

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
(НИЦ «Курчатовский институт»)
Курчатовский комплекс перспективной атомной энергетики
(ККПАЭ)

УДК 621.039.51...17
Инв. № 119.3- отч-26
от « 12 » февраля 2026 г.

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ККПАЭ

_____ К.Ф. Раскач
« _____ » _____ 2026 г.
МП

**РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ
ПС «КМС (ВЕРСИЯ 1.0)»**

Руководитель ОФМЭ ККПАЭ

В.Д. Давиденко

Ответственный исполнитель,
начальник ЛМРЭ ОСИ ОФМЭ ККПАЭ

М.В. Иоаннисиан

Москва 2026 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

| | | |
|--|-------|-----------------|
| Начальник лаборатории ЛМРЭ ОСИ ОФМЭ ККПАЭ, к.ф.-м.н | _____ | М.В. Иоаннисиан |
| Начальник ЛДАЭС ОИТ ОФМЭ ККПАЭ, к.ф.-м.н | _____ | В.И. Белоусов |
| Главный научный сотрудник ОФМЭ ККПАЭ, д.ф.-м.н. | _____ | М.И. Гуревич |
| Старший научный сотрудник ЛМРЭ ОСИ ОФМЭ ККПАЭ, к.т.н. | _____ | И.И. Дьячков |
| Старший научный сотрудник ЛМРЭ ОСИ ОФМЭ ККПАЭ, к.ф.-м.н. | _____ | М.Р. Малков |
| Старший научный сотрудник ЛМРЭ ОСИ ОФМЭ ККПАЭ, к.т.н. | _____ | А.Н. Писарев |
| Нормоконтролёр ведущий инженер ОФМЭ ККПАЭ | _____ | Н.В. Мазурина |

РЕФЕРАТ

Отчёт 137 с., рис. 21, табл. 11, источн. 33, прил. 5.

«Руководство пользователя программы КМС (версия 1.0), предназначенной для расчёта стационарных и нестационарных процессов в ядерных энергетических установках на основе методов Монте-Карло»

Цель работы – описание-руководство взаимодействия пользователя с программой КМС, предназначенной для моделирования расчёта нейтронно-физического стационарного и нестационарного процессов в ядерных энергетических установках на основе методов Монте-Карло.

Ключевые слова: отчёт, руководство пользователя, расчётные коды, алгоритмы нейтронной кинетики, Монте-Карло, нейтронная кинетика, адиабатическое приближение, эффективная доля запаздывающих нейтронов, время генерации нейтронов, приближение точечной кинетики, многозонное приближение, матрица делений, прямое моделирование, расчёт мощности, непрерывное распределение плотности, визуализация данных.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

| | | | |
|--|--|--|------------------|
| а.з. | – активная зона; | | |
| БФОД | – библиотеки файлов оценённых данных; | | |
| БОЯД | – библиотека оценённых ядерных данных; | | |
| ИР | – исследовательский реактор; | | |
| НИЦ | – научно-исследовательский центр; | | |
| ООП | – объектно-ориентированное программирование; | | |
| ОС | – операционная система; | | |
| ПК | – программный комплекс; | | |
| ПО | – программное обеспечение; | | |
| ПС | – программное средство; | | |
| ФОЯД | – файлы оценённых ядерных данных; | | |
| ЭВМ | – электронно-вычислительная машина; | | |
| ЯЭУ | – ядерная энергетическая установка; | | |
| API | – интерфейс | прикладного | программирования |
| (англ. Application Program Interface); | | | |
| ENDF | – библиотеки | оценённых | ядерных данных |
| (англ. Evaluated Nuclear Data File); | | | |
| KMC | – Курчатовский Монте-Карло | (англ. Kurchatov Monte Carlo); | |
| LCG | – линейный конгруэнтный генератор | (англ. Linear Congruential Generator); | |
| MPI | – интерфейс передачи сообщений | (англ. Message Passing Interface). | |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|--|
| Обозначения и сокращения | 4 |
| Введение | 7 |
| 1. Описание программы КМС | 9 |
| 1.1 Архитектура программы КМС | 9 |
| 1.2 Общая схема расчёта..... | 17 |
| 1.3 Вспомогательный модуль ENV | 18 |
| 1.3.1 HDF-файл | 18 |
| 1.3.2 Преимущества HDF-файла..... | 19 |
| 1.4 Модуль параллельных очередей частиц PPQ..... | 20 |
| 1.5 Взаимодействие физического модуля с файлами библиотек | 20 |
| 2. Сведения о библиотеках констант | 21 |
| 3. Содержание комплекса..... | 22 |
| 4. Установка КМС..... | 23 |
| 5. Запуск КМС | 24 |
| 5.1 Windows..... | 24 |
| 5.2 Linux | 25 |
| 6. Исходные данные модуля GEO | 26 |
| 6.1 Основные понятия..... | 26 |
| 6.2 Описание простой системы..... | 28 |
| 6.2.1 Заголовок..... | 29 |
| 6.2.2 Секция граничных условий..... | 30 |
| 6.2.3 Секция тел..... | 31 |
| 6.2.4 Секция зон..... | 45 |
| 6.3 Описание сложных систем..... | 49 |
| 6.3.1 Сети (основные понятия)..... | 53 |
| 6.3.2 Описание прототипа ячейки сети | 54 |
| 6.3.3 Описание сетей основной геометрии | 56 |
| 6.4 Сложные системы | Ошибка! Закладка не определена. |
| 6.5 Описание сложных систем при помощи сетей. | Ошибка! Закладка не определена. |

| | | |
|-------|--|--|
| 6.6 | Описание сложных систем при помощи решёток | Ошибка! Закладка не определена. |
| 7. | Исходные данные модуля PHS | 62 |
| 7.1 | Файл материалов | 62 |
| 7.2 | Задание термализационных матриц | 63 |
| 7.3 | Задание выгорающих изотопов | 64 |
| 7.4 | Копирование материалов..... | 65 |
| 7.5 | Файл настройки библиотеки | 66 |
| 8. | Исходные данные модуля REG | 70 |
| 8.1 | Функционал GENERAL..... | 72 |
| 8.1.1 | Описание функционала | 72 |
| 8.1.2 | Схема задания исходных данных | 73 |
| 8.2 | Функционалы REGTYPE..... | 76 |
| 8.2.1 | Описание карт, используемых в функционалах REGTYPE | 78 |
| 9. | Исходные данные модуля RRS..... | 94 |
| 9.1 | Создание внешнего источника..... | 94 |
| 9.2 | Форма источника..... | 97 |
| 9.3 | Спектр источника | 101 |
| 9.4 | Направление источника..... | 102 |
| 10. | Исходные данные модуля TRA | 107 |
| 11. | Системные требования | 109 |
| | Список использованных источников | 110 |
| | Приложение А | 116 |
| | Приложение Б | 119 |
| | Приложение В..... | 126 |
| | Приложение Г | 132 |
| | Приложение Д..... | 133 |

ВВЕДЕНИЕ

Программа КМС (версия 1.0) предназначена для получения решения на одноядерных и многоядерных компьютерах как стационарного, так и нестационарного уравнения переноса нейтронов с учётом запаздывающих нейтронов аналоговым методом Монте-Карло [1-2]. В программе реализован аналоговый метод Монте-Карло, который моделирует историю нейтрона на основе файлов оценённых ядерных данных в системах с трёхмерной геометрией в однородной и неоднородной среде.

ПС КМС полностью написана на языке программирования C++ стандарта 2017 года [3] в отличие от ПС КИР [4], в которой были реализованы многие алгоритмы, применяющиеся в КМС. Однако, несмотря на присутствие некоторого заимствования в КМС из КИР, ПС КМС является новым самостоятельным расчётным кодом, т.к. данный код полностью переработан и обновлён по сравнению с программой КИР. Текущая версия программы КМС – это продолжение развития ПС КИР. Однако, в КМС были произведены глубокая модернизация, полная реконструкция и тщательное преобразование алгоритмов, использованных ранее в программе КИР.

Общая отличительная особенность кода КМС от монтекарловских кодов [5-7] аналогичного класса связана с применением ООП. Наличие классов и объектов позволяет упростить понимание расчётного кода и его составляющих, сделать код более гибким и открытым для совершенствования, что облегчает расширение и упрощает поддержку кода. Кроме того, использование ООП упрощает переход с одного языка программирования на другой и воспользоваться объектами из другого языка через программный интерфейс API. Дополнительно можно отметить, что использование ООП ускоряет разработку и поддержку программы.

КМС позволяет выполнять расчёты на многопроцессорных компьютерах. Распараллеливание программ выполнено на базе программного интерфейса MPI, который является наиболее распространённым стандартом

интерфейса обмена данными в параллельном программировании, а его реализации существуют для большого числа компьютерных платформ.

С учётом возможности решения полноценной нестационарной задачи, наряду со стандартными статическими задачами, комплекс существенно расширяет область применения методов Монте-Карло в проектной практике. Ниже перечислены основные прикладные задачи комплекса:

- вычисление эффективного коэффициента размножения нейтронов, распределения энергосвечения и скорости генерации нейтронов деления по ТВС и отдельным твэлам, а также любых нейтронных скоростей реакций по имеющимся библиотекам.
- расчёт эффектов и коэффициентов реактивности;
- моделирование переходных процессов при нормальной эксплуатации и в аварийных режимах работы реактора, вызванных движением органов регулирования или изменением плотности теплоносителя в отдельных областях реактора;
- создание математических бенчмарков для верификации программ инженерного класса.

1. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ КМС

1.1 Архитектура программы КМС

ПС КМС построена с применением современных методов ООП. Программа состоит из модулей, каждый из которых — это объект (класс), взаимодействующий с другими объектами. Названия модулей, их обозначение и назначение приведены в таблице 1. Соответственно, на рисунке 1 показано схематичное взаимодействие этих модулей. Обращение к соответствующему модулю для вызова функций из этого модуля обозначено на схеме сплошными линиями, а предоставление вызова вспомогательных определений, типов и функций из модуля ENV — пунктирными.

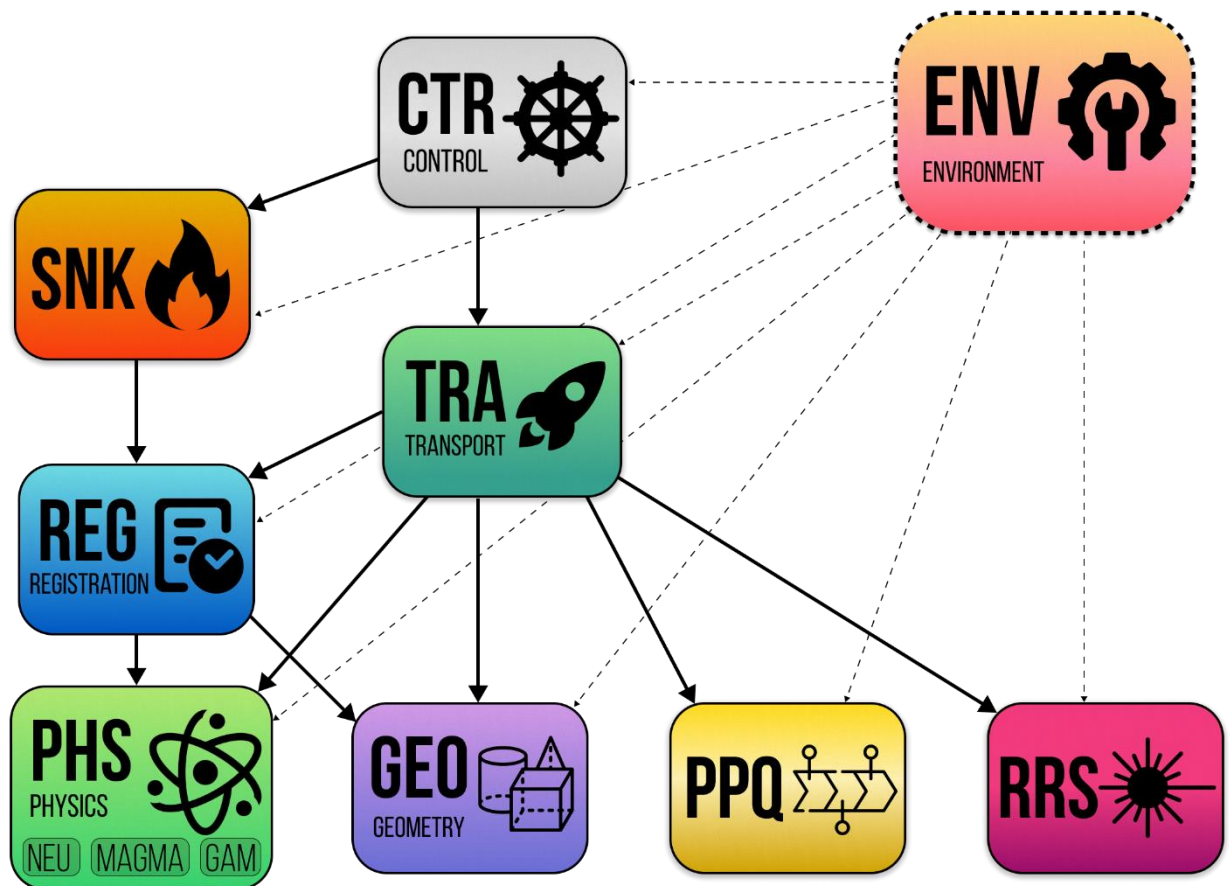


Рисунок 1 – Архитектура программы КМС

Таблица 1. Модули программы КМС.

| Название модуля | Назначение |
|--|---|
| CTR – Управляющий модуль | Control (управление) Обеспечивает возможность автоматического изменения любых параметров в процессе расчёта. |
| ENV – Вспомогательный модуль | Environment (область или окружение, содержащее константы и вспомогательные функции) Содержит платформонезависимые сервисные определения, типы и подпрограммы-функции. |
| GEO – Геометрический модуль | Geometry (геометрия) Моделирование прямолинейных участков траекторий между столкновениями. |
| PHS – Физический модуль | Physics (физика) Розыгрыш ядерного взаимодействия частиц с веществом. Содержит подмодуль MAGMA. Также содержит подмодули частиц: NEU и GAM. |
| PPQ – Модуль параллельных очереди частиц | Parallel Particle Queues (параллельные очереди частиц) Ведение очередей частиц, подлежащих моделированию. |
| REG – Регистрационный модуль | Registration (регистрация) Расчёт функционалов полей излучения. |
| RRS – Модуль реакторного радиационного источника | Reactor Radiation Source (реакторный радиационный источник) Моделирование фазовых координат частиц источника или нейтронов начального поколения при решении задач на критичность. |
| SNK – Модуль нуклидной кинетики | Simulation of Nuclide Kinetics (моделирование нуклидной кинетики) Расчёт изменения нуклидного состава материалов реактора в процессе его эксплуатации. |
| TRA – Транспортный модуль | Transport (транспорт) Моделирование транспорта (траекторий) частиц в системе. |

Во всех модулях эффективно применяется технология inline-программирования (встраивание функций, inline-функции) для ускорения процесса моделирования расчётных задач. Inline-программирование – способ оптимизации, при котором вызов функции заменяется непосредственно её телом в виде машинного кода.

Управляющий модуль (CTR). Организует совместную работу всех модулей КМС, включая ввод исходных данных и вывод результатов. Проводит промежуточные записи данных задачи на диск для возможности продолжения счёта в случае аварийного останова.

Вспомогательный модуль (ENV). Содержит функции и стандартные типы данных, используемые во всех остальных модулях, включая подпрограммы, реализующие ввод/вывод данных. Разработанный модуль содержит библиотеку сервисных подпрограмм и функций:

- датчик псевдослучайных чисел LCG (263 – 63-битный);
- вспомогательные функции библиотеки MPI;
- модуль ввода текстовых данных из файла;
- подпрограммы для работы с файлами HDF5 [9], классы и функции (HDF5 позволяет проводить быстрый ввод/вывод бинарных данных с богатым набором интегрированных высокопроизводительных функций, которые позволяют оптимизировать время доступа и пространство для хранения);
- подпрограммы, функции и классы доступны для применения любым другим модулем и являются платформонезависимыми (Linux / Windows компиляторы GNU).

Геометрический модуль (GEO). Определяет местонахождение частицы, отслеживает её перемещение в пространстве и вычисляет все необходимые функции, аргументами которых служат пространственные координаты [10]. В КМС существенно модифицирован геометрический модуль NCG (Net-Combinatorial Geometry), в частности, для решения задачи кинетики реализованы алгоритмы отслеживания прохождения частицы через границу по временной составляющей и непрерывного моделирования регулирующих стержней (ОР СУЗ). Геометрический модуль позволяет моделировать трёхмерные системы с произвольной геометрией, используя комбинаторный подход, основанный на описании сложных пространственных форм комбинациями простых тел с помощью теоретико-множественных операций пересечения, дополнения и объединения на основе набора типов тел-примитивов. Возможно задание сетей и решёток, которые реализуют размножение комплексных прототипов, состоящих из множества описанных форм и ограниченных внешним телом.

Физический модуль (PHS). Формирует сечения и другие характеристики взаимодействия нейтронов со средой. Модуль позволяет решать задачи, связанные с моделированием стационарных и нестационарных процессов, происходящих в ядерных реакторах, а также задачи радиационной безопасности. В рамках модуля реализовано моделирование нейтронов и фотонов в соответствующих подмодулях NEU и GAM. Также PHS содержит многогрупповой подмодуль MAGMA, который позволяет осуществлять моделирование переноса нейтронов через групповое приближение.

Физический подмодуль NEU. Модуль позволяет моделировать непрерывное изменение энергии нейтрона при столкновениях, а также непрерывную зависимость сечений от энергии. Возможности физического модуля аналогичны программе MCNP 5 [5-6] или Serpent2 [7]. Взаимодействия нейтрона с материалом в модуле PHS описываются на основе библиотеки констант в универсальном формате ACE [11]. Для работы с форматом в модуле реализованы ACE-функции, которые будут использованы для считывания констант других частиц, таких как электрон (бета), гамма и т.п. В состав программы входят библиотеки, сгенерированные из файлов оценённых ядерных данных ENDF/B-VII.1 [12-13] и РОСФОНД [14-16] (диапазон температуры от 273 до 3000 K), а также могут быть использованы данные других известных библиотек: ENDF/B (версии VI-VIII.0) [17], JEFF (версии 3.2, 3.3) [18], JENDLE (версия 4.0) [19] и др. В связи с тем, что библиотека представлена в универсальном формате ACE, имеется возможность расчёта задач на основе этой же библиотеки с применением таких программ, как MCNP [5-6], Serpent [7] и др. Для формирования констант используются распространённая программа NJOY-2012 [20-21] и отечественная программа GRUCON [22-23].

Моделирование осуществляется с учётом температур компонентов среды, так как сечения компонентов с разными температурами могут существенно отличаться. Расчёт сечений по заданным температурам

производится заранее в диапазоне от 273 до 3000 К в зависимости от используемых библиотек оценённых ядерных данных.

Реализованы методы восстановления температурной зависимости сечений на «на лету» в процессе счета: температурно-пропорциональных концентраций (ТПК [24]), позволяющий получать значения сечений по всем областям энергий нейтронов (тепловой, резонансной и быстрой), включая использование термализационных матриц и вероятностных таблиц [25] и метод аппроксимации температурной зависимости нейтронных сечений на основе регрессионной модели полиномов квадратного корня температуры ($P_n(\sqrt{T})$). Разработан модуль подготовки библиотеки коэффициентов полиномов (БКП) для восстановления температурной зависимости сечений в резонансной области. Аналогично для области термализации разработаны алгоритмы аппроксимации рядом полиномов дважды дифференциальных сечений, определяемые законом $S(\alpha, \beta)$. В библиотеках банка данных по алгоритмам получены термализационные файлы данных для воды и графита.

Проведена оптимизация алгоритмов модуля PHS по увеличению быстродействия путём снижения нагрузки на двоичный поиск интервала на основе объединения энергетических сеток в подгруппы и реализации алгоритмов трёхуровневого кэширования сечений.

Важным нововведением является возможность выполнения моделирования задач с использованием аналитических функций, задающих в выбранной материальной среде непрерывную зависимость плотности [26] от пространственных координат.

Физический подмодуль GAM. Модуль реализует моделирование процесса переноса фотонов (γ -частиц) методом Монте-Карло через непрерывное изменение энергии фотона при столкновениях, а также непрерывную зависимость сечений от энергии [27].

Многогрупповой подмодуль MAGMA. Модуль позволяет решать задачи на основе транспортного приближения с использованием метода Монте-Карло. Исходные данные для этого модуля готовятся как на основе

программы UNK [28-30], так и с использованием прецизионного модуля **PHS**. Результаты, полученные из физического модуля **MAGMA**, могут быть использованы в качестве бенчмарков для верификации нейтронно-физических программ.

Модуль параллельных очередей частиц (PPQ). Хранит рождающиеся частицы, подлежащие моделированию, позволяет быстро их извлекать из конца или начала очередей. Существует возможность создавать множественные очереди частиц произвольного типа, которые могут участвовать в реализации параллельного расчёта.

В программе КМС был реализован Параллельный Алгоритм Франк-Каменецкого (ПАФК) для поддержания размера пакета частиц в методе поколений [31]. Данный алгоритм применяется для «объединённого массива» источника нейтронов деления со всех процессов, задействованных для MPI-расчёта. Также в модуле банка частиц разработаны методы параллельной нормировки, балансировки размера пакета MPI-процесса в соответствии со скоростью счёта и перекрёстной пересылки массивов фазовых параметров частиц между процессами. Использование алгоритма позволяет эффективно, гибко и надёжно задействовать вычислительные ресурсы локальных вычислительных кластеров или суперкомпьютеров.

Регистрационный модуль (REG). Включает подмодули, обеспечивающие расчёт следующих функционалов:

1. **General** – общие функционалы, такие как $K_{эфф}$ и параметры уравнения точечной кинетики для адиабатического приближения: эффективная доля запаздывающих нейтронов, эффективное время генерации нейтронов, параметр Росси-Альфа;
2. **Iteration** – функционалы для итерационных задач, например, выход на критику варьированием состава материалов;
3. **Kinetic** – функционалы для расчёта нейтронной кинетики прямым методом Монте-Карло;

4. **STD (Standard)** – стандартные функционалы для расчёта стационарных и нестационарных процессов (усреднённые характеристики по интервалам следующих типов: временным, энергетическим, пространственным и т.д.);
5. **Thermal** – для расчёта энерговыделения при решении задач с обратной связью по теплогидравлическим параметрам;
6. **User** – функционалы, которые добавляются самостоятельно пользователем;
7. **MPK** – функционалы для расчёта нейтронной кинетики методом многозонного приближения;
8. **MAGMA** – функционалы для описания физических свойств среды на основе транспортного приближения в рамках физического модуля MAGMA (P1-приближение);
9. **Bound** – функционалы потока или тока на границах геометрических зон;
10. **Burn** – функционалы для модуля выгорания.

Для расчёта параметров уравнения точечной кинетики используется три метода класса IFP (Iterated Fission Probability) [32]: Усачёва-Гурвица, блоки без перекрытия (ББП) (аналог MCNP [5-6]) и блоки с перекрытием (БСП) (аналог Serpent [7]).

Модуль реакторного радиационного источника (RRS). Моделирует фазовые координаты частиц источника, в том числе для начального пакета нейтронов при решении стационарной (на $K_{эфф}$) и нестационарной (нейтронная кинетика и неоднородная задача с внешним источником) задач.

Для решения задач ввода реактивности в критическое состояние реактора прямым методом Монте-Карло реализован генерирующийся составной источник нейтронов, состоящий из фазовых координат присутствующих в системе нейтронов [33] и фазовых координат ядер-предшественников запаздывающих нейтронов в момент времени $t = 0$. Распределение источника нейтронов задано соотношением (1), а

распределение ядер-предшественников задано соотношением (2). Фазовые координаты разыгрываются в ходе решения условно-критической задачи.

$$N(\mathbf{r}, E, \Omega) = \frac{\Phi(\mathbf{r}, E, \Omega)}{\nu(E)} \quad (1)$$

$$C^{nucl,d}(\mathbf{r}) = \int_E dE \int_{|\Omega|=1} d\Omega \frac{\nu^{nucl,d}(\mathbf{r}, E) \Sigma_f(\mathbf{r}, E)}{\lambda^{nucl,d}} \Phi(\mathbf{r}, \Omega, E) \quad (2)$$

Модуль нуклидной кинетики (SNK). Используется для решения задачи нуклидной кинетики (процесс выгорания). Изначально модуль был разработан в рамках программного комплекса UNK [8]. В настоящее время модуль модифицирован, распараллелен и адаптирован под программу КМС. Библиотека модуля включает в себя данные по выходам продуктов деления, периодам полураспада нестабильных нуклидов, каналам переходов в результате распада или нейтронного взаимодействия. Библиотечный набор данных обеспечивает расчёт источников энерговыделения в результате распада нестабильных нуклидов, а также спектров, образующихся в процессе распада гамма-квантов.

Транспортный модуль (TRA). Осуществляет организацию моделирования отдельных траекторий частиц в случае решения стационарной и нестационарной задачи. Модуль обеспечивает связь между геометрическим, физическим и регистрационными модулями и проводит моделирование траекторий частиц, а в случае нейтронной кинетики – моделирование развития цепочки нейтронов от прародителя. Модуль реализован с применением inline-функций.

Реализованы алгоритмы неаналогового моделирования кинетики нейтронов на основе нормализации числа частиц на заданном временном интервале с применением русской рулетки / расщепления. Алгоритмы используются для расчёта систем с высоким уровнем изменения мощности (до 10^9), при котором происходит переполнение банка в случае аналогового моделирования.

1.2 Общая схема расчёта

Программа КМС предназначена непосредственно для выполнения расчётов задач нейтронного переноса. Взаимодействие с программой осуществляется через входные и выходные текстовые файлы в соответствии с рисунком 1.

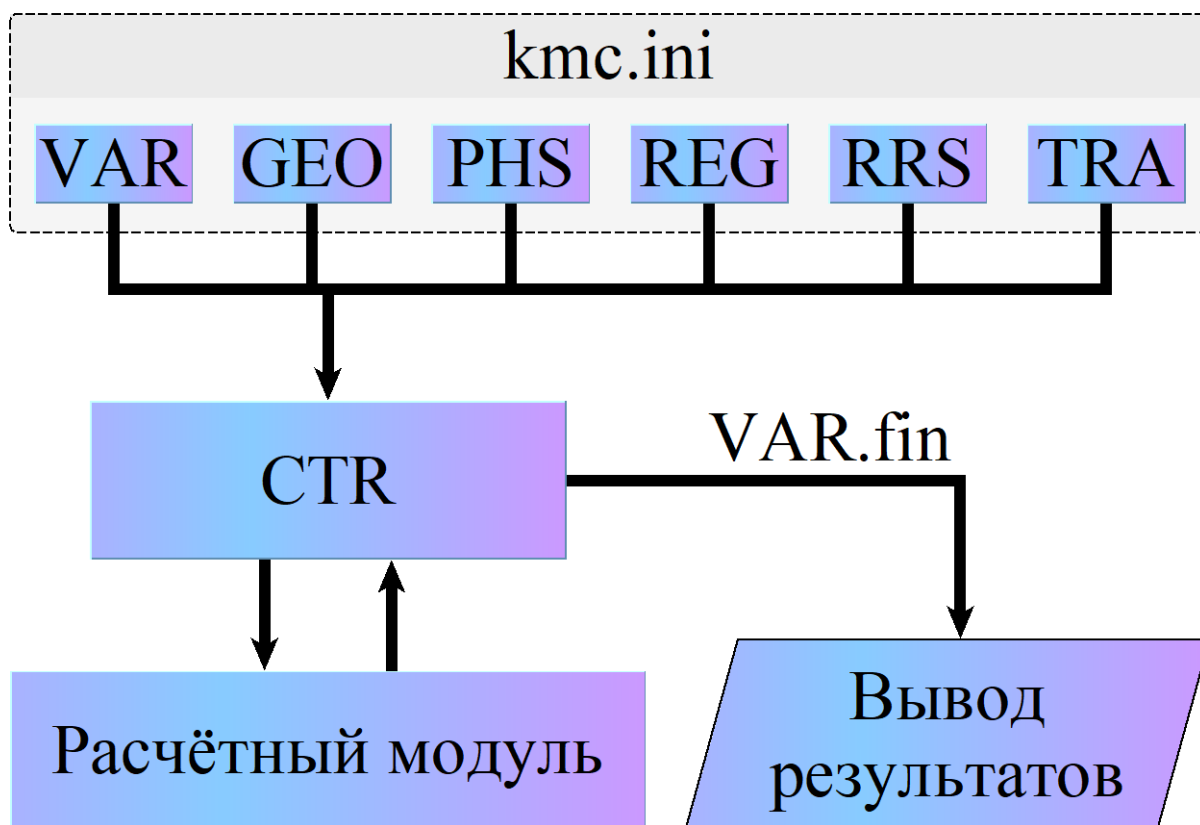


Рисунок 2 – Схематическое представление взаимодействия модулей программы КМС

На рисунке-схеме 2 введены следующие обозначения:

kmc.ini – файл настройки задачи (предназначен для передачи имени «Файла задачи» и файлов модулей);

CTR – управляющий модуль (п. 1.1);

GEO – геометрический файл (п. 6);

PHS – физический файл (п. 7);

REG – регистрационный файл (п. 8);

RRS – файл источника (п. 0);

TRA – транспортный файл (п. 10);

VAR – имя «Файла задачи»;

VAR.fin – файл результата решения поставленной задачи (обозначается именем «Файла задачи» с расширением “.fin”).

Управляющий модуль CTR осуществляет корректное считывание данных из файлов модулей с последующим поступлением их в соответствующие вычислительные модули программы КМС (GEO, RRS, TRA, REG, PHS), которые на схеме обозначены под обобщающим названием «Расчётный модуль». Расчётный модуль осуществляет взаимодействие с управляющим модулем и производит поиск решения поставленной задачи. Решение, полученное в процессе счёта задачи, поступает в управляющий модуль, после чего производится «Вывод результатов». Пример файла настройки задачи “kmc.ini” приведён в п.5.

Архитектура КМС разработана на основе современных методов ООП и состоит из модулей. Необходимо подчеркнуть, что каждый модуль программы КМС – это объект, взаимодействующий с другими объектами. Для создания каждого модуля в программе применяются классы C++ (стандарт 2017 [3]), которые описываются и подчиняются всем законам ООП.

1.3 Вспомогательный модуль ENV

Модуль вспомогательных определений, типов и функций (ENV) содержит сервисные подпрограммы и функции: датчик псевдослучайных чисел, подпрограммы ввода/вывода, подпрограммы работы с файлами HDF5 [9], классы и т.п. Подпрограммы, функции и классы доступны для применения любым другим модулем и являются платформонезависимыми.

1.3.1 HDF-файл

HDF – название формата файлов, разработанного для хранения большого объёма цифровой информации. Первоначально был разработан Национальным центром суперкомпьютерных приложений, сейчас поддерживается некоммерческой организацией HDF Group.

HDF5 – современная версия формата, в которой для индексации используются *Б-деревья* (*B-trees*). Б-дерево (или Би-дерево) – структура

данных, дерево поиска. С точки зрения внешнего логического представления, сбалансированное, сильно ветвистое дерево. Часто используется для хранения данных во внешней памяти. Использование Б-деревьев для хранения данных впервые было предложено ещё в 1970 году. Сбалансированность означает, что длины любых двух путей от корня до листьев различаются не более, чем на единицу. Ветвистость дерева – это свойство каждого узла дерева ссылаться на большое число узлов-потомков. С точки зрения физической организации Б-дерево представляется как мультисписочная структура страниц памяти, то есть каждому узлу дерева соответствует блок памяти (страница). Внутренние и листовые страницы обычно имеют разную структуру.

1.3.2 Преимущества HDF-файла

Далее указываются основные преимущества, которыми обладает HDF.

Гетерогенные данные. Библиотека поддерживает n-мерные наборы данных, и каждый элемент в наборе данных может сам по себе быть сложным объектом.

Упрощённый обмен данными. Библиотека является портативной, не требует привязки к поставщику данных и представляет собой формат файла с самоописанием, т.е. все данные и метаданные могут передаваться в одном файле.

Кроссплатформенность. Программная библиотека, которая работает на различных вычислительных платформах (от ноутбуков до систем с массовым параллелизмом) и реализует высокоуровневый API с интерфейсами C, C++, Fortran-90, Python и т.д.

Быстрый ввод/вывод. Ввод-вывод с богатым набором интегрированных высокопроизводительных функций, которые позволяют оптимизировать время доступа и пространство для хранения.

«Большие данные». Нет ограничений на количество или размер объектов данных в коллекции, что обеспечивает большую гибкость для больших объёмов данных.

Компрессия данных. Библиотека позволяет хранить и обрабатывать данные в упакованном виде, оптимизируя пространство, занимаемое этими данными.

1.4 Модуль параллельных очередей частиц PPQ

Модуль параллельных очередей частиц (PPQ) хранит рождающиеся частицы, подлежащие моделированию, а также позволяет быстро их извлекать из конца или начала очереди. Существует возможность создавать множественные очереди частиц произвольного типа, которые могут участвовать в реализации параллельного расчёта.

1.5 Взаимодействие физического модуля с файлами библиотек

Необходимую для проведения расчёта информацию о сечениях реакций (обычных и дважды дифференциальных) физический модуль берет из файлов библиотек формата ACE. Возможно использование как с ACE-файлов в исходном текстовом формате, так и ACE-файлов, преобразованных в формат HDF (для преобразования из текстового ACE-формата в бинарный формат HDF разработана специальная программа, которая прилагается к физическому модулю). При работе с форматом HDF происходит значительно более быстрое считывание данных ACE-файла в оперативную память. Физический модуль считывает массив данных, из файла в один непрерывный блок памяти. Затем создаются необходимые для работы физического модуля объекты, каждый из которых копирует из блока необходимую ему информацию. После чего блок удаляется.

2. СВЕДЕНИЯ О БИБЛИОТЕКАХ КОНСТАНТ

В состав программы входит библиотека *ENDF/B VII.1* [12] (диапазон температур от 273 K до 3000 K). Благодаря тому, что библиотека представлена в универсальном формате *ACE*, имеется возможность проведения расчёта задач на основе этой же библиотеки с использованием других программ, например, *MCNP* [5] и др. Для формирования констант используется распространённая программа *NJOY-2012* [20] и отечественная разработка *GRUCON* [22].

Библиотека включает в себя данные по выходам ПД, периодам полураспада нестабильных нуклидов, каналам переходов в результате распада или нейтронного взаимодействия. Библиотечный набор данных (Таблица 2) обеспечивает расчёт источников энерговыделения в результате распада нестабильных нуклидов, а также спектры гамма-квантов, образующихся в процессе распада.

Таблица 2. Состав банка данных КМС

| Название библиотеки | Описание |
|---------------------|--|
| ENDF/B-VII.1 | Основная библиотека сечений взаимодействия нейтронов с ядрами в эпитепловой области энергий в поточечном представлении, полученная. |
| LIB UNK | Библиотека, используемая при моделировании нуклидной кинетики (выгорание) |

3. СОДЕРЖАНИЕ КОМПЛЕКСА

В существующей версии программы имеются следующие каталоги:

KMC – корневой каталог всего комплекса. В нём находится запускающая программа *kmc.exe* и рабочие файлы.

В каталоге *PROGRAMS* находятся все вычислительные и служебные программы комплекса.

В каталоге *LIBRARY* находятся следующие библиотеки:

в подкаталоге *KMC_lib* – библиотека UNK для программы KMC.

Вспомогательные каталоги:

TEST – тестовые задания и результаты расчётов (Приложение А "Описание тестовых заданий и результатов расчётов");

DOC – документация

"Руководство пользователя KMC (версия 1.0)" и

"Руководство пользователя Визуализатор KMC (версия 1.0)"

Библиотека ENDF/B-VII.1 представлена отдельно на четырёх дисках.

4. УСТАНОВКА КМС

Для установки программы «КМС» необходимо записать на жёсткий диск компьютера, с прилагаемого CD-диска, USB носителя или иного устройства, весь набор каталогов и находящихся в них файлов с сохранением структуры каталогов. Комплекс готов к работе после записи.

По умолчанию, на носителе находятся исполняемый файл программы КМС – *kmc.exe* для ОС Windows (*kmc.bin* для ОС Linux) и каталоги библиотеки оценённых ядерных данных *ENDF/B-VII.I*. При копировании каталогов требуется запомнить пути их размещения на жёстком диске. В дальнейшем путь к исполняемому файлу будет обозначаться как *КМС_EXE_PATH* (для ОС Windows рекомендуется объявить переменную среды с таким именем), а путь к библиотеке – *PATH_LIB*.

Использование с CD-диска или иного устройства с неразрешённой на него записью не допускается.

5. ЗАПУСК КМС

При запуске любого расчёта по программе КМС необходимы следующие файлы (по умолчанию):

- Файлы kmc.exe (kmc.bin) – программа КМС.
- Файл kmc.ini (можно передать в виде первого параметра программы любой текстовый файл данного формата).

Пример содержания файла kmc.ini:

```
VAR godiva  
GEO godiva.ncg  
RRS rrs.inp  
TRA tra.inp  
REG reg.inp  
PHS physics.dat
```

5.1 Windows

Для запуска расчёта необходимо запустить исполняемый файл КМС двойным щелчком правой кнопкой мыши. Данный метод запустит расчёт в однопроцессорном режиме. Перед запуском необходимо установить пакет программ «Microsoft MPI» из дистрибутива на диске.

Более корректно создать скрипт для запуска программы.

Для запуска программы через скрипт в однопроцессорном режиме создайте bat-файл (например, «kmc.bat»), в котором разместите команду:

```
КМС_EXE_PATH %1
```

При запуске скрипта (bat-файла) программа *КМС* может находиться по любому удобному для пользователя пути на файл – *КМС_EXE_PATH*, но в данном случае в bat-файле требуется задать путь к программе.

Для запуска программы в многопроцессорном режиме требуется также создать скрипт, в котором необходимо разместить следующую команду:


```
"%MSMPI_BIN%mpiexec.exe" -n N kmc.bat %1
```

N – необходимое количество используемых процессоров, MSMPI_BIN – переменная окружения, устанавливается автоматически с пакетом «Microsoft MPI».

Данный файл сначала запускает скрипт для однопроцессорного режима (bat-файл), который в свою очередь запускает программу КМС в многопроцессорном режиме.

5.2 Linux

Для запуска программы в операционной системе Linux, требуется создать скрипт (например, «mpi_kmc.sh»), который будет содержать следующие строки команд:

```
#!/bin/bash
rm -f *.hdf
rm -f *.lst
rm -rf REG
rm -rf LST
export LD_LIBRARY_PATH=$HDF5_LIBS_STATIC:$LD_LIBRARY_PATH
ulimit -s unlimited
ulimit -v unlimited
mpirun -np N ~/bin/kmc.bin
```

N – необходимое количество используемых процессоров.

Переменная HDF5_LIBS_STATIC содержит путь на библиотеки HDF.

При запуске скрипта (bash-файла) программа *КМС* может находиться по любому удобному для пользователя пути на файл – *КМС_EXE_PATH*, но в данном случае в bash-файле требуется задать путь к программе.

Если необходимо произвести запуск на кластере, то в командной строке введите:

```
sbatch mpi_kmc.sh
```

Скрипт «mpi_kmc.sh» для кластера должен быть дополнен соответствующими командами SBATCH.

6. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ МОДУЛЯ GEO

В данном разделе описываются правила задания исходных данных для геометрического модуля GEO.

Геометрический модуль GEO определяет местонахождение частицы, отслеживает её перемещение в пространстве и вычисляет все необходимые функции, аргументами которых служат пространственные координаты [9]. В программе КМС используется усовершенствованный подход по разработке и развитию геометрического модуля GEO.

Геометрический модуль программы КМС позволяет моделировать трёхмерные системы с произвольной геометрией, используя комбинаторный подход, основанный на описании сложных пространственных форм комбинациями простых тел с помощью теоретико-множественных операций пересечения, дополнения и объединения на основе определённого набора типов тел-примитивов. Возможно задание сетей и решёток, получаемых путём размножения некоторых исходных элементов, заданных с помощью комбинаторики.

В дальнейшем, необязательные секции и параметры файла исходных данных будут обозначаться квадратными скобками '[...]'.

6.1 Основные понятия

В модуле GEO для описания геометрии используется декартова система координат. Начало системы координат и ориентация осей в пространстве могут быть выбраны произвольно в зависимости от удобства пользователя. Эту систему координат будем называть *глобальной*. При создании многоуровневой (сложной) геометрии отдельные элементы могут быть описаны в *локальных* системах координат, которые отличаются от глобальной системы точкой начала координат.

В модуле GEO реализован комбинаторный способ задания геометрии с помощью тел.

Простейшими геометрическими областями являются так называемые *тела*: шары, параллелепипеды, цилиндры и другие. Каждое тело

характеризуется своим типом и набором параметров, которые определяют его точные размеры и расположение в пространстве. Например, для шара такими параметрами являются положение его центра и радиус.

Для описания конкретной системы используется конечное число тел, к которым применяются три операции теории множеств: дополнение, пересечение и объединение. Это позволяет создавать достаточно сложные формы.

Конечная область пространства, в которой производится расчёт, называется *контейнером системы*. Она разбивается на конечное число областей, называемых *геометрическими зонами* или просто зонами. Эти зоны строятся из тел с помощью упомянутых выше операций.

Любая точка системы входит только в одну геометрическую зону (исключением являются точки границ зон). Геометрическая зона считается гомогенной, то есть однородной по своим свойствам. В частности, это означает, что любая зона состоит из одного материала.

Каждой геометрической зоне присваивается номер соответствующего материала, называемый *материальным номером*. Под *материальной зоной* понимается совокупность всех точек с одним материалом. Очевидно, что материальная зона составляется как набор геометрических зон, взятых целиком. Отдельные части материальной зоны могут не иметь общих границ.

Для работы регистрационного модуля контейнер системы разбивается на два независимых набора областей, называемых *регистрационными зонами* и *регистрационными объектами*. Любая регистрационная зона или регистрационный объект составлены из одной или нескольких геометрических зон, и каждая геометрическая зона входит в одну регистрационную зону, а также в один регистрационный объект. Номер регистрационной зоны, к которой принадлежит данная геометрическая зона, называется её *регистрационным номером*, а номер соответствующего регистрационного объекта – *объектным номером*.

На поверхности контейнера необходимо задать граничные условия, которые определяют реакцию геометрического модуля на вылет частицы из этого контейнера. Считается, что вся внешняя граница может быть разделена на несколько поверхностей, и в пределах одной поверхности установлено одно граничное условие. Типичными граничными условиями являются: трансляция, зеркальное отражение, белое отражение, утечка и так далее.

Расчёт всегда осуществляется в конечной области пространства. При необходимости выполнить расчёт в бесконечной области, вычисления ведутся в конечной части области, а бесконечность описывается с помощью граничных условий зеркальной симметрии или трансляции (переноса).

Таким образом, чтобы описать геометрию системы, необходимо задать:

- все геометрические зоны, которые в совокупности составляют всю систему;
- соответствие материальных, регистрационных и объектных номеров геометрическим зонам;
- граничные условия на внешней поверхности системы.

Описание данных для задания геометрии представляет собой последовательность строк текстового файла, заканчивающуюся строкой с символами «FINISH» в первых 6 позициях.

Ввод и обработка фрагмента с данными для модуля производится программными средствами стандартного ввода.

6.2 Описание простой системы

Описание простой системы состоит из последовательности предложений. Некоторые предложения объединены в секции. Порядок секций строго фиксирован и имеет следующий вид:

<заголовок>
<секция граничных условий>
<секция тел>
END
<секция зон>
END
FINISH

6.2.1 Заголовок

Заголовок состоит из одного предложения:

HDNW [<целое число 1>[<целое число 2>[<целое число 3>]]]

Обязательной в этом предложении является только метка «HDNW».

<целое число 1> принимает значения 0, 1, 2, 3, 4 (значение по умолчанию равно 1):

0 – отсутствие печати на вводе;

1 – печать вводимых строк;

2 – то же, что 1, и остановка после ввода;

3 – то же, что 1, и печатаются таблицы тел и зон в памяти;

4 – то же, что 3, и остановка после ввода.

<целое число 2> – отвечает за управление трассировкой (значение по умолчанию есть 0), обозначим его Nt:

Nt = 0 – отсутствие трассировки;

Nt > 0 – выдача первых Nt точек трассировки, затем трассировка выключается;

Nt = -1 – трассировка на протяжении всего времени моделирования;

Nt < -1 – выдача -Nt первых точек трассировки, затем происходит остановка задачи.

<целое число 3> – задаёт количество дополнительных позиций, отводимых под списки поиска (значение по умолчанию равно 400). Если при счёте возникает сообщение диагностики «NO PLACE FOR LIST», то для

ускорения счёта можно увеличить это значение. На результатах моделирования это изменение не отражается.

6.2.2 Секция граничных условий

Секция граничных условий состоит в задании контейнера, в котором определены тела системы, и условий на поверхностях этого контейнера.

Контейнером служит первое тело в секции описания тел. В качестве контейнера можно использовать тела: SPH, RPP, HEX, RCZ, BOX (см. 6.2.3).

Контейнер задаётся одним предложением:

CONT <список граничных условий> [S<угол>[<угол>]] PRS<угол>[<угол>]]

<список граничных условий> состоит из столькох фрагментов, сколько имеется граничных поверхностей у тела, выступающего в роли контейнера.

Каждый фрагмент имеет следующую структуру:

В или W[<вероятность>] или M[(<вероятность>)] или C[<вероятность>] или T.

Описание:

<вероятность> – это действительное число, принадлежащее интервалу (0; 1) и задающее вероятность отражения. В противном случае происходит поглощение частицы. Если вероятность не задана, то считается, что происходит отражение.

В – все вылетающие частицы поглощаются («чёрная» граница).

W – «белое» отражение, при котором поток отражённых на границе частиц считается изотропным по направлениям, а градиент потока перпендикулярен нормали. Рассмотрим сферическую систему координат (t, f) с полюсом, соответствующим внутренней нормали, где t – полярный угол, а f – азимутальный. Тогда для отражённых частиц $\cos^2(t)$ имеет равномерное распределение на отрезке [0; 1], а f – на единичной окружности. В скобках может быть указана вероятность отражения, если некоторая доля долетающих до границы частиц поглощается.

M – зеркальное отражение, в скобках может быть указана вероятность отражения, если некоторая доля частиц поглощается.

С – белое цилиндрическое отражение, допустимое на боковой поверхности вертикального цилиндра. При таком отражении z-компонента направления полёта не меняется, а x и y компоненты соответствуют изотропному в плоскости XOY потоку с градиентом, перпендикулярным внутренней нормали поверхности. Для отражённых частиц синус угла между направлением и внутренней нормалью равномерно распределён на $[-1; 1]$. В скобках может быть указана вероятность отражения, если некоторая доля частиц поглощается.

Т – трансляционная симметрия. Такой тип симметрии можно задавать на всех гранях тел RPP, BOX и HEX и на верхней и нижней гранях тела RCZ. Эта симметрия должна быть задана согласованно на противоположных гранях. Трансляционная симметрия допускается на боковой поверхности тела RCZ, если ось цилиндра совпадает с осью OZ, и на поверхности шара, если центр шара расположен в начале координат. В первом случае граничная точка (a, b, c) переходит в точку (-a, -b, c), а во втором – в точку (-a, -b, -c).

Фрагменты задаются в порядке нумерации граней, приведённом в секции описания тел.

6.2.3 Секция тел

В секции тел последнее кодируется с помощью трёх- или четырёхсимвольного ключа, который указывает на его тип, и набора числовых параметров. Параметры тела следует указывать в том порядке, в котором они перечислены в описании.

После ключа в скобках указано однобуквенное обозначение тела, которое используется только при печати таблицы тел.

Если тело используется как контейнер, то на его границах задаются граничные условия. Граница тела делится на составляющие её поверхности, нумеруемые целыми числами 1, 2, 3 и т.д.. Для каждого типа тела дано разбиение границы на поверхности и их нумерация.

Каждое тело описывается одним предложением вида:

<метка> <имя тела> <параметры>

<метка> определяет тип одного из перечисленных ниже тел в виде трёхсимвольного ключа.

<имя тела> – служит для ссылок на него. Это есть идентификатор, содержащий не более 6 латинских букв и цифр и начинающийся с буквы. В качестве имени тела нельзя использовать идентификаторы U и T, которые имеют специальный смысл.

<параметры> – константы, включая числа или выражения по количеству параметров для данного типа тела. Разделителями служат пробелы или запятые (возможно, вместе с пробелами). Поэтому в выражениях не должно быть внутренних пробелов. В описании тела ARB используется символ '/', обозначающий начало описания граней. Этот символ должен быть окружён пробелами.

Раздел секции тел заканчивается ключевым словом «END».

Далее приводятся описания тел с указанием их типа и используемых параметров, на рисунках 3-15 изображены эти тела.

6.2.3.1 Шар, SPH (S)

Параметры: **C**, **R**.

C – радиус-вектор центра, **R** – радиус шара. Вся граница представляет собой единую поверхность (см. рис. 3).

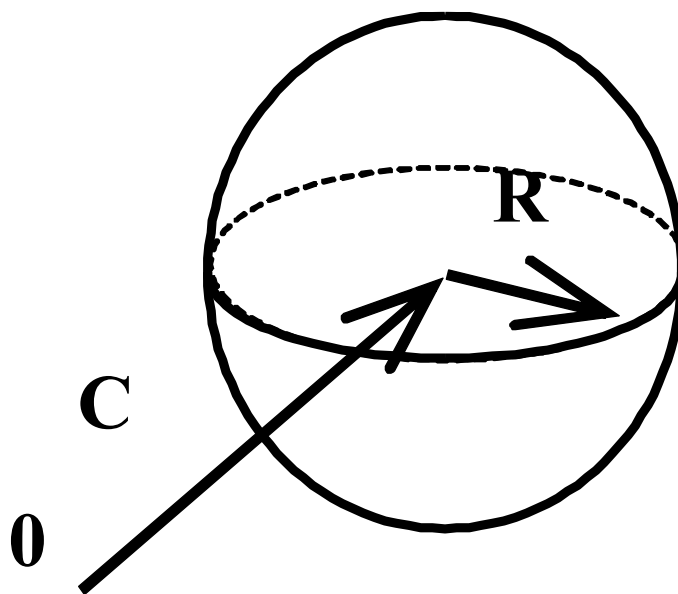


Рисунок 3 – Шар: SPH (S)

6.2.3.2 Правильный круговой цилиндр, RCC (C)

Параметры: C , H , R .

C – радиус-вектор центра одного из оснований. H – вектор, соединяющий центр этого основания с центром другого основания. R – радиус цилиндра (см. рис. 4).

Поверхности: первое основание (номер 1), второе основание (2), боковая поверхность (3).

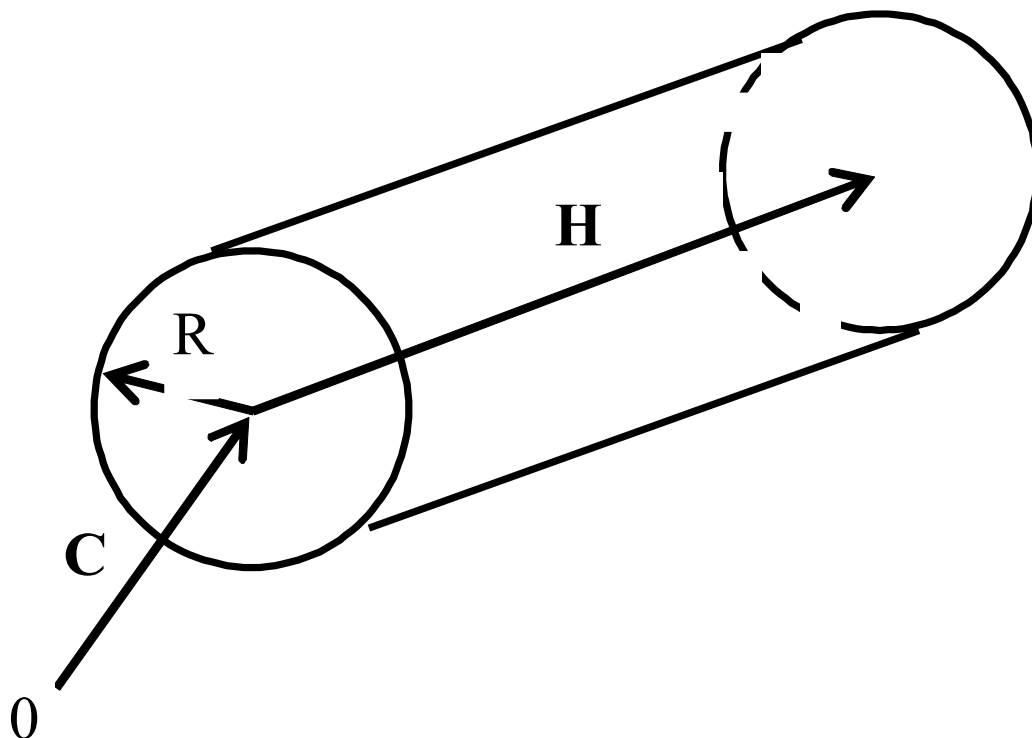


Рисунок 4 – Правильный круговой цилиндр: RCC (C)

6.2.3.3 Эллипсоид вращения, ELL (E)

Параметры: C_1 , C_2 , D . C_1 , C_2 – радиус-векторы фокусов, D – длина малой полуоси. Граница состоит из одной поверхности (см. рис. 5).

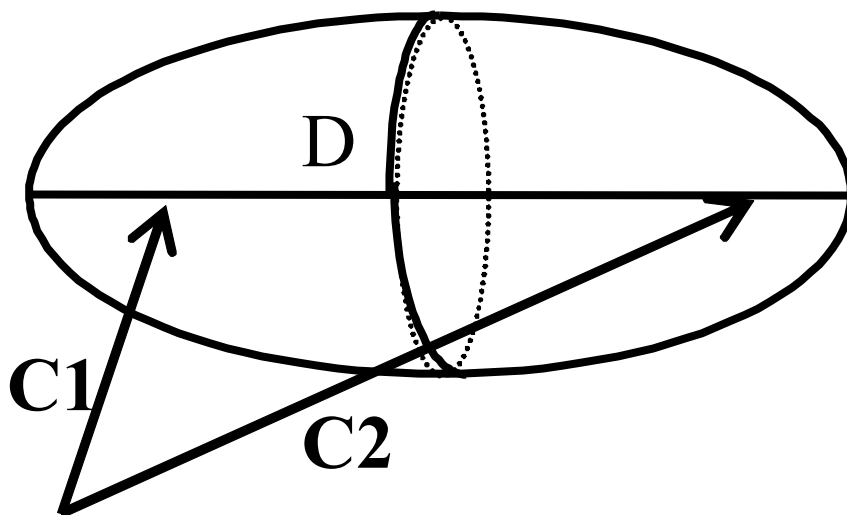


Рисунок 5 – Эллипсоид вращения: ELL (E)

6.2.3.4 Произвольный параллелепипед, BOX (B)

Параметры: \mathbf{B} , \mathbf{P}_1 , \mathbf{P}_2 , \mathbf{P}_3 . \mathbf{B} – радиус-вектор вершины параллелепипеда, \mathbf{P}_1 , \mathbf{P}_2 , \mathbf{P}_3 – векторы, совпадающие по направлениям и длинам с тремя рёбрами, исходящими из \mathbf{B} (см. рис. 6).

Поверхностями служат 6 граней тела, перечисляемые по порядку номеров: грань, содержащая \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_2 ; противоположная грань; грань с \mathbf{P}_2 и \mathbf{P}_3 ; грань с \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_3 ; грань, противоположная третьей; грань, противоположная четвёртой.

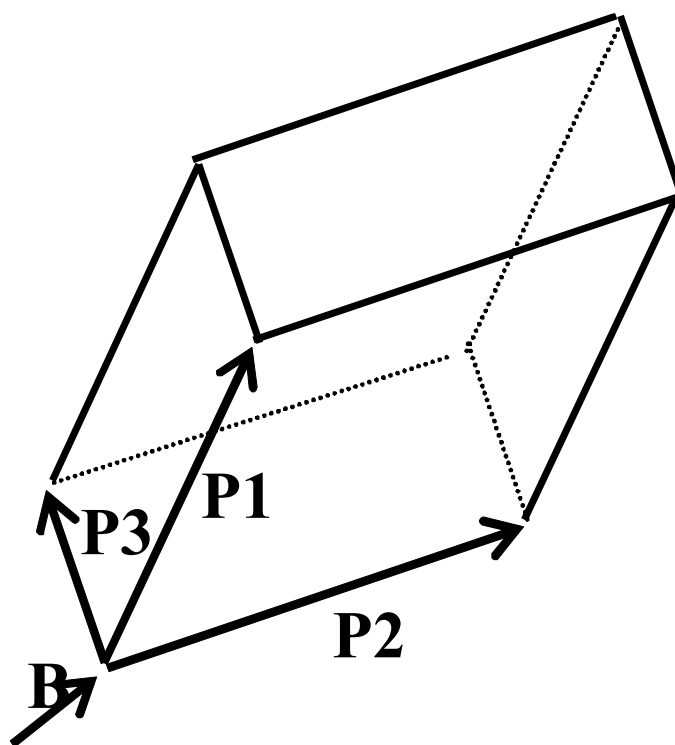


Рисунок 6 – Произвольный параллелепипед: BOX (B)

6.2.3.5 Призма с треугольником в качестве основания, WED (W)

Параметры: \mathbf{B} , \mathbf{P}_1 , \mathbf{P}_2 , \mathbf{P}_3 .

\mathbf{B} – радиус-вектор вершины; \mathbf{P}_1 , \mathbf{P}_2 , \mathbf{P}_3 – рёбра, исходящие из \mathbf{B} , причём \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_2 лежат в основании, а \mathbf{P}_3 параллелен образующей (см. рис. 7).

Поверхностями служат 5 граней тела, перечисляемые по порядку номеров: грань, содержащая \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_2 ; противоположная грань; грань, содержащая \mathbf{P}_1 и \mathbf{P}_3 ; грань параллельная \mathbf{P}_3 ; грань, содержащая \mathbf{P}_2 и \mathbf{P}_3 .

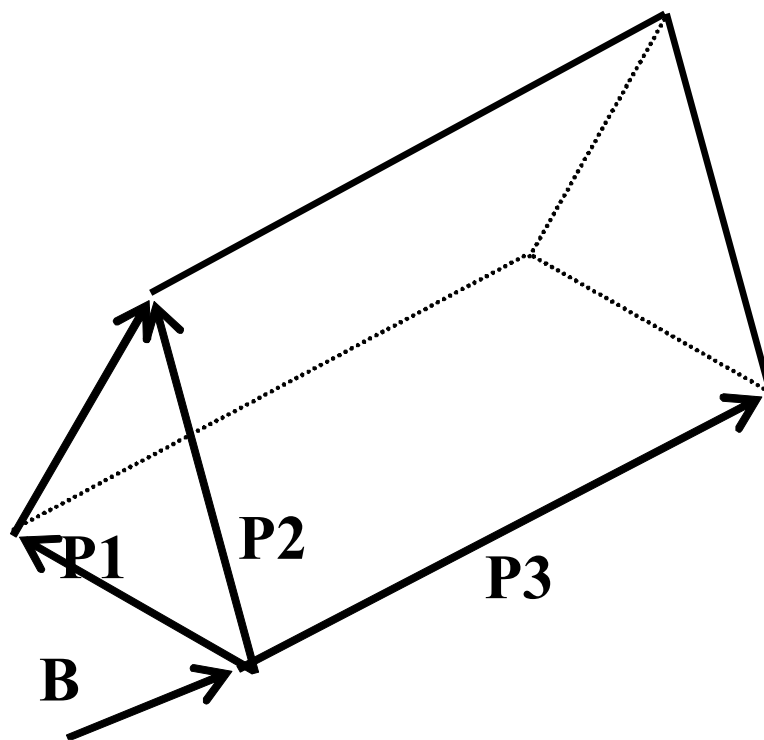


Рисунок 7 – Призма с треугольником в качестве основания: WED (W)

6.2.3.6 Параллелепипед с рёбрами, параллельными осям координат, RPP (P)

Параметры: $X_1, X_s, Y_1, Y_s, Z_1, Z_s$.

Условие: $X_1 < X_s, Y_1 < Y_s, Z_1 < Z_s$. Тело задано неравенствами $X_1 < x < X_s, Y_1 < y < Y_s, Z_1 < z < Z_s$ (см. рис. 8).

Поверхностями служат 6 граней тела, перечисляемые по порядку: $(z=Z_1), (z=Z_s), (x=X_1), (y=Y_1), (X=X_s), (Y=Y_s)$.

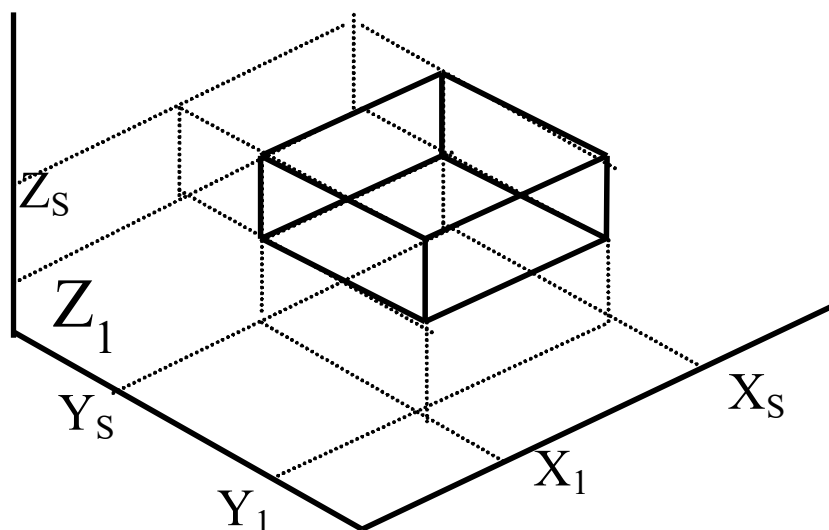


Рисунок 8 – Параллелепипед с рёбрами, параллельными осям координат:

RPP (P)

6.2.3.7 Правильная шестиугольная призма с образующей, параллельной оси OZ, HEX (H)

Параметры: C , V .

C – радиус-вектор центра нижнего основания; V – вектор, соединяющий середину ребра нижнего основания с серединой противоположного ребра верхнего основания. Первые две координаты V задают размер шестиугольника «под ключ» и его поворот в плоскости XOY , а третья координата V – это высота призмы (см. рис. 9).

Поверхностями служат 8 граней тела, перечисляемые по порядку: нижнее основание; верхнее основание; боковая грань, из которой выходит вектор V ; далее идут последовательно грани, полученные из третьей поворотами против часовой стрелки вокруг оси OZ соответственно на 60, 120, 180, 240 и 300 градусов.

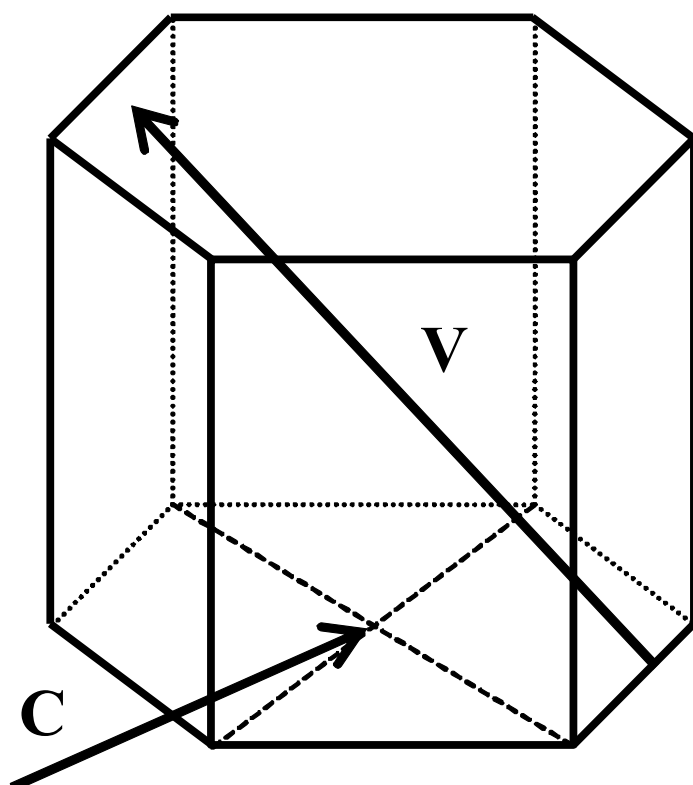


Рисунок 9 – Правильная шестиугольная призма с образующей, параллельной оси OZ: HEX (H)

Имеется ещё два альтернативных способа задания шестигранника.

6.2.3.8 Произвольно ориентированная правильная шестигранная призма, HEXG

Параметры: C , h , d .

C – радиус-вектор центра «нижнего» основания. Слово «нижнее» здесь имеет такой же условный смысл, как для тела RCC. Вектор h – это «высота» призмы. Он идёт от центра «нижнего» основания к центру противоположного основания. Вектор d – это «размер призмы под ключ», также определяющий её поворот вокруг «высоты». Его удобно считать начинающимся в середине ребра «верхнего» основания и идущим к середине противоположного ребра той же грани (см. рис. 10).

Нумерация граней устроена так же, как у тела HEX, получившегося, если призму поместить так, что ось симметрии h будет направлена по оси OZ.

Тело HEXG даёт возможность произвольного движения правильной шестигранной призмы. При необходимости тело HEX преобразуется в тело HEXG.

Тело HEXG может служить контейнером для ячейки сети, что позволяет создавать сети с шестигранными ячейками, которые могут быть ориентированы произвольно.

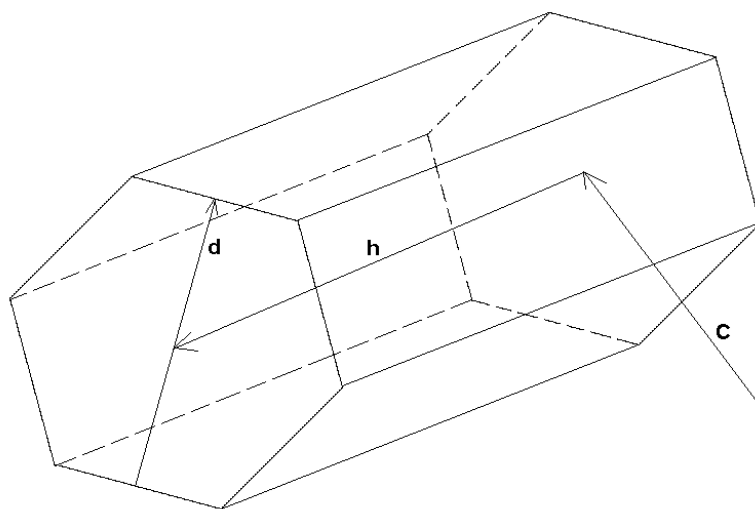


Рисунок 10 – Произвольно ориентированная правильная шестигранная призма: HEXG

6.2.3.9 Прямой круговой цилиндр с образующей, параллельной оси OZ, RCZ (Z)

Параметры: C, H, R.

C – радиус-вектор центра нижнего основания, $H > 0$ – высота, R – радиус цилиндра (см. рис. 11).

Поверхности: нижнее основание, верхнее основание, боковая поверхность.

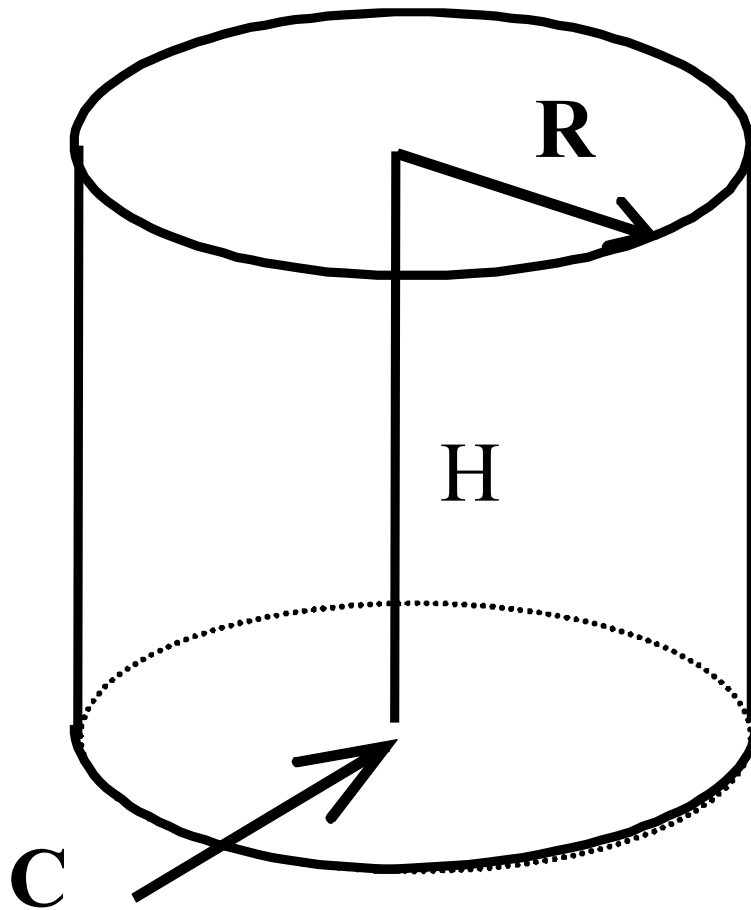


Рисунок 11 – Прямой круговой цилиндр с образующей, параллельной оси
OZ: RCZ (Z)

6.2.3.10 Бесконечный цилиндр, ориентированный по оси X, Y или Z, соответственно, UCX (x), UCY (y), UCZ (z)

Параметры для UCX: Y, Z, R. Y, Z – координаты пересечения оси с плоскостью YOZ, R – радиус.

Параметры для UCY: X, Z, R, а для UCZ – X, Y, R, где первые два параметра задают координаты оси цилиндра. Поверхность одна.

6.2.3.11 Произвольно ориентируемое полупространство, PLG (d)

Параметры: \mathbf{P} , Q. \mathbf{P} – вектор, Q – скаляр. Полупространство задано неравенством: $(\mathbf{P}, \mathbf{x}) \geq Q$. Поверхность одна.

6.2.3.12 Полупространства, заданные плоскостями, перпендикулярными осям координат, PLX (A), PLY (B), PLZ (C)

Параметр PLX: скаляр X_0 . Полупространство определено неравенством $X \geq X_0$. Аналогично, единственный параметр PLY – скаляр Y_0 , а PLZ – Z_0 . Поверхность одна.

6.2.3.13 Слой между двумя параллельными плоскостями, SLA (V)

Параметры: **C**, **P**. **C** – радиус-вектор произвольной точки одной из плоскостей; **P** – вектор, соединяющий **C** с близлежащей точкой второй плоскости (см. рис. 12). Вектор **P** перпендикулярен плоскостям.

Поверхности: плоскость, из которой выходит **P**; противоположная плоскость.

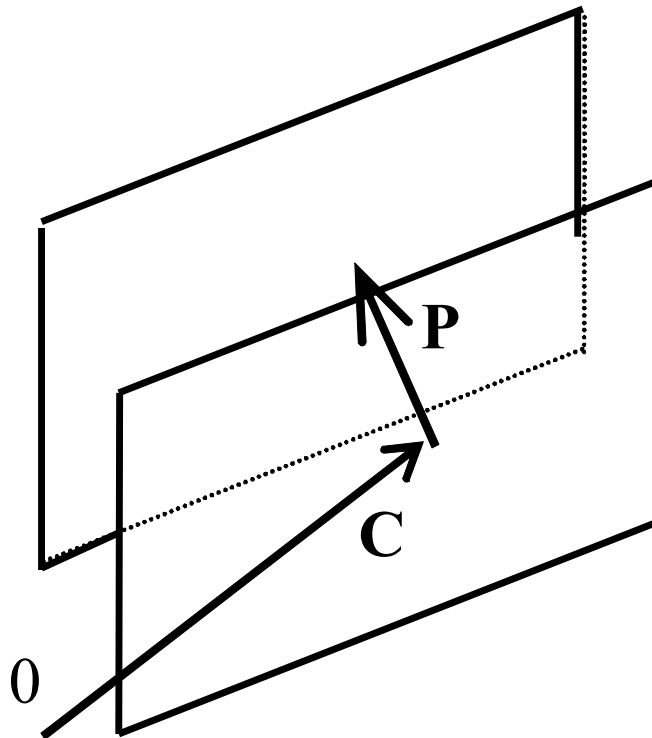


Рисунок 12 – Слой между двумя параллельными плоскостями: SLA(V)

6.2.3.14 Правильный эллиптический цилиндр, REC (O)

Параметры: **C**, **H**, **R₁**, **R₂**. **H**, **R₁**, **R₂** попарно ортогональны и $|\mathbf{R}_1| > |\mathbf{R}_2|$. **C** – радиус-вектор центра нижнего основания; **H** – вектор высоты, определённый так же, как для RCC; **R₁**, **R₂** – большая и малая полуоси эллипса (см. рис. 13).

Поверхности определены так же, как для RCC.

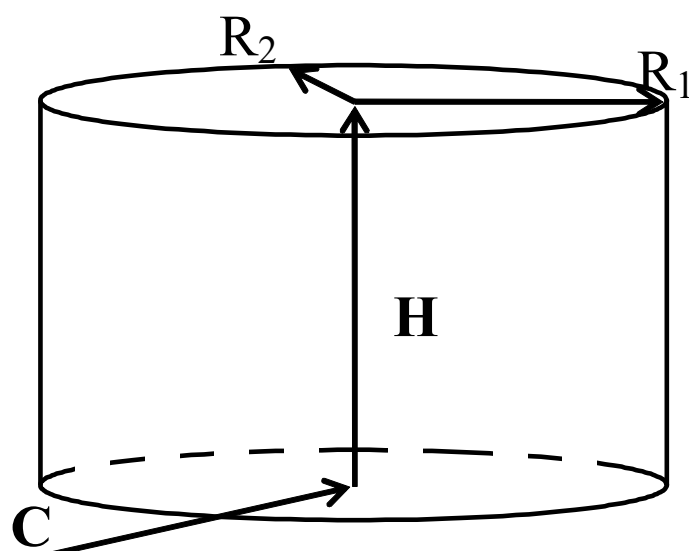


Рисунок 13 – Правильный эллиптический цилиндр: REC (O)

6.2.3.15 Правильный круговой усечённый конус, TRC (T)

Параметры: C , H , R_1 , R_2 .

C – радиус-вектор центра нижнего основания; H – вектор высоты противоположного основания; R_1 – радиус нижнего основания; R_2 – радиус верхнего основания (см. рис. 14).

Поверхности определены так же, как для RCC.

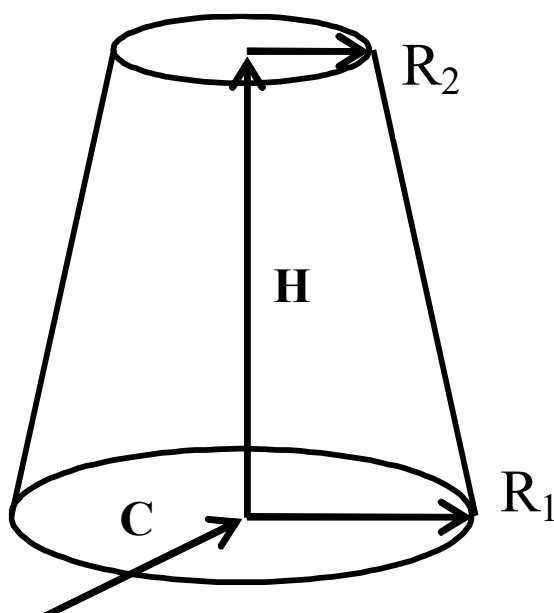


Рисунок 14 – Правильный круговой усечённый конус: TRC (T)

6.2.3.16 Произвольный выпуклый многогранник, имеющий не более 6 граней, ARB (N)

Параметры: $V_1, V_2, V_3, \dots, V_m / M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$.

V_k – радиус-вектор k -ой вершины многогранника (см. рис. 15), что $4 \leq m \leq 8$. M_j – целое число, описывающее j -ю грань, $4 \leq n \leq 6$. Цифры числа M_j есть номера вершин, принадлежащих j -ой грани, которые перечисляются по или против часовой стрелки. Поверхностями служат грани. Первой служит грань, соответствующая M_1 ; второй – M_2 т.д. При описании между последней координатой V_m и M_1 должен стоять символ '/'.

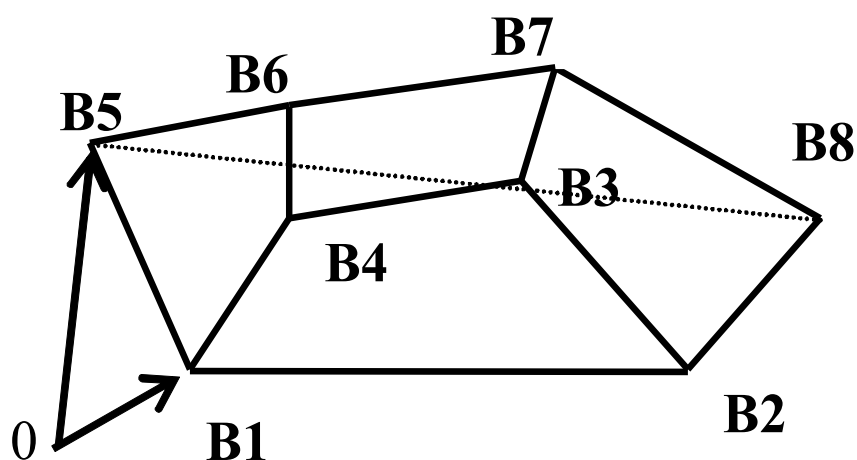


Рисунок 15 – Произвольный выпуклый многогранник, имеющий не более 6 граней: ARB (N)

Пример (египетская пирамида см. рис. 16):

ARB -1,-1,0 1,-1,0 1,1,0 -1,1,0 0,0,4 / 1234,125,235,345,415

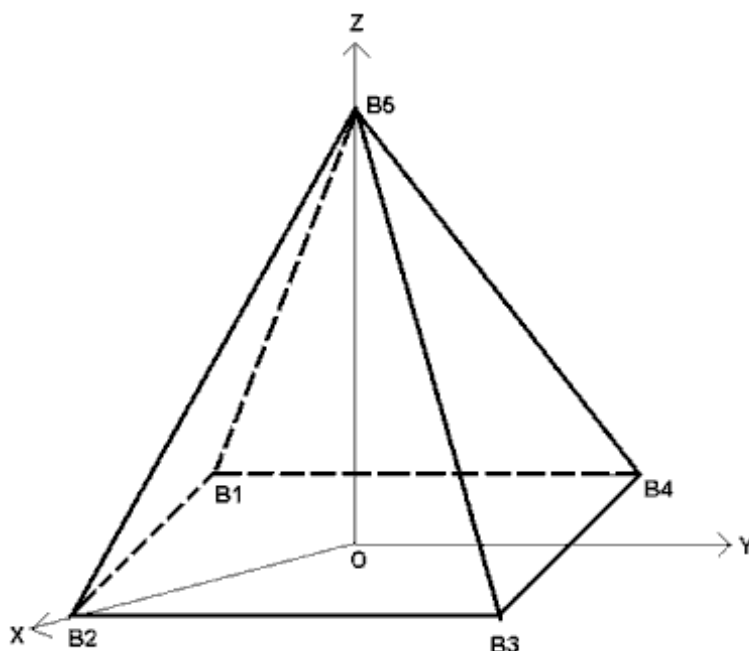


Рисунок 16 – Египетская пирамида

6.2.3.17 Тор, TORE

Параметры C , H , r , a , e .

C – радиус-вектор центра тора (на рис. 17 обозначает начало координат).
 Центр тора – это перпендикулярная проекция центра эллипса на ось вращения.
 H – направление оси вращения. Скаляр r – расстояние от центра тора C до центра эллипса O . В случае правильного кругового тора – это есть большой радиус тора. Скаляр a – длина полуоси эллипса, перпендикулярной оси вращения. В случае правильного кругового тора – это есть малый радиус тора. Скаляр e – отношение длины полуоси эллипса, перпендикулярной оси вращения, к длине полуоси эллипса, параллельной оси вращения, то есть a/b . В случае правильного кругового тора $a=b$ и, следовательно, $e=1$ (см. рис. 17).

У тора имеется только одна поверхность.

Следует учитывать, что при моделировании геометрии с использованием тела то приходится решать уравнения четвертой степени, что снижает скорость счёта.

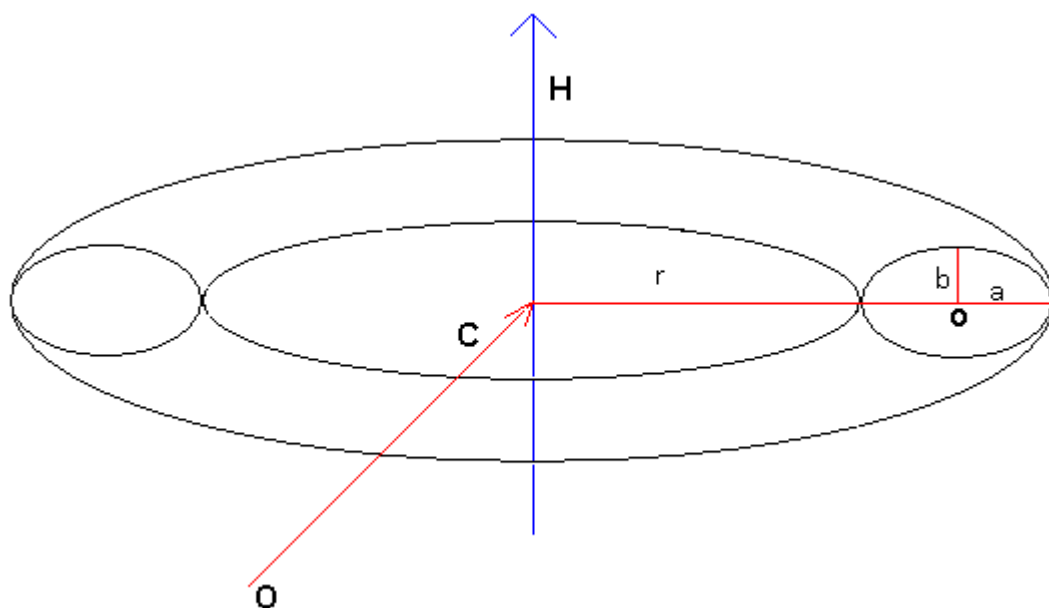


Рисунок 17 – Тор: TORE

6.2.3.18 Примеры задания секции тел

Пример задания секции тел:

```
RPP KOP1 -10,10 -10,10 0,h
RCZ * 0,0,0 h dout*0.5
RCZ tws 0,0,0 h din/2
END
```

6.2.4 Секция зон

Для построения зон используются три известные операции теории множеств: дополнение, пересечение и объединение. Аргументами этих операций служат тела, которые являются трёхмерными областями.

Дополнение области представляет собой совокупность точек, которые не принадлежат этой области. Считается, что все рассматриваемые области замкнуты, то есть содержат свои граничные точки. Поэтому под дополнением понимается совокупность точек, не принадлежащих области, включая её граничные точки. Таким образом, граничные точки принадлежат как самой области, так и её дополнению. Дополнение обозначается *знаком минус без пробела после него*.

Пересечение двух или более областей представляет собой множество точек, которые одновременно принадлежат всем этим областям. Для обозначения операции пересечения не используется специальный знак, а символы областей просто разделяются пробелами.

Объединение двух или более областей определяется как совокупность точек, каждая из которых принадлежит хотя бы одной из этих областей. Объединение обозначается *заглавной латинской буквой U, окружённой пробелами*.

Операция дополнения считается более приоритетной по отношению к операции пересечения. Это означает, что выражения $A - B$ и $-B \ A$ интерпретируются одинаково: как пересечение области A с дополнением области B . Операция пересечения, в свою очередь, предшествует операции объединения. Например, выражение $A \ U \ C \ D$ следует понимать как объединение области A с пересечением областей C и D .

На рисунке 18 серым цветом закрашены области $A \ B$ и $A - B$, соответственно. Выражение $A - B$ можно трактовать как разность: совокупность точек A , не входящих в B .

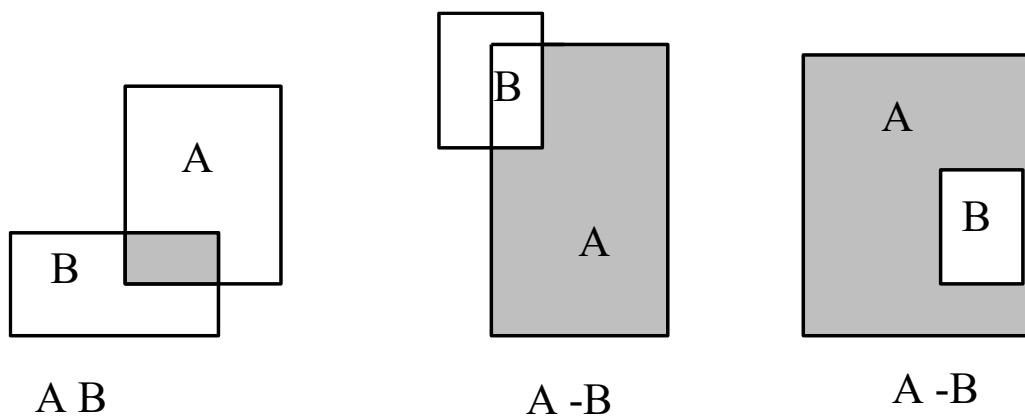


Рисунок 18 – Пересечение тел

На рисунке 19 серым цветом закрашены области $C \ U \ D$ и $C \ U \ F$.

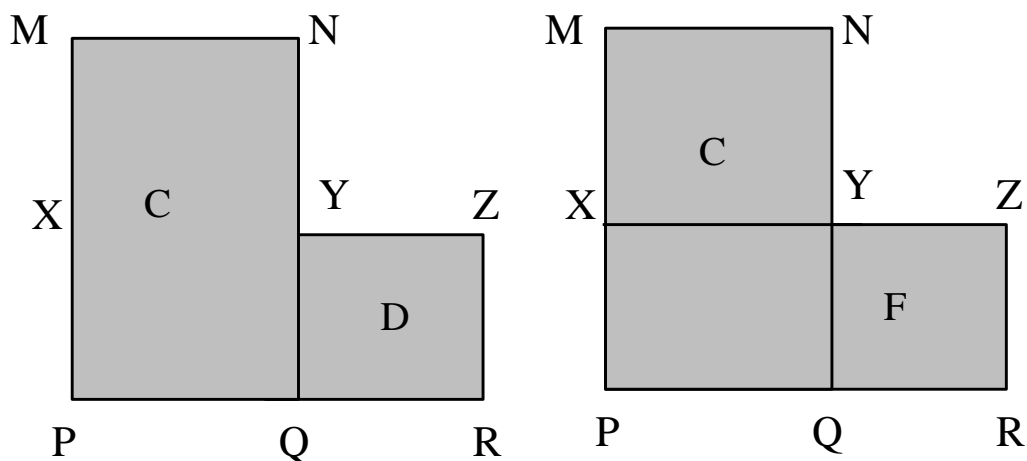


Рисунок 19 – Объединение тел

Отметим, что $C \cup D = C \cup F$, хотя D и F различны: D есть прямоугольник $YZRQ$, а F – $XZRP$. Вариант $C \cup D$ более предпочтителен, так как объединение областей, имеющих общие внутренние точки, приводит к потере быстродействия геометрического модуля.

На рисунке 20 приведены примеры использования всех трёх операций. Серым цветом закрашены результаты.

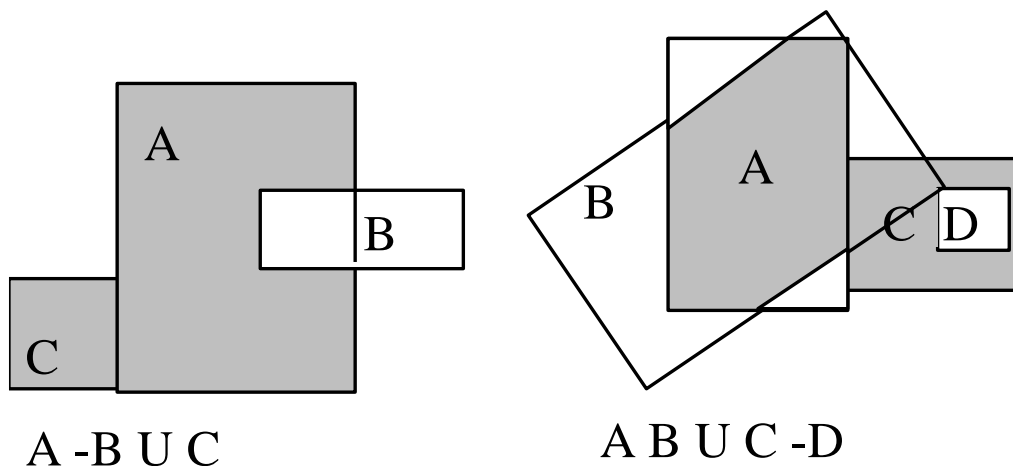


Рисунок 20 – Примеры использования всех трёх операций

Комбинаторное описание позволяет строить достаточно сложные формы. При этом некоторые распространённые геометрические объекты приходится задавать не совсем привычным способом. Например, труба задаётся как пересечение цилиндра с внешним радиусом и дополнения цилиндра с внутренним радиусом.

Часто бывает удобно объединить в одну зону несколько областей, которые не имеют общих точек, даже если учесть граничные точки.

Каждая зона описывается одним предложением в следующем формате:

<имя зоны> [<тип поиска>]<имя тела>[<знак операции> <имя тела>[<знак операции><имя тела >[...]]]<конечный фрