SIN(90-6*B) ZSHR HALL 1.08
END
Z00 W1 -W2 /1:9/-1
Z00 W2 -W3 /1:7/-1
Z00 W3 -A0 -A1 -A2 -A3 -A4 -A5 -A6 -A7 /1:9/-1
*Z00 A0 U A1 U A2 U A3 U A4 U A5 U A6 U A7 /1:8/-1
Z00 A0 #M=8 IZ=1 IO=1
Z00 A1 #M=8 IZ=2 IO=1
Z00 A2 #M=8 IZ=3 IO=1
Z00 A3 #M=8 IZ=4 IO=1
Z00 A4 #M=8 IZ=5 IO=1
Z00 A5 #M=8 IZ=6 IO=1
Z00 A6 #M=8 IZ=7 IO=1
Z00 A7 #M=8 IZ=8 IO=1
END
ENDL
LCELL      S
HEX W1 0 0 0 9.902 0 HALL
END
Z00 W1 /1:11/-1
END
ENDL
LCELL      S
HEX W1 0 0 0 9.902 0 HALL
END
Z00 W1 /1:12/-1
END
ENDL
LATT G2MP Z01 Z02
LISTEL A(C2,C3) B(C2,C3) C(C2,C3) D(C2,C3)
      E(C2,C3) X(C2,C3) s(C2,C3) S(C2,C3)
PARM 15,15

```

```

0.          0.          0.
9.902       0.          0.
9.902*COS(60) 9.902*SIN(60) 0.
L15          S 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
L14          S S S 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
L13          S S S S 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
L12          s s s s s 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
L11          E E s s s s s 0 0 0 0 0 0 0 0 0
L10          D D E s s s s s s 0 0 0 0 0 0 0 0
L09          C D D E E s s s s s 0 0 0 0 0 0 0
L08          B C C D D E s s s s s 0 0 0 0 0 0
L07          B B X C D D E s s s s s 0 0 0 0 0
L06          B B B B C D D E s s s s s 0 0 0 0
L05          X B B B B C D D E s s s s s 0 0 0
L04          A A B 0 B B C C E s s s s s 0 0
L03          A A A B B B X C D E s s s s s 0
L02          A A A A B B B C D D E s s s s 0
L01 X A A A X B B B C D E s s s s s
FINISH
NPS 1
PROB 1
ANGLEN SPEC1
MDIS S
EDIS S
TYPE N
RCZ 0,0,0 HALL 110
SNAM SPEC1
REPER 1 0 0
NOBJ 0
FINISH
RGS 1 0
KEFF
PTYPE 1
TTYE 1
MFLU 0
RCT 3,18,918
ZRCT 0
ORCT 0
ENERGY 0
ENERGY 0 1 10 100 1000 1E4 1E5 1E6
END
PTYPE 1
MFLU 1 2 3 4-8 9 10 - 12
ENERGY 0
END
FINISH
NTOT 1000
NBAT 5

```

FINISH  
NAMV BN600  
MAXS 1000  
DTZM 10  
BETA  
FINISH

### 5.3. Исходные данные для физического модуля

Первым разделом в исходных данных всегда являются данные для физического модуля. Они начинаются с карты PIN, которая в нашем случае определяет наличие дополнительной печати в файл bn600.LST, который содержит информацию о процессе ввода.

Каждый материал начинается с карты MATR, содержащей его номер. Все материалы следуют друг за другом по порядку, и пропуск номеров не допускается. Существует возможность обойти это требование, используя понятие групп, однако во внутреннем представлении нумерация по порядку следования материалов в исходных данных сохранится. При изучении модели с помощью графического интерфейса MCU Office на экран будут выводиться номера материалов в соответствии именно с этой внутренней нумерацией.

Для каждого материала, кроме десятого, определена температура. Для десятого материала будет использовано принятое по умолчанию значение, равное 300 К. При выполнении расчетов важно понимать, как значение температуры будет обработано программой. Этот вопрос будет рассмотрен ниже при обсуждении недостатков выбранного подхода к моделированию физики взаимодействия нейтронов с материалом.

Обратите внимание на два способа задания комментариев: после точки с запятой и с помощью символа \* в первой позиции строки (см. описание материала 10). При использовании второго способа рекомендуется размещать комментарий непосредственно после карты MATR, чтобы его было видно при получении расширенной информации о точке на рисунке MCU Office с помощью правой кнопки мыши.

Обычно материалы задают, записывая в столбик имя нуклида и его концентрацию. В нашем примере для экономии места мы использовали специальный разделитель '/' для задания данных по нескольким нуклидам в одной строке. Поскольку мы не меняем никаких параметров, определенных для нуклидов по умолчанию в файле банка данных DEFAULT.PHY, никакой другой информации кроме ядерной плотности нуклидов мы не вводим.

Поскольку после одного материала сразу идет описание следующего, завершающую карту END можно не вводить. Она появляется только в конце последнего вводимого материала и только потому, что мы воспользуемся дополнительными картами, определяющими работу физического

модуля. Если бы между картами END и FINISH не было других карт, то карту END тоже можно было бы не вводить.

Первой дополнительной картой является EGRC, с ее помощью мы отключили подмодуль FARION, отсутствующий в учебной программе MCU-FREE. Этот подмодуль обеспечивает поточечное моделирование взаимодействия нейтронов с веществом в диапазоне энергий от 0 до 20 МэВ с помощью библиотеки ACE/MCU. Для его отключения мы установили нижнюю границу энергии его срабатывания равной 20 МэВ. Этой же картой мы установили область работы подмодуля FIMTOEN, обеспечивающего моделирование взаимодействий нейтронов с ядрами замедлителей с помощью библиотеки VESTA, от 0 до 4,65 эВ, вместо заданной по умолчанию от 0 до 1 эВ. Поскольку данная карта определяет нижние границы срабатывания подмодулей FARION, FIMBROEN, FIMTOEN, то границы работы подмодуля FIMBROEN оказываются заданными от 4,65 эВ до 20 МэВ. Учитывая тот факт, что в групповой библиотеке BNAB/MCU, с которой работает подмодуль FIMBROEN, данные записаны в диапазоне от 0 до 10,5 МэВ, реальная область энергий, в которой будет выполняться расчет, задана от 0 до 10,5 МэВ.

С точки зрения учебного расчета это не имеет особенного значения, однако, с точки зрения расчета быстрого реактора этот подход имеет существенные недостатки.

Первый недостаток заданной с помощью карты EGRC схемы сшивки подмодулей физического модуля состоит в том, что фактически весь расчет будет проведен по 26-групповой библиотеке BNAB/MCU, поскольку моделируемая система имеет быстрый спектр, и нейтронов с энергиями менее 4,65 эВ в ней будет очень мало.

Второй недостаток вытекает из первого. В библиотеке BNAB/MCU нет температурной зависимости сечений, т.е. температура материалов будет точно учитываться только в области разрешенных резонансов, поскольку расчет в этой области будет вестись подмодулем RAPAN по данным библиотеки LIPAR. В этой библиотеке содержатся параметры различных формализмов, что позволяет вычислять сечения как функцию от температуры непосредственно при моделировании столкновения. Границы области разрешенных резонансов индивидуальны для каждого нуклида. В программе MCU это значение определяется параметром EHR, умалчиваемое значение которого записано в файле DEFAULT.PHY.

Несмотря на то, что в данном примере не используются замедлители, отметим, что их сечения рассчитываются с использованием вероятностных таблиц из библиотеки VESTA, полученных из законов рассеяния  $S(\alpha, \beta)$  из библиотеки BOFS, с допуском по температуре, определяемым параметром DTEM.

Для расчета систем с быстрым спектром нейтронов лучше использовать подмодуль FARION. В библиотеке ACE/MCU, из которой он выбирает сечения, данные приводятся для набора температур. Из этого набора для каждого материала FARION выбирает данные для ближайшего значения температуры. Иными словами, если в библиотеке есть данные только для 300 и 600 К, а температура материала задана равной 500 К, то при расчете взаимодействий нейтронов с данным материалом будут использованы сечения, подготовленные для 600 К.

При работе с подмодулем FARION следует иметь в виду, что в разных программах MCU представлены разные наборы температур, а также имеется ряд дополнительных особенностей, влияющих на значения энергетических границ в карте EGRC. Поэтому перед использованием этого подмодуля следует обратиться к Руководству пользователя.

Второй дополнительной картой является карта DELN *deln*. С ее помощью мы включили использование при генерации нейтронов энергетического спектра не только мгновенных (*deln* = 0), но и запаздывающих (*deln* = 1) нейтронов. В данном примере это не оказывает существенного влияния на результат, однако при расчете незнакомых систем рекомендуется оценивать, как неучет энергетического спектра запаздывающих нейтронов при моделировании влияет на исследуемые характеристики. Таким образом, карта DELN включает (*deln* = 1) или выключает (*deln* = 0) моделирование запаздывающих нейтронов. Отметим, что по умолчанию для этой карты принято значение ноль, то есть при генерации нейтронов используется только энергетический спектр мгновенных нейтронов.

Помимо этого мы установили для карты DELN значение *deln* = 1 еще и потому, что в нашем примере мы среди прочих характеристик хотим определить эффективную долю запаздывающих нейтронов, а для этого их необходимо моделировать.

Данные для раздела физического модуля заканчиваются обязательной картой FINISH.

#### 5.4. Исходные данные для геометрического модуля

Вторым разделом исходных данных всегда являются данные для геометрического модуля. Этот раздел начинается обязательной картой HEAD. Количество дополнительных позиций, отводимых под списки поиска, задано равным 2000, просто для того, чтобы избежать появления диагностики «NO PLACE FOR LISTS FROM TRAK» в начале счета. На самом деле в момент появления на экране этой надписи программа автоматически выделит необходимое место, поэтому как на значение этого параметра, так и на саму диагностику можно не обращать внимания. Второе число в карте HEAD служит для управления трассировкой, его лучше оставить равным нулю, чтобы трассировка не включалась. На самом деле,

как второй, так и третий параметры карты HEAD можно было не задавать, так как по умолчанию оба они равны нулю.

В данном примере контейнером системы, в котором осуществляется все моделирование, служит первое тело в описании геометрии, что определяется наличием карты CONT, которая должна следовать непосредственно за картой HEAD. Задание контейнера с помощью тела на практике применяется наиболее часто. Параметры карты CONT зависят от типа тела, выбранного в качестве контейнера, и определяют граничные условия на его поверхностях. Поскольку в нашем случае контейнером служит цилиндр RCZ, а у него три поверхности, то и параметров используется три. Согласно руководству пользователя программы MCU поверхности цилиндра RCZ перечисляются в следующем порядке: нижнее основание, верхнее основание, боковая поверхность. Граничные условия, определенные в карте CONT применяются к цилиндру именно в этом порядке. Поскольку наша модель предполагает, что вылетевшие из системы нейтроны не возвращаются, мы установили граничное условие В (все вылетающие частицы поглощаются) для всех поверхностей цилиндра.

Порядок следования остальных карт достаточно произволен. Основной принцип состоит в том, что любое понятие должно быть определено до его использования.

В MCU существует два способа задания параметров: EQU и SET. EQU определяет константы, а SET – переменные. В нашем примере используются только константы, с помощью которых определены: положение управляющих стержней (ZSHR), высота контейнера системы (HALL), шаг решетки тепловыделяющих элементов (PITCH), внешний радиус оболочки тепловыделяющих элементов (RCLAD), внешний радиус топливной таблетки (RFUEL). Отметим, что часто для удобства работы с исходными данными определение всех констант помещают в начало исходных данных до описания первого тела.

#### **5.4.1. Основная геометрия**

Поскольку мы выбрали способ определения контейнера системы, при котором им является первое тело, то описание тел, использованных при задании основной геометрии, начинается с тела-контейнера. В нашем случае это цилиндр (RCZ) с именем N1 с центром нижнего основания в точке (0, 0, 0) высотой HALL, равной 104,4 см, и радиусом 155 см. Кроме того, мы определили еще один дополнительный цилиндр радиусом 115 см, который будет содержать активную зону нашей модели.

Так как мы решили использовать поворотную шестидесятиградусную симметрию, далее задаются два полупространства: PLY с именем CNT2 и дополнительным именем C2, PLG с именем CNT3 и с дополнительным именем C3. Дополнительные имена потребуются позже для учета поворотной симметрии при расстановке тепловыделяющих сборок в активной

зоне с помощью генератора решетки. Обратим внимание на неявное использование переменной, определенной формулой  $\sin(60)$ , при определении одного из параметров полупространства PLG.

Таким образом, с помощью четырех тел мы задали основу модели, в которую дальше с помощью решетки будут вложены тепловыделяющие сборки, составленные с помощью сетей из тепловыделяющих элементов. Вообще говоря, можно было бы обойтись и тремя телами, не задавая дополнительный цилиндр, но тогда нам пришлось бы дополнительно обрабатывать положение управляющих стержней и стержней аварийной защиты, поскольку при их извлечении из активной зоны оставшееся пространство должно быть заполнено теплоносителем. При использовании дополнительного цилиндра, заполненного теплоносителем, данное обстоятельство будет учитываться автоматически. Это также подстраховывает наш расчет на тот случай, если из-за погрешностей, связанных с точностью представления данных в компьютере, нейтрон при моделировании попадает в пространство между тепловыделяющими сборками.

Раздел описания тел основной геометрии заканчивается обязательной картой END.

После того, как определены все тела, используемые в основной геометрии, необходимо задать с их помощью геометрические зоны. При этом необходимо помнить о том, что все пространство модели, определенное контейнером системы, должно быть описано полностью. Это означает, что в контейнере не должно быть областей, не относящихся к какой-либо геометрической зоне.

В нашем примере мы задаем геометрические зоны, начиная с внешней и двигаясь внутрь системы. Часто используют обратный подход, начиная описание с самой внутренней геометрической зоны и двигаясь наружу.

Геометрическая зона Z01 задана с помощью вычитания из внешнего цилиндра N1 внутреннего цилиндра N2 и ограничения полученной области пространства с помощью полупространств CNT2 и CNT3. Получившаяся при этом геометрическая зона выделена наклонными линиями штриховки на рис. 5.5. Согласно нашему описанию эта геометрическая зона заполнена материалом 10 ( $\#M=10$ ), то есть практически в ней вакуум.

Вторая область основной геометрии задана с помощью ограничения тела N2 полупространствами CNT2 и CNT3 и заполнения ее теплоносителем ( $\#M=9$ ). На рис. 5.5 эта область не заштрихована.

Две оставшиеся геометрические зоны REFM и REFP служат для задания поворотной симметрии в нашей модели. В первом случае при переходе частицы в область, определенную пересечением контейнера N1 с дополнением к полупространству CNT2, она будет перемещена из точки

перехода с помощью вращения на 60 градусов против часовой стрелки (см.  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}'_1$  на рис. 5.5).

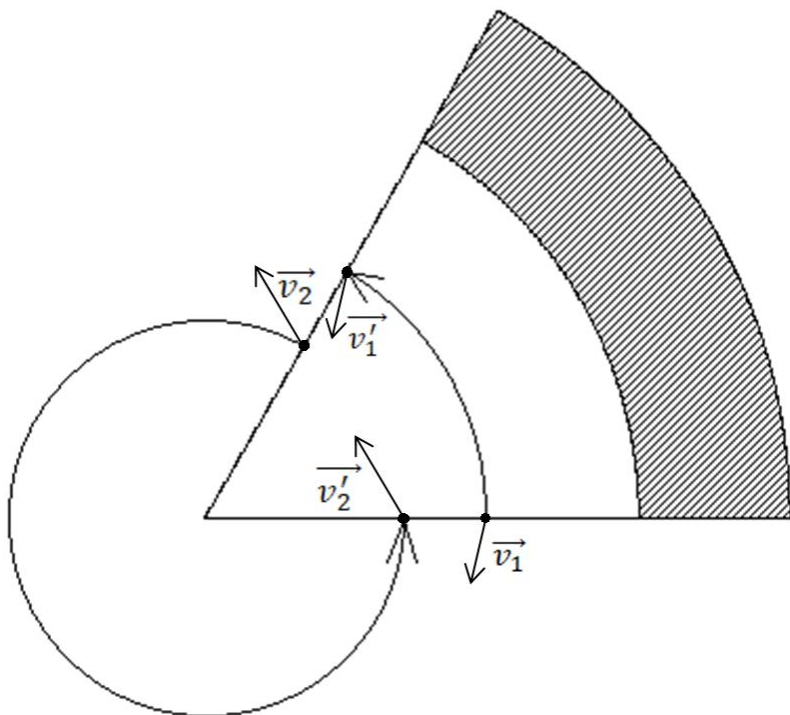


Рис. 5.5. Использование поворотной симметрии в модели БН-600

Аналогичным образом во втором случае переход частицы через границу, образованную пересечением полупространства CNT2 с дополнением к полупространству CNT3, будет приводить к переносу частицы из точки пересечения границы с помощью поворота на 300 градусов против часовой стрелки (см.  $\vec{v}_2$  и  $\vec{v}'_2$  на рис. 5.5).

Раздел описания геометрических зон основной геометрии заканчивается обязательной картой END.

#### 5.4.2. Прототипы ячеек сети

В основной геометрии мы разместим все необходимые сборки. Поскольку при моделировании тепловыделяющих сборок с помощью сетей используются прототипы ячеек этих сетей, необходимо предварительно задать эти прототипы. Поэтому после основной геометрии мы переходим к прототипам ячеек сетей.



В первую очередь определяются константы, которые мы будем использовать в прототипах: шаг решетки тепловыделяющих элементов (PITCH), внешний радиус оболочки тепловыделяющего элемента (RCLAD), внешний радиус топливной таблетки (RFUEL). Как уже говорилось, главное, чтобы константа или переменная была определена до ее использования, то есть мы могли бы задать эти константы до описания основной геометрии. Однако следует иметь в виду, что константы и переменные, заданные внутри описания прототипа ячейки сети или элемента решетки, являются локальными и не видны за пределами такого описания. Более того, если названия локальной и глобальной переменной совпадают, то внутри описания прототипа будет использовано значение, определенное для локальной константы или переменной.

После определения констант переходим к заданию прототипов ячеек. Любой прототип ячейки сети начинается с карты CELL и заканчивается картой END. В нашем варианте исходных данных для каждого типа топлива задается отдельный прототип. Такой подход используется довольно часто, что отчасти вызвано тем, что для программ поколения MCU-4 это был единственный способ задать в ячейках разный номер топливного материала. В современных программах MCU для этого можно использовать картограммы материалов.

Однако в нашем случае применение такого подхода преследует дополнительную цель, состоящую в демонстрации различных способов определения для геометрической зоны номеров материала, регистрационной зоны и регистрационного объекта, а также различного способа работы с именами тел.

Каждый прототип имеет свое собственное название. Оно достаточно произвольно. С точки зрения программы это символьное имя, поэтому не требуется соблюдать никакой последовательности задания прототипов, что и продемонстрировано в нашем примере, где прототип F5 задан ранее прототипа F4. Однако, для упрощения работы с исходными данными, лучше придерживаться какой-либо логики. В данном случае логичнее было бы задавать прототип F5 после прототипа F4.

Первый прототип имеет название F1. Он, как и все остальные прототипы, содержит тепловыделяющий элемент и состоит из трех тел.

Первое тело это правильная шестигранная призма с осью, совпадающей с OZ, и центром нижнего основания в начале ее локальных координат (SHEx). Для этого тела задаются три параметра. Первый параметр PITCH определяет ее размер под ключ, что при описании сети соответствует шагу сети. Второй параметр HALL задает высоту ячейки, что в нашем случае соответствует высоте всей системы. Третий параметр, который в отличие от двух предыдущих не является обязательным, нужен для того, чтобы повернуть призму на угол 90 градусов против часовой стрелки. Поскольку

если не выполнить такой поворот, то две боковых грани призмы будут параллельны плоскости  $OYZ$ , а для заполнения тепловыделяющей сборки нам нужно, чтобы они были параллельны плоскости  $OXZ$  (см. рис. 5.6).

Отметим, что первое тело в описании прототипа является его контейнером и определяет то, как будет разворачиваться сеть. Поэтому все прототипы, используемые при задании сети, должны иметь одинаковый контейнер. Набор таких тел-контейнеров ограничен тремя: SBOX, SHEX и RPP. Для моделируемой системы подходит только SHEX, который и использован с одинаковыми значениями параметров во всех прототипах.

Два других тела моделируют тепловыделяющий элемент. Это цилиндры, размещенные в центре призмы-контейнера. Размещение этих элементов производится в системе локальных координат тела-контейнера прототипа ячейки сети. При использовании тела SHEX точка  $(0, 0, 0)$  расположена в центре его нижнего основания.

Раздел описания тел прототипа ячейки сети заканчивается обязательной картой END.

Поскольку задание прототипа ячейки сети не отличается от задания основной геометрии, после описания тел, следует описание геометрических зон. По этой же причине все особенности задания прототипов, которые будут рассмотрены далее, применимы и к описанию основной геометрии.

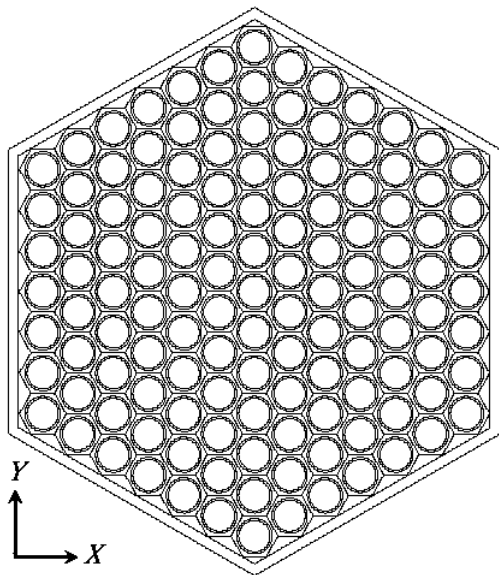


Рис. 5.6. Горизонтальное сечение модели тепловыделяющей сборки

Все прототипы состоят из трех геометрических зон: теплоноситель, оболочка тепловыделяющего элемента, топливо.

При задании прототипов F1 и F2 тела именуются с помощью конструкции  $Nn$ , где  $n$  – номер, который служит ссылкой на это тело при описании геометрических зон. Обратите внимание, что, как показано в описании прототипа F2, следование этих номеров по порядку необязательно. Конструкция  $Nn$  может использоваться и как обычное символьное имя, как это сделано при описании прототипа F3. Вместо конструкции  $Nn$  можно использовать символ \*, как это сделано для прототипа F5, в этом случае номера будут присвоены по порядку следования тел, начиная с единицы и без пропусков. Использование обычных символьных имен тел продемонстрировано в описании прототипа F4.

Обратите внимание, что названия геометрических зон должны быть уникальными только в тех случаях, когда где-либо в исходных данных на них есть ссылка. В нашем случае их нет, поэтому названия могут быть любыми, в том числе и совпадающими, как в описании прототипа F3. иногда названия геометрических зон выбирают в соответствии с их ролью в описании модели, например, FUEL или WATER. Рекомендуется придерживаться некоторой логики и учитывать, что с вашими исходными данными, возможно, придется работать другому человеку.

В прототипах используются два разных способа задания номера материала, регистрационной зоны и регистрационного объекта: старый (F1, F2) и новый (F3, F4, F5). Новый способ характеризуется наличием символа # перед определением номеров.

При использовании старого способа численные значения соответствующих номеров материала, регистрационной зоны и регистрационного объекта задаются с помощью конструкции  $/z:m/o$ , где  $z$  – номер регистрационной зоны,  $m$  – номер материала,  $o$  – номер регистрационного объекта. Ссылки на картограммы или так называемые условные номера задаются с помощью отрицательных номеров.

При использовании нового способа численные значения соответствующих номеров материала, регистрационной зоны и регистрационного объекта задаются с помощью конструкций  $M=$  или  $m=$ ,  $Z=$  или  $z=$ ,  $O=$  или  $o=$ . Ссылки на картограммы или так называемые условные номера задаются с помощью конструкций  $IM=$  или  $im=$ ,  $IZ=$  или  $iz=$ ,  $IO=$  или  $io=$ .

Наличие в описании геометрической зоны условного номера, означает, что реальный номер будет присвоен позже, при установке прототипа в сеть, с помощью специальной картограммы.

Если нам не требуется отдельная регистрация в геометрической зоне то, можно не задавать номера регистрационных зон и/или объектов. В этом случае фрагмент описания геометрических зон прототипа F1 может выглядеть следующим образом:

```

Z01 1 -2 :9      ;Coolant
Z02 2 -3 /3:6    ;Cladding
Z03   3 :1/-1    ;Fuel

```

В этом случае номера материалов теплоносителя, оболочки и топлива будут соответственно 9, 6 и 1; номера регистрационных зон станут 1, 3 и 1; а номера регистрационных объектов будут 1, 1 и -1.

С помощью нового способа задания номеров рассматриваемый фрагмент можно записать так:

```

Z01 1 -2 #m=9      ;Coolant
Z02 2 -3 #z=3 m=6   ;Cladding
Z03   3 #m=1 io=1   ;Fuel

```

Раздел описания геометрических зон прототипа ячейки сети заканчивается обязательной картой END.

### 5.4.3. Прототипы элементов решетки, сети

После того, как мы задали все прототипы ячеек сети, можно переходить к описанию самих сетей. В нашем примере с помощью сетей задается расположение тепловыделяющих элементов в тепловыделяющих сборках. Расставлять сборки в активной зоне мы будем с помощью решетки. Все это означает, что все сети будут задаваться внутри прототипов элементов решеток. Количество таких прототипов, содержащих сети, определяется количеством различных типов тепловыделяющих сборок. В нашем примере их пять: LEZ1, LEZ2, MEZ, MOX, HEZ (см. рис. 5.1).

Описание прототипа элемента решетки начинается картой LCELL и заканчивается картой ENDL. Все описание выполняется в локальных координатах, определяемых первым телом, которое является контейнером прототипа. В зависимости от выбранного генератора решетки контейнеры используемых прототипов могут быть различными, однако в нашем случае для всех прототипов использованы одинаковые контейнеры, что объясняется не только выбранным генератором, но свойствами моделируемой системы.

В соответствии с описанием модели (см. рис. 5.1) всего нам понадобится восемь прототипов элементов решетки для задания LEZ1 (LCELL A), LEZ2 (LCELL B), MEZ (LCELL C), MOX (LCELL D), HEZ (LCELL E), SHR (LCELL X), SSA1 (LCELL s), SSA2 (LCELL S). Для позиции, занятой стержнями аварийной защиты (SCR) мы не будем задавать прототип, поскольку мы не планируем рассчитывать состояния со сброшенной аварийной защитой. Нужно обратить внимание на то, что заглавные и строчные буквы в именах прототипов как ячеек сетей, так и элементов решетки являются различными. Для демонстрации этого мы использовали оба варианта написания буквы S для определения двух разных прототипов элементов стальной защиты.

Прототип элемента решетки задается по тем же принципам, что и основная геометрия. В определенном смысле такой прототип можно рассматривать как отдельную независимую геометрию, которая впоследствии будет установлена в заданную точку основной геометрии. При этом содержимое основной геометрии, которое окажется в этом месте будет вытеснено контейнером прототипа. Никакого контроля наложения двух прототипов при их расстановке программой не осуществляется, поэтому за этим необходимо следить самостоятельно.

Все прототипы элементов решетки, моделирующие тепловыделяющие сборки, состоят из трех шестигранных призм HEX, первая из которых является контейнером. Геометрическая зона между второй и третьей призмой моделирует стальной чехол, а внутри третьей призмы размещается сеть из ячеек с тепловыделяющими элементами. Поскольку в нашей модели характеристики теплоносителя одинаковы как в межчехловом пространстве, так и внутри сборки, геометрические зоны между первой и второй призмами, а также внутреннее пространство третьей призмы заполнено тем же материалом теплоносителя, который используется в прототипе ячейки сети.

Отметим еще один способ обращения с именами тел, продемонстрированный в прототипе элемента решетки А. В этом случае имена тел задаются символом \*, а ссылки на автоматически генерируемые номера тел выполняются с помощью конструкции  $Nn$ .

Геометрическая зона с именем Z03 содержит сеть FA. Ссылка на сеть записывается в скобках, непосредственно после названия геометрической зоны. После окончания описания основной геометрии прототипа элемента решетки следует описание сети. Оно начинается картой NET и заканчивается картой END. Это правило одинаково как для основной геометрии прототипа, так и для основной геометрии модели.

В карте NET последовательно задаются имя сети, координаты начала сети, число столбцов, число строк и число слоев. Поскольку в нашей модели используется двумерная сеть, число слоев задавать не нужно. Обратите внимание, что в карте NET константы, переменные и выражения можно использовать только при задании координат.

Сама картограмма расположения прототипов задается предложениями, начинающимися с идентификатора вида  $Tnn$ , где  $nn$  – номер строки картограммы

Ячейка из первого столбца первой строки устанавливается в точку, определенную заданными координатами начала сети. Для того чтобы понять как именно будет разворачиваться сеть, можно поступить следующим образом. Установить координаты начала сети в точку, про которую нам все известно. В нашем случае в качестве такой точки можно выбрать начало локальной системы координат (0, 0, 0), то есть центр нижнего ос-

нования шестигранной призмы. После это в картограмме оставить только одну ненулевую ячейку в первом столбце первой строки. После этого карта NET и картограмма ячеек будут выглядеть следующим образом:

```
NET FA 0 0 0 13 13
T01 F1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T02 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T03 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T04 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T05 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T06 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T07 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T08 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T09 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T11 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T12 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T13 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Нарисовав полученную модель с помощью MCU Office (Upper Left  $X=7$ ,  $Y=15$ ,  $Z=50$ ; Bottom Right  $X=20$ ,  $Y=2$ ,  $Z=50$ ; Screen Vertical Direction Vector  $X=0$ ,  $Y=1$ ,  $Z=0$ ; Region=Zones), получим рис. 5.7.а. Добавим ячейку во второй столбец первой строки картограммы

```
T01 F1 F1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

и получим рис. 5.7.б. Такое поведение строки картограммы соответствует заданному повороту контейнера прототипа ячейки F1 на девяносто градусов.

Добавим ячейку в первый столбец второй строки картограммы

```
T01 F1 F1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T02 F1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

и получим рис. 5.7.в.

Теперь, чтобы задать нужное расположение тепловыделяющих элементов решетки, необходимо установить координаты сети в требуемую точку прототипа элемента решетки. Для этого воспользуемся шагом решетки элементов  $PITCH$  (см. рис. 5.8). Тогда необходимый сдвиг по оси  $OX$  будет равен  $6 \cdot PITCH \cdot \cos(30)$ , а сдвиг в отрицательную сторону по оси  $OY$  составит  $6 \cdot PITCH \cdot \sin(30)$  или, что то же самое,  $3 \cdot PITCH$ . Внесем эти изменения в карту NET

```
NET FA 6 * PITCH * COS (30) , -6 * PITCH * SIN (30) , 0 13, 13
T01 F1 F1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
T02 F1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

и получим рис. 5.7.г.

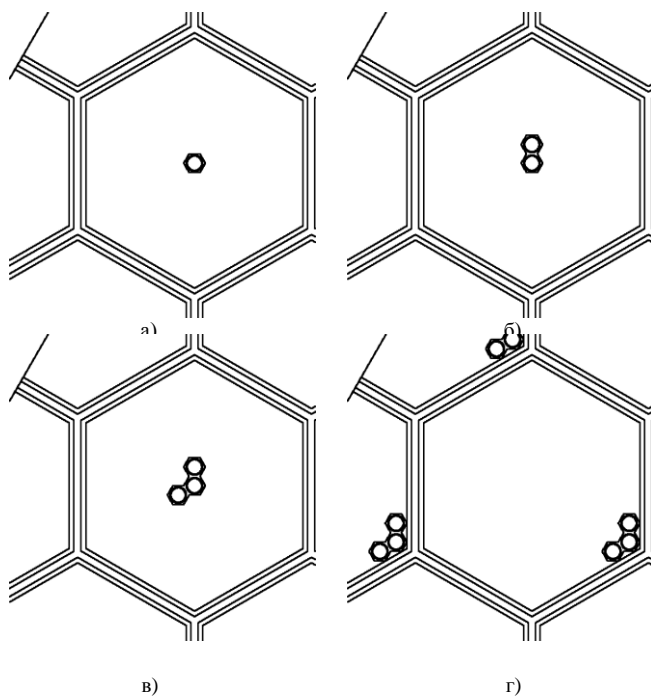


Рис. 5.7. Набор картограммы ячеек сети

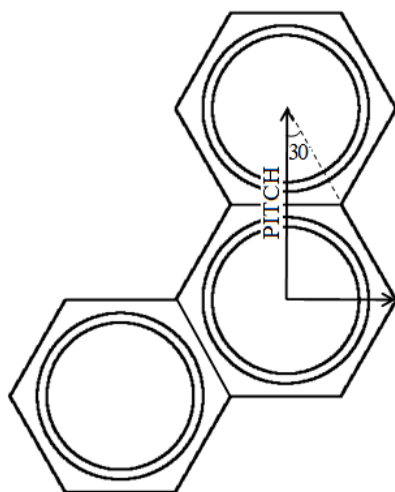


Рис. 5.8. Геометрия сдвигов для размещения начала координат сети

Поскольку используемый в сети прототип ячейки F1 содержит условный номер регистрационного объекта, то после задания картограммы имен прототипов ячеек необходимо задать картограмму номеров регистрационных объектов. Поскольку используется всего один условный номер и его абсолютное значение равно единице, достаточно задать только одну картограмму. Если бы абсолютное значение условного указателя было равно двум, то нам пришлось бы задать две картограммы, даже, несмотря на то, что общее количество использованных условных номеров равно одному. Иными словами, количество картограмм определяется максимальным абсолютным значением условного номера во всех прототипах, использованных при задании сети.

Для всех геометрических зон прототипа ячейки F1 использовано одно и то же значение условного номера. Это означает, что при регистрации по объектам статистика будет накапливаться для всех геометрических зон этой ячейки, как одного целого. Более того, для прототипа элемента решетки A мы использовали возможность задать для всех ячеек с условным номером равным единице одно и то же значение, причем так же условное. Сделали мы это с помощью специальной карты *OnnALL*, где *nn* – абсолютное значение условного номера, для которого задается картограмма.

Если бы данная сеть задавалась в основной геометрии, то использование в картограмме номеров регистрационных зон или объектов отрицательных, то есть условных номеров вызвало бы ошибку ввода. Поскольку мы задаем сеть внутри решетки, условный номер будет преобразован в реальный автоматически генератором решетки. В данном случае все ячейки в картограмме сначала получают одинаковый условный номер, равный единице. Это означает, что вся тепловыделяющая сборка станет одним регистрационным объектом, то есть при регистрации по объектам статистика будет накапливаться для всех ячеек этой сборки, как одного целого.

При установке прототипа элемента решетки в решетку, моделирующую активную зону, условный номер будет преобразован в реальный по определенному правилу. При этом для каждого элемента решетки будет выработано собственное значение, которое будет больше максимального реального значения, использованного в исходных данных. То есть при размещении прототипа элемента A в несколько позиций решетки, его условный номер, равный единице, будет преобразован в разные реальные номера. Это легко проверить с помощью *MCU Office*.

Если мы хотим получить статистику, общую по всем тепловыделяющим сборкам одного типа, для теплоносителя, оболочки и топлива, необходимо использовать различные условные номера и задавать для них отдельные картограммы. Этот подход продемонстрирован в описании прототипа элемента решетки B. В нем сеть задана с использованием прототи-



па ячейки F2. В этом прототипе ячейки помимо условного номера регистрационного объекта использованы различные условные номера регистрационной зоны.

При задании сети после картограммы имен и до картограммы объектных номеров заданы картограммы номеров регистрационных зон. Вообще говоря, последовательность задания картограмм строго определена, и ее нельзя нарушать. Задание картограмм для зон, после картограммы для объектов вызовет ошибку ввода.

С помощью трех картограмм, соответствующих использованным в прототипе ячейки условным номерам, задаем реальные значения всех элементов решетки, образованных с помощью прототипа В. Таким образом, для всех тепловыделяющих сборок LEZ2 статистика для теплоносителя будет накапливаться в регистрационной зоне 5, для оболочки тепловыделяющего элемента – в регистрационной зоне 6, а для топлива – в регистрационной зоне 7. При этом мы самостоятельно следим за тем, чтобы эти реальные номера не использовались для других целей, например, для накопления статистики в других тепловыделяющих сборках.

Прототип элемента решетки С составлен из ячеек прототипа F3. В этом прототипе номера всех регистрационных зон и регистрационных объектов заданы равными единице. Это традиционный способ задать отсутствие регистрации в геометрической зоне, поскольку единица используется для задания регистрационных номеров по умолчанию. Вся статистика по тепловыделяющим сборкам MEZ будет скрыта в статистике по всей системе, и после расчета выделить ее для анализа будет нельзя.

Следующим прототипом элемента решетки является прототип D, моделирующий тепловыделяющую сборку MOX. В каждой сборке MOX согласно описанию прототипа ячейки F4 мы хотим вести регистрацию как по регистрационным зонам, так и по регистрационным объектам. Судя по картограмме номеров регистрационных зон, нас интересует отдельная статистика по каждой ячейке каждой тепловыделяющей сборки этого типа. Для этого мы используем полную картограмму номеров регистрационных зон, задаваемую картами вида  $Pnnkk$ , где  $nn$  – условный номер регистрационной зоны, а  $kk$  – номер строки картограммы, соответствующий номеру строки картограммы имен. Поскольку мы хотим, чтобы при расстановке сборок MOX в активной зоне генератор решетки использовал для всех ячеек разные реальные номера регистрационных зон, то все номера в картограмме прототипа задаем условными и разными. Получившиеся в результате номера регистрационных зон для каждой сборки MOX можно посмотреть с помощью MCU Office (Region=Zones).

Последний прототип элемента решетки Е по своей структуре повторяет прототип элемента С и завершает описание элементов, содержащих топливо.

Прототип элемента решетки X моделирует управляющие стержни (SHR). Он не содержит сеть и моделирует только чехол и поглощающие элементы. Положение прототипа в решетке определяется координатами его первого тела, которое служит контейнером. Для того чтобы мы могли перемещать управляющие стержни, изменяя значение всего одной переменной, вертикальная координата шестигранной призмы W1 определена с помощью константы ZSHR, заданной при описании основной геометрии. Поскольку основания всех остальных тел прототипа элемента X расположены на том же уровне, что и основание контейнера, их высотное положение также определено с помощью константы ZSHR.

Высота всех тел задана еще одной константой из основной геометрии HALL для того, чтобы при полном погружении управляющих стержней в активную зону они заполняли ее полностью. Отметим использование формул непосредственно на месте определения координат цилиндров, используемых для моделирования поглощающих стержней, а также одного и того же имени для всех геометрических зон.

Отдельно рассмотрим определение номеров регистрационных зон. Для этого прототипа все такие номера – условные и разные. При автоматическом определении реальных номеров при расстановке прототипа в решетке они также будут разными, в чем можно убедиться с помощью MCU Office. Сделано это для того, чтобы исследовать распределение скорости реакции поглощения по управляющим стержням.

Закомментированная строка показывает, как можно было бы описать все поглощающие элементы в качестве одной регистрационной зоны без индивидуальной регистрации с помощью операции объединения и использования реального номера регистрационной зоны, равного единице, не задавая строки ниже. Этого же эффекта можно было бы добиться, заменив в этих строках условные номера на реальные ( $Z=1$ ). Запись с использованием операции объединения может быть удобна, так как она экономит место в файле исходных данных. Однако во внутреннем представлении геометрического модуля операция объединения отсутствует, и после ввода исходных данных они будут представлены в виде набора отдельных строк. Иными словами, оба способа объединения разных не связанных между собой геометрических зон под одним номером материала, регистрационной зоны или регистрационного объекта равносильны.

Два последних прототипа элементов решетки s и S моделируют стальную защиту SSA1 и SSA2 соответственно. Мы используем гомогенизированное представление защиты, поэтому описание прототипов весьма примитивно. Каждый из них состоит из одной шестигранной призмы, заполненной гомогенизированным материалом защиты.

#### 5.4.4. Решетка

Теперь, когда все прототипы элементов решетки заданы, можно перейти к их расстановке в активной зоне. Для этого использован генератор решетки G2MP. Этот генератор удобен тем, что по своей идеологии повторяет задание сетей. По этой же причине необходимо следить за тем, чтобы после установки контейнеры элементов решетки не накладывались друг на друга. Никакой автоматической проверки этого не происходит, поскольку данный генератор, как и остальные, является по сути всего лишь надстройкой, позволяющей установить копию прототипа на заданное место в основной геометрии модели. В нашем случае все используемые в картограмме прототипы элементов решетки имеют одинаковый и нужным образом ориентированный в пространстве контейнер, что обеспечивает нам правильное размещение.

Описание генератора решетки всегда начинается с карты LATT. В этой карте задается имя генератора решетки (G2MP) и перечисляются геометрические зоны основной геометрии, на которые будет накладываться решетка. Геометрическая зона определяется по имени, поэтому имена таких геометрических зон должны быть уникальными в пределах основной геометрии, то есть в исходных данных в описании основной геометрии не должно быть нескольких геометрических зон с таким именем. В нашем случае в описании основной геометрии существует только одна геометрическая зона Z01 и только одна геометрическая зона Z02, а зоны с такими же именами внутри описаний прототипов ячеек сетей или элементов решеток генератору не видны.

Во второй карте LISTEL перечисляются имена прототипов элементов, которые будут расставлены с помощью данного генератора. Поскольку мы используем поворотную симметрию, которая задана двумя дополнительными полупространствами (CNT2 и CNT3), после имени каждого прототипа необходимо указать их дополнительные имена (C2 и C3). Это обрежет элементы решетки, которые выходят за пределы заданного угла поворотной симметрии.

Далее с помощью карты PARM мы определяем параметры решетки: число столбцов, число строк и три вектора, определяющих расстановку копий прототипов элементов решетки. После чего следуют строки, определяющие собственно расстановку, так же как это делается для сетей.

В нашем случае копии прототипов элементов решетки A, B, C, D, E, X, s и S будут установлены в решетку из 15 столбцов и 15 строк. В соответствии с картограммой элемент X, находящийся в позиции (1, 1) устанавливается в точку (0, 0, 0) согласно координатам, заданным для первого вектора в карте PARM. Следующий элемент строки картограммы (2, 1) будет установлен в точку, в соответствии с движением, определенным вторым вектором карты PARM, то есть в точку (9,902; 0; 0). Движение,

определенное вторым вектором, будет продолжаться, пока не будут установлены все элементы строки. Для перехода к следующей строке генератор выполнит движение, определенное третьим вектором карты PARM, а именно  $(9,902 \cdot \cos(60); 9,902 \cdot \sin(60); 0)$ . Таким образом, в соответствии с картограммой будут расставлены все копии прототипов элементов решетки.

Отметим, что копии прототипа элемента решетки X, хотя и размещаются в точки с высотной отметкой ноль, на самом деле будут находиться на ZSHR сантиметров выше.

При работе с прототипом элемента решетки следует помнить, что при составлении геометрических зон при выходе какого-либо тела за пределы тела, служащего контейнером прототипа, это нужно учитывать самостоятельно. Иными словами в такой геометрической зоне необходимо добавить пересечение с телом-контейнером прототипа.

При установке копии прототипа с помощью генератора в основную геометрию из геометрической зоны, на которую накладывается решетка, вычитается тело-контейнер прототипа. Другими словами, в эту геометрическую зону добавляется пересечение с дополнением к телу-контейнеру прототипа, установленному генератором решетки в заданную точку пространства. Если тело-контейнер выходит за пределы этой геометрической зоны, то необходимо обрезать лишнее, используя дополнительные имена в списках ограничения карты LISTEL, как сделано в нашем примере.

Во всех прототипах как ячеек сети, так и элементов решетки использован одинаковый условный номер регистрационного объекта, равный единице. В результате при разворачивании решетки все копии прототипов получают регистрационные номера по порядку, начиная с номера два, так как реальный номер регистрационного объекта, равный единице, был уже использован при описании основной геометрии. Получившееся разбиение нашей модели на регистрационные объекты можно посмотреть с помощью MCU Office. Оно позволит нам изучить распределение потоков и скоростей реакций в системе по сборкам.

Потвzльное распределение потоков и скоростей реакций в нашей модели мы можем изучить только для тепловыделяющих сборок со смешанным уран-плутониевым оксидным топливом (MOX), поскольку только для них задана соответствующая нумерация регистрационных зон, в чем также можно убедиться с помощью MCU Office.

## **5.5. Исходные данные для модулей источника, регистрации, транспортного и управляющего**

### **5.5.1. Данные для модуля источника**

После раздела данных для геометрического модуля задаются данные для модуля источника. Поскольку мы решаем задачу определения эффек-

тивного коэффициента размножения нейтронов, модуль источников используется для генерации точек рождения, направлений полета и энергий нейтронов только первого поколения. Нейтроны следующих поколений будут рождаться в точках деления в соответствии с правилами процесса нормализации, поддерживающими систему в условно-критическом состоянии при сохранении первоначального размера поколения.

Для того чтобы первое поколение было ближе к реальному, в модели используется сложный источник, позволяющий равномерно распределить нейтроны по активной зоне.

Данные для сложного источника всегда начинаются с карты NPS, в которой указывается количество примитивных источников, из которых он составлен. В нашем случае используется только один примитивный источник, вероятность срабатывания которого равна единице, о чем указано во второй карте PROB.

Нейтроны будут рождаться в соответствии с энерго-угловым распределением с именем SPEC1 изотропным и соответствующим спектру деления  $^{235}\text{U}$  тепловым нейтроном. Все перечисленное определяется картами ANGLE, MDIS, EDIS, которые всегда указываются в исходных данных в таком порядке. При задании примитивных источников на энерго-угловое распределение можно ссылаться по его имени. Если необходимо использовать несколько таких распределений, то им необходимо дать разные имена.

После определения энерго-углового распределения задается примитивный источник. Задание начинается с карты TYPE, которая определяет тип используемых частиц, после чего задаются тело-контейнер примитивного источника, имя используемого энерго-углового распределения, реперный вектор и количество регистрационных объектов, ограничивающих этот примитивный источник. Соответствующие карты вводятся именно в таком порядке.

В нашей модели используется один цилиндрический примитивный источник нейтронов с центром нижнего основания в начале координат, высотой HALL, радиусом 110 см и энерго-угловым распределением SPEC1. Направление реперного вектора значения не имеет, поскольку угловое распределение в SPEC1 задано изотропным, но поскольку задать что-то все-таки нужно, задано направление по оси OX. Никаких специальных ограничений геометрии нам вводить не нужно, поэтому количество ограничивающих регистрационных объектов равно нулю.

Раздел данных для модуля источника заканчивается картой FINISH.

### **5.5.2. Данные для модуля регистрации**

Далее необходимо задать данные для модуля регистрации. Это раздел начинается обязательной картой RGS. Далее, поскольку мы решаем зада-

чу определения эффективного коэффициента размножения нейтронов, мы запрашиваем такую регистрацию с помощью карты KEFF.

Вообще говоря, регистрационный модуль устроен таким образом, что можно не заказывать никакой регистрации, тогда никакой статистики регистрационный модуль накапливать не будет, что несколько ускорит расчет и уменьшит количество используемой оперативной памяти. Это может быть полезно при решении задач с использованием сложных моделей, когда требуемые характеристики можно получить с помощью других модулей, например, транспортного.

Характеристики, относящиеся к регистрационным областям (материалам, регистрационным зонам, регистрационным объектам), заказываются внутри блоков PTYPE-END. В нашей модели их два. Оба блока предназначены для регистрации частиц типа 1, то есть нейтронов, что определяется числом в карте PTYPE. Тип частицы определяется физическим модулем. В MCU приняты следующие значения: 1 – нейтроны, 2 – фотоны, 3 – электроны, 4 – позитроны.

Первый блок регистрации использует регистрацию по пробегам, что определено значением 1 в карте TTYPE. Второй блок регистрации карты TTYPE не содержит, поэтому для него будет использована регистрация по столкновениям, что определяется принятым для этой карты значением по умолчанию.

В обоих блоках регистрации заказана регистрация потоков во всех материалах, которых в нашей модели 12. Это сделано с помощью карты MFLU и нуля в качестве номера регистрационной зоны в первом блоке регистрации. Если бы мы хотели вести регистрацию только в каком-то конкретном материале или даже нескольких материалах, вместо нуля надо было бы написать номера этих материалов. При этом можно задавать как отдельные значения, так и некоторый диапазон, как это сделано во втором блоке регистрации. Аналогичным образом можно заказать регистрацию потока в регистрационных зонах и регистрационных объектах, для этого необходимо использовать карты ZFLU и OFLU соответственно.

Также в обоих блоках регистрации присутствует обязательная карта ENERGY, определяющая значения нижних границ энергетических регистрационных групп, задаваемых в электронвольтах. Для того чтобы иметь возможность сравнить полученные с помощью двух разных оценок значения потоков мы использовали одинаковое разбиение по энергии, а именно никакого. Все регистрация будет вестись в интервале от нуля электрон-вольт до бесконечности. На самом же деле, верхнее значение будет определяться конфигурацией физического модуля. В нашем случае, так как мы отключили подмодуль FARION, и моделирование быстрой области ведется с помощью подмодуля FIMBROEN, верхняя граница будет определяться библиотекой BNAB/MCU, которая содержит данные до 10,5 МэВ. Та-

ким образом, регистрация потока будет вестись в интервале от нуля до 10,5 МэВ.

Отметим, что в рамках одного блока регистрации можно задавать любое количество карт ENERGY. Это продемонстрировано в первом блоке, который содержит карту с разбиением всей энергетической шкалы на восемь интервалов, где последний интервал определен от 1 до 10,5 МэВ. Регистрация будет вестись независимо для каждого из заданных разбиений.

Помимо потоков в первом блоке аналогичным образом заказана регистрация скоростей реакций в регистрационных зонах (ZRCT) и регистрационных объектах (ORCT). При необходимости можно заказать и регистрацию в материалах, для этого необходимо использовать карту MRCT. Номера скоростей реакций задаются в карте RCT. В нашем случае мы запросили следующие реакции: поглощение (3), деление (18), и  $\nu\Sigma_f$  (918). Таким образом, в первом блоке для всех регистрационных зон и всех регистрационных объектов будут регистрироваться оценки по пробегам скоростей реакций 3, 18 и 918.

Раздел данных для модуля регистрации заканчивается картой FINISH.

### 5.5.3. Данные для транспортного модуля

Поскольку никаких особенных требований к транспортному модулю в модели нет, мы определяем только количество нейтронов в поколении (NTOT) и количество поколений в серии (NBAT). Если бы мы решали задачу с источником, то эти параметры не были бы особенно важны, так как, в конечном счете, все определялось бы общим количеством промоделированных частиц. Однако в задачах на определение эффективного коэффициента размножения оба числа приобретают значение.

Значения по умолчанию для NTOT и NBAT составляют 200 и 3 соответственно. Это означает, что моделируемая система будет изучаться поколениями по 200 нейтронов. При этом статистическая погрешность регистрируемых величин будет определяться по значениям, полученным посредством усреднения этих величин по трем последовательным сериям.

Выбор правильных значений NTOT и NBAT представляет собой непростую задачу. Обычно для этого проводятся дополнительные исследования по определению зависимости результата от выбранных значений. Сложность вопроса обусловлена следующим.

В расчетах для определения эффективного коэффициента размножения нейтронов имеется систематическая погрешность оценок, обратно пропорциональная NTOT. Некоторым качественным объяснением этого может служить такое: частицы одного поколения должны равномерно и достаточно плотно покрывать область пространства модели. Иными словами, если NTOT мало, то может так оказаться, что все нейтроны соберутся в одной достаточно малой и локальной области, и результат не бу-

дет отражать характеристики всей системы, а будет соответствовать только данной локальной области модели. При этом для общего случая отсутствуют способы, позволяющие надежно определить требуемое значение NTOT.

В случае с NBAT возникает проблема другого свойства. Идея вести расчет погрешности, используя средние значения по нескольким последовательным поколениям, преследует цель справиться с погрешностью, вызванной наличием корреляции между поколениями, которая возникает из-за того, что нейтроны следующего поколения рождаются в точках деления, вызванного нейтронами текущего поколения. Простая оценка статистической погрешности как корня из дисперсии, применяемая в программах метода Монте-Карло, предполагает отсутствие такой корреляции. Если рассчитывать погрешность по сериям, то можно с большей долей уверенности предположить, что значения рассчитываемых величин, соответствующие сериям, меньше или совсем не коррелируют друг с другом. И чем больше поколений мы будем сворачивать в одну серию, тем меньше будет корреляция.

Таким образом, поскольку значения по умолчанию подходят только для расчета ячейки, мы заменяем их на более соответствующие моделируемой системе: 1000 нейтронов в поколении и 5 поколений в серии. Для наших учебных целей этого будет достаточно, однако для практических расчетов рекомендуется выполнять отдельное исследование.

Раздел данных для транспортного модуля заканчивается картой FINISH.

#### 5.5.4. Данные для управляющего модуля

Последним модулем, для которого в нашем примере заданы исходные данные являются данные для управляющего модуля. Они всегда начинаются с обязательной карты NAMV, определяющей название, которое будет выводиться в процессе счета на экран.

С помощью карты MAXS задается количество серий, которое будет промоделировано. Полное число промоделированных нейтронов или, как часто говорят, историй  $N_{hist}$  определяется как

$$N_{hist} = NTOT \cdot NBAT \cdot MAXS.$$

Для определения полного времени счета удобно выполнить расчет одной серии, посмотреть в результатах затраченное на это время и, умножив его на требуемое количество серий, получить приблизительные затраты времени на полный расчет.

С учетом того, что статистическая погрешность обратно пропорциональна квадратному корню из общего количества промоделированных историй, можно оценить требуемое количество историй следующим образом. Выполнить расчет нескольких серий (но не менее десяти) для полу-



чения некоторой начальной, но адекватной статистики. Исходя из полученной погрешности, оценить во сколько раз ее желательно уменьшить. Искомое увеличение числа историй будет кратно квадрату полученного числа. Так, например, если полученная после моделирования ста серий погрешность расчета эффективного коэффициента размножения составляет 10 %, а ее желаемое значение составляет 1 %, то нужно увеличить количество историй в 100 раз, то есть вместо ста серий нужно моделировать десять тысяч. При этом не обязательно стартовать с самого начала, а можно изменить значение в карте MAXS в файле с расширением DAT и продолжить расчет.

Полное количество серий для моделирования (MAXS) выбрано равным одной тысяче.

Интервал сохранения промежуточных результатов расчета (DTZM) установлен равным десяти сериям.

Для вычисления эффективной доли запаздывающих нейтронов в разделе данных для транспортного модуля вводится карта BETA. Эта карта модифицирует моделирование запаздывающих нейтронов, которое включается картой DELN в разделе данных для физического модуля. Таким образом, для вычисления эффективной доли запаздывающих нейтронов необходимо наличие карт DELN 1 и BETA в соответствующих разделах исходных данных.

При наличии карты BETA каждый нейтрон моделируется дважды. Первый раз при рождении нейтрона используется энергетический спектр мгновенных нейтронов, а во второй – запаздывающих. Из-за этого время моделирования увеличивается практически в два раза. Это, а также тот факт, что данная характеристика всегда рассчитывается на одном вычислительном ядре, необходимо учитывать при планировании расчета.

Раздел данных для управляющего модуля заканчивается картой FINISH.

## 5.6. Результаты расчета

Необходимо помнить, что результаты моделирования, зависит от компилятора, использованного при генерации исполняемого кода программы. То есть при расчете одного и того же файла исходных данных исполняемыми модулями, полученными с помощью разных компиляторов и даже разных версий одного компилятора, результаты не будут абсолютно одинаковыми. Однако они должны совпадать в пределах статистической погрешности. Вообще говоря, при работе с методом Монте-Карло любые результаты всегда нужно приводить с указанием статистической погрешности, поскольку часто кажущееся на первый взгляд отличие одних результатов от других на самом деле вызвано их недостаточной точностью, что как раз и видно по статистической погрешности.

Результаты расчета нашей модели содержатся в файле bn600.FIN. Его содержимое состоит из нескольких частей, каждая из которых содержит данные, относящиеся к определенному модулю.

### 5.6.1. Раздел управляющего модуля

Первый раздел файла с результатами расчета заполняется управляющим модулем. Он никак не выделяется и представляет собой первые три строки, в которых указаны название программы, дата и время расчета, а также название файла исходных данных.

Ниже приводится содержимое данного раздела файла, использованного при подготовке данной главы.

```
MCU-FREE - Developed by MCU Team - http://mcuproject.ru
Date and Time : 2017/03/21 20:52:54
Input Data File: bn600
```

### 5.6.2. Раздел транспортного модуля

Второй раздел печатается транспортным модулем и начинается со строк

```
=====
TG TRANSPORT MODULE OUTPUT
=====
```

а заканчивается строками

```
=====
END OF TG TRANSPORT MODULE OUTPUT
=====
```

Он содержит некоторый набор технической информации: количество нейтронов в поколении (Number of Particles per Batch); количество поколений в серии (Number of Batches per One Series); полное количество промоделированных серий (Full Number of Series); среднее время, затраченное на моделирование одной историй (Time per History); а также ряд других характеристик моделирования.

Кроме того, транспортный модуль всегда осуществляет расчет эффективного коэффициента размножения нейтронов с использованием оценки по столкновениям:

```
Keff-Col(no buckling) 0.962121 ( 0.000444)
```

В данном случае расчетное значение эффективного коэффициента размножения составило  $0,962121 \pm 0,000444$ . Для практического использования такой результат можно округлить до  $0,9621 \pm 0,0004$ .

Поскольку с помощью карты ВЕТА мы запросили расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов, то в результате транспортный мо-

дуль напечатал ряд дополнительных результатов. Из них для практического применения можно использовать только значение эффективной доли запаздывающих нейтронов (Beta Effective), которое, заметим, хорошо согласуется как с теоретическими, так и с расчетными результатами в [4].

Необходимо отметить, что данные в разделе транспортного модуля всегда приводятся только для одного нулевого ядра. Это, в частности, означает, что если требуется оценить только эффективную долю запаздывающих нейтронов, то нет смысла выполнять многопроцессорный расчет, так как ответ для нее все равно будет напечатан только по данным нулевого ядра.

### 5.6.3. Раздел модуля регистрации

Содержание второго раздела файла с результатами расчета полностью определяется модулем регистрации. Он начинается со строк

```
=====
-- RGS TALLY MODULE OUTPUT --
=====
```

а заканчивается строками

```
=====
END OF RGS TALLY MODULE OUTPUT
=====
```

Отметим, что заголовки в разделе модуля регистрации выделяются двумя тире слева и справа, что облегчает переход по ним в текстовом редакторе с помощью поиска.

Вначале приводятся общие данные о количестве материалов, регистрационных зон и регистрационных объектов, а также карты из файла bn600.DAT, что позволяет посмотреть, какие указания использовались при финальной обработке результатов.

Далее следует строка, информирующая о способе представления погрешностей в разделе регистрационного модуля. В нашем примере это проценты:

```
ALL STANDARD DEVIATIONS ARE PRINTED IN PER CENT
```

Если необходимо, чтобы погрешность была представлена в абсолютных единицах, как это всегда делается в разделе транспортного модуля, необходимо в файл bn600.DAT в раздел данных для регистрационного модуля добавить карту PERC со значением 0. Тогда этот файл будет выглядеть так:

```
NAMV BN600
MAXS 1000
DTZM 10
```

```

BETA
FINISH
RGS 1 0
PTYPE 1
END
PTYPE 2
END
PERC 0
FINISH

```

Далее необходимо выполнить запуск MCU с дополнительным параметром F, чтобы программа повторно выполнила финальную обработку. После этого в новой версии файла bp600.FIN в разделе регистрационного модуля все погрешности будут приведены в абсолютных единицах. Строка, информирующая о способе представления погрешностей в разделе регистрационного модуля, будет выглядеть так:

```
ALL STANDARD DEVIATIONS ARE PRINTED IN ABSOLUTE VALUES
```

Далее следует блок, посвященный нейтронным характеристикам системы в целом:

```

-- NEUTRON SPECIFIC TALLIES FOR WHOLE SYSTEM --
                Mean      StdDev
Keff abs.   : 9.62392E-01  4.52432E-02
Keff col.   : 9.62121E-01  4.61493E-02
Keff t.len. : 9.67935E-01  4.61955E-02
Keff comb.  : 9.62259E-01  3.45652E-02
Keff Briss. : 9.62108E-01  3.07637E-02
AEF abs.,eV: 1.24960E+05  1.97147E-07
AEF col.,eV: 1.25011E+05  1.97147E-07
AEF trl.,eV: 1.24141E+05  1.97147E-07

```

В этом блоке представлены различные оценки эффективного коэффициента размножения нейтронов  $k_{eff}$ : по поглощениям (abs.), по столкновениям (col.), по пробегам (t.len), комбинированная (comb.), Бриссендена (Briss.), а также в зависимости от версии MCU средняя величина энергии нейтрона, вызвавшего деление (AEF или AELF). Все оценки считаются равноправными и для практического применения можно выбирать любую. При этом можно ориентироваться на значение статистической погрешности и выбирать ту оценку, для которой оно минимально.

Величина характеристики (Mean) приводится с ее статистической погрешностью (StdDev).

В нашем случае эффективный коэффициент размножения нейтронов при использовании комбинированной оценки составляет 0,962259. Статистическая погрешность этой оценки равна 0,0345652 %. То есть можно записать, что эффективный коэффициент размножения нейтронов равен

0,9623 с погрешностью 0,03% или  $0,9623 \pm 0,0003$ , переводя погрешность из процентов в абсолютную величину и получив 0,000332607.

При этом необходимо помнить, что в MCU статистическая погрешность составляет одно стандартное отклонение ( $\sigma$ ). Это означает, что вероятность того, что реальное значение  $k_{eff}$  находится в интервале от 0,9620 до 0,9626 составляет 68,3 %. Если нужно обеспечить более высокую надежность результата следует использовать два или даже три стандартных отклонения. Тогда для  $2\sigma$  интервал будет от 0,9617 до 0,9629, а вероятность составит 95,5 %; для  $3\sigma$  интервал будет от 0,9614 до 0,9632, а вероятность составит 99,7 %.

Далее последовательно печатаются результаты для каждого заказанного в исходных данных блока PTYPE-END. Они начинаются с указания типа частицы и типа использованной оценки: по поглощениям (by absorption), по столкновениям (by collision) или по пробегам (by track-length). Отметим, что в заголовке блока приводится его порядковый номер в файле исходных данных.

```
-- PARTICLE TYPE 1 --
Physical module particle type: 1 (neutrons)
The estimation type: by track-length.
```

Поскольку мы заказали расчет скоростей реакций и не использовали карту NUOFF для отключения регистрации для каждого нуклида, в начале блока печатается таблица балансов (Balance Table for nuclides). В этой таблице для каждой заказанной реакции приводится ее суммарное по всей системе значение для каждого нуклида. Эта таблица часто используется для контроля правильности задания модели.

```
Balance Table for nuclides
Reaction -      3
              Mean      StdDev
U235      2.93476E-01  7.00307E-02
. . .
NA        2.03935E-03  1.07574E-01
Reaction -     18
              Mean      StdDev
U235      2.32195E-01  6.68461E-02
. . .
NA        0.00000E+00  9.99999E+01
Reaction -    918
              Mean      StdDev
U235      5.72638E-01  6.62584E-02
. . .
NA        0.00000E+00  9.99999E+01
```

Затем печатаются результаты расчета заказанных функционалов в соответствии с заданными энергетическими шкалами. В нашем случае в первом блоке две шкалы. Поэтому сначала печатаются все результаты для первой шкалы, а затем для второй. Структура печати внутри шкал одинакова. Каждая шкала начинается с заголовка, содержащего порядковый номер шкалы и собственно параметры использованной шкалы энергий.

```
++ ENERGY NET 1 ++
Energy          Lower          Upper          Width  Ln (En/En-1)
  Bin N      Boundary      Boundary
      1      0.00000E+00      infinity          -          -
```

Поскольку первая шкала состоит только из одного интервала от нуля до бесконечности, то ширины групп ( $E_n - E_{n-1}$ ) и логарифмы отношения энергий  $\ln(E_n/E_{n-1})$  не приводятся.

Для быстрого перехода к следующей шкале можно использовать поиск по ++.

Внутри каждой шкалы выделяются три подраздела: материалы, регистрационные зоны и регистрационные объекты. Их заголовки всегда присутствуют в файле, даже если регистрация в какой-либо из областей не велась. В нашем случае в первой энергетической шкале первого блока RTYPE-END заказана регистрация функционалов только для регистрационных зон и регистрационных объектов.

Внутри каждого подраздела данные представлены одинаково. Сначала печатаются результаты расчета потока, затем скоростей реакций, затем других заказанных функционалов.

Если регистрация какого-либо функционала не была заказана и, следовательно, не производилась, то соответствующая таблица в подразделе будет отсутствовать.

В случае, когда вся таблица полностью состоит из нулей, она также не печатается.

В первой таблице для подраздела регистрационных зон приводятся расчетные значения потоков (FLUX) для всех энергетических групп и регистрационных зон.

```
-- ZONES --

FLUX.          ENERGY:  0.00000E+00
      Zone          Mean          StdDev
      1      6.33805E+01      1.16060E-01
. . .
      2080      1.09620E-02      5.31554E-01
```

После чего печатается информация для скоростей реакций (REACTION).

NUCLIDE:	MIXT, REACTION:	3, ENERGY:	0.00000E+00
	Zone Mean StdDev		
	1 2.40676E-01 1.26109E-01		
. . .			
	2080 7.27642E-05 8.76224E-01		
NUCLIDE:	MIXT, REACTION:	18, ENERGY:	0.00000E+00
	Zone Mean StdDev		
	1 1.26351E-01 1.21269E-01		
. . .			
	2080 4.13207E-05 7.05991E-01		
NUCLIDE:	MIXT, REACTION:	918, ENERGY:	0.00000E+00
	Zone Mean StdDev		
	1 3.18822E-01 1.20995E-01		
. . .			
	2080 1.21102E-04 7.12200E-01		
NUCLIDE:	U235, REACTION:	3, ENERGY:	0.00000E+00
	Zone Mean StdDev		
	1 1.35208E-01 1.26401E-01		
. . .			

Таблицы печатаются для всех нуклидов, а также в целом по регистрационной зоне (MIXT), для всех скоростей реакций, энергетических групп и регистрационных зон.

При одновременном заказе расчета потока  $\Phi$  и скорости реакции  $R$  для соответствующих реакций  $n$  и регистрационного объема  $i$  печатаются макроскопические сечения (CRS\_SECT)

$$\Sigma_n = \frac{R_n}{\Phi_i}$$

NUCLIDE:	MIXT, CRS_SECT:	3, ENERGY:	0.00000E+00
	Zone Mean StdDev		
	1 3.79731E-03 6.42981E-02		
. . .			

Аналогичным образом представлены все остальные данные. В нашем файле это данные для второй шкалы энергий внутри первого блока PTYPE-END и для единственной шкалы следующего блока PTYPE-END.

#### 5.6.4. Раздел геометрического модуля

Этот раздел начинается строкой

\*\*\*\*\* NCG

\*\*\*\*\*

а заканчивается строкой

\*\*\*\*\*

Обычно достаточно убедиться в том, что количество потерянных при расчете траекторий (ERROR ENDS OF PATH) не слишком велико. В нашем случае таких траекторий две, что является приемлемым. Наличие более 10 таких ошибок указывает на наличие каких-то проблем с расчетной моделью.

. . .

```
0 RESERVE
2 ERROR ENDS OF PATH
0 MIRROR REFLECTIONS
```

. . .

### 5.6.5. Качественное обсуждение результатов

В первую очередь рассмотрим эффективный коэффициент размножения нейтронов  $k_{eff}$ . Согласно оценке по столкновениям он равен  $0,9621 \pm 0,0004$ . Такое значение  $k_{eff}$  показывает, что наша модель реактора подкритична при управляющих стержнях, введенных наполовину. Отметим, что при однопроцессорном расчете значения, выдаваемые для данной оценки транспортным и регистрационным модулями, совпадают.

Выведем управляющие стержни полностью из активной зоны и посмотрим, как изменится  $k_{eff}$ . Для этого в исходных данных достаточно изменить только значение переменной ZSHR, определяющей положения центров нижнего основания элементов решетки, моделирующих управляющие стержни.

EQU ZSHR=104.4

Полученное при полностью извлеченных стержнях значение  $k_{eff}$  составит  $0,9895 \pm 0,0005$ . Удаление поглотителя из активной зоны ожидаемо увеличило  $k_{eff}$ .

Полученное значение  $k_{eff}$  плохо согласуется с результатами, приведенными в [4]. Это объясняется тем, что в нашей модели отсутствуют верхний и нижний отражатели, а вместо этого задана утечка, то есть та часть нейтронов, которая должна была вернуться в активную зону, теряется безвозвратно. Влияние утечки на результат можно легко продемонстрировать, заменив граничные условия на основаниях контейнера с полного поглощения (B) на зеркальное отражение (M) или трансляцию (T), что сделает нашу модель бесконечной по оси OZ.

CONT T T B

В результате получим ожидаемый рост  $k_{eff}$  с  $0,9895 \pm 0,0005$  до  $1,2025 \pm 0,0005$ .



Перейдем к результатам расчета для первой энергетической шкалы.

Поскольку для всех управляющих стержней мы задали разные номера регистрационных зон, можно сравнить значения скорости реакции поглощения в разных стержнях. Можно предположить, что скорость поглощения в центральном стержне будет меньше, чем в окружающих, поскольку для того, чтобы быть поглощенным в центральном стержне, нейтрону необходимо избежать поглощения в окружающих. Распределение скорости реакции поглощения в управляющих стержнях регистрационного объекта 37 показано на рис. 5.9, с указанием погрешности, соответствующей трем стандартным отклонениям. С одной стороны наше предположение подтверждается, с другой же стороны большое значение погрешности не позволяет сделать надежный вывод. Следует продолжить расчет до достижения приемлемой статистической погрешности.

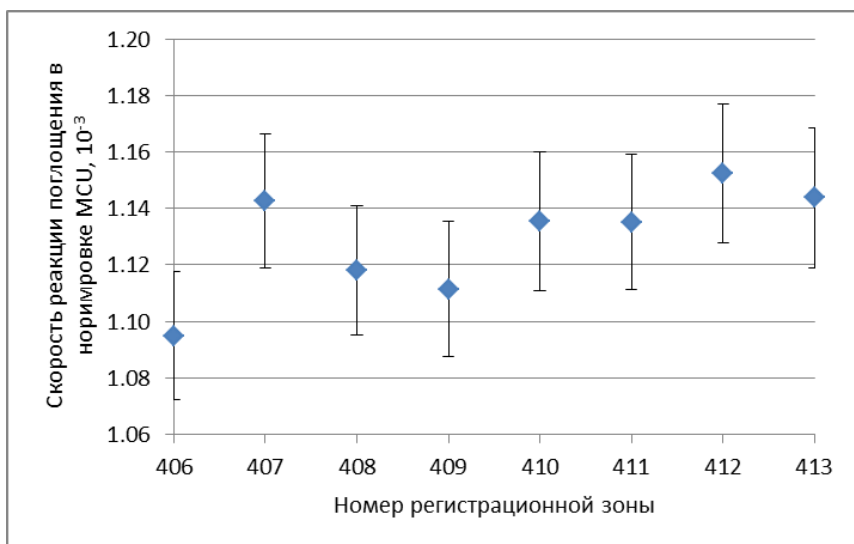


Рис. 5.9. Распределение скорости реакции поглощения по управляющим стержням

Аналогичным образом мы поступили с тепловыделяющими сборками МОХ, поэтому можно построить картину распределения скорости реакции деления по тепловыделяющим элементам тепловыделяющей сборки. Для этого нужно воспользоваться возможностями MCU Office, например, используя команду Insert Data (Color). На рис. 5.10 приводится пример отображения скорости деления в регистрационном объекте 26 с регистрационными зонами с 279 по 405 (Upper Left X=89, Y=14, Z=50; Bottom Right

X=99, Y=3, Z=50; Screen Vertical Direction Vector X=0, Y=1, Z=0; Region=Zones). При этом в файле данных оставлены только результаты для указанных регистрационных зон.

Из получившегося рисунка видно, насколько неравномерно распределяется деление по сборке. Это обусловлено ее положением в активной зоне. Слева от рассматриваемой сборки находятся такие же МОХ сборки, нейтроны деления из которых создают значительно больший приток нейтронов в рассматриваемую сборку, чем сборки зоны высокого обогащения справа.

Это, в свою очередь, можно продемонстрировать, построив точно также распределение скорости реакции деления по всем тепловыделяющим сборкам активной зоны, используя результаты, полученные для регистрационных объектов (Upper Left X=0, Y=125, Z=50; Bottom Right X=145, Y=0, Z=50; Screen Vertical Direction Vector X=0, Y=1, Z=0; Region=Objects). На рис. 5.11 рассмотренная выше сборка выделена окружностью. При этом необходимо учесть, что объем обрезанных границами модели тепловыделяющихборок (регистрационные объекты 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 17, 31, 45, 69, 80, 90, 100, 109, и 117) в два раза меньше объемов остальных регистрационных объектов.

Вторая энергетическая шкала позволяет нам исследовать распределение потока и скоростей реакций по энергетическим группам. Для этого может оказаться удобным добавить в файл bn600.DAT карту NRET:

```
NAMV BN600
MAXS 1000
DTZM 10
BETA
FINISH
RGS 1 0
PTYPE 1
END
PTYPE 1
END
NRET 4312
FINISH
```

Число 4312 означает, что при печати таблиц в первую очередь (1) будет меняться энергия (E), а в последнюю (4) – нуклид (N). Таким образом, мы получим удобные для изучения распределения по энергиям таблицы.

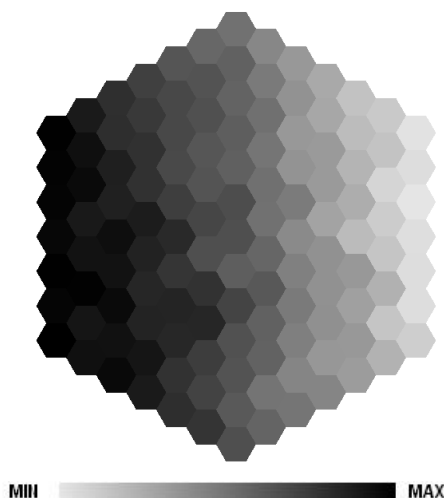


Рис. 5.10. Распределение скорости реакции деления по тепловыделяющей сборке МОХ с регистрационными зонами с 279 по 405

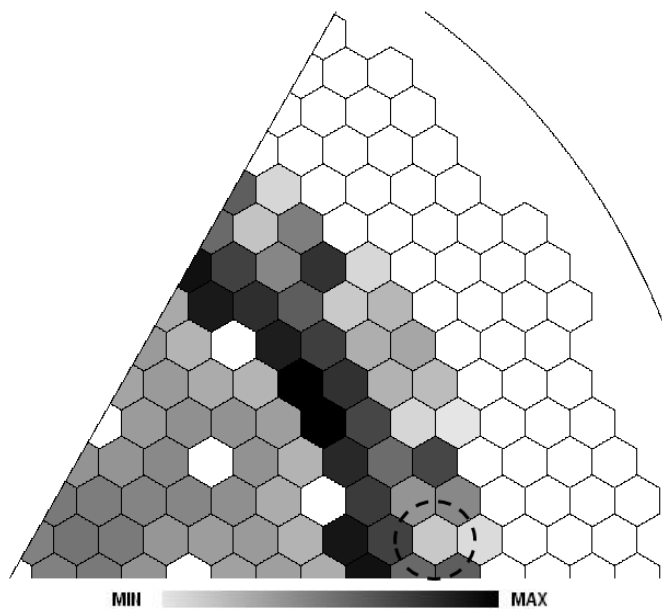


Рис. 5.11. Распределение скорости реакции деления по тепловыделяющим сборкам

В качестве примера рассмотрим скорость реакции деления по всем изотопам регистрационного объекта 18, то есть одной из топливных сборок внутренней зоны малого обогащения (LEZ1).

NUCLIDE:	MIXT, REACTION:	18, OBJECT:	18
Energy	Mean	StdDev	
0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
1.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	
1.00000E+01	9.01218E-07	3.33553E-07	
1.00000E+02	2.31893E-04	4.51045E-06	
1.00000E+03	7.84376E-04	6.08484E-06	
1.00000E+04	1.70772E-03	8.07296E-06	
1.00000E+05	1.77521E-03	8.48832E-06	
1.00000E+06	1.16447E-03	7.56016E-06	

Из таблицы видно, что в этом объекте деление отсутствует в области энергии менее 10 эВ, а преобладает в области от 0,01 до 1 МэВ.

Второй блок PTYPE-END, а также регистрация потоков в материалах были добавлены в исходные данные исключительно с целью проиллюстрировать на примере разницу между оценками по пробегам и по столкновениям.

Если сравнить полученные результаты расчета потока для материала 10, то можно увидеть, что для второго блока, использующего оценку по столкновениям, значение потока нейтронов в области пространства, занятой этим материалом, равно нулю. В то же время в первом блоке, который использует оценку по пробегам, соответствующее значение потока составляет  $1,590 \pm 0,004$ .

Объясняется такая разница просто. Материал 10 состоит из ядер кислорода, но имеет настолько малую плотность, что фактически в этой области пространства нашей модели вакуум. Вероятность для нейтрона столкнуться с ядром кислорода в этом материале ничтожно мала, а поскольку столкновений не происходит, то не происходит и регистрации. Однако, все нейтроны, вылетающие через боковую поверхность стальной защиты до того, как покинуть модель через поверхность контейнера, обязательно пролетают через область пространства, занятую материалом 10. Иными словами, для каждого такого нейтрона в материале 10 существует пробег. Поэтому оценка по пробегу и дает ненулевой результат. На практике она используется довольно часто, особенно если требуется набирать статистику в областях с малыми объемом или плотностью.

### **Список использованной литературы**

1. Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 156 с.
2. Третьяков Ю.Д., Дайнеко В.И., Казимирчик И.В., Кеслер Я.А., Олейников Н.Н. Химия. Справочные материалы. М.: Просвещение, 1984. – 239 с.
3. International Handbook of Evaluation Criticality Safety Benchmark Experiments. NEA/NSC/DOC (95)03, September 2010 Edition.
4. BN-600 Hybrid core benchmark analyses, IAEA-TECDOC-1623, 2009.

## Указатель примеров

Пример 1.1. Вода.....	5
Пример 1.2. Топливо.....	6
Пример 1.3. Водный раствор борной кислоты.....	8
Пример 2.1. Основы комбинаторного описания геометрии.....	10
Пример 2.2. Движение тел .....	15
Пример 2.3. Решетка .....	17
Пример 2.4. Задание кассеты с помощью решетки.....	22
Пример 2.5. Задание кассеты с помощью двумерной сети .....	37
Пример 2.6. Задание кассеты с помощью сети, когда стержни не помещаются в ячейки.....	44
Пример 2.7. Использование симметрий .....	50
Пример 2.8. Решетка, содержащая сети .....	63
Пример 2.9. Решетка, содержащая сети с условными указателями ....	73
Пример 3.1 Точечный источник.....	84
Пример 3.2. Точечный источник с заданным спектром .....	85
Пример 3.3. Точечный моноэнергетический источник .....	85
Пример 3.4 Точечный источник средствами сложного источника .....	86
Пример 3.5 Источник нейтронов, распределенный по объему активной зоны .....	88
Пример 3.6. Контейнер RCZD.....	90
Пример 3.7. Реперный вектор .....	95
Пример 3.8. Комбинация двух примитивных источников .....	98
Пример 3.9. Плоский источник нейтронов из девяти частей .....	100
Пример 3.10. Пример использования решетки источников .....	104
Пример 4.1. Нормировка на мощность .....	107
Пример 4.2. Дозиметрические реакции.....	108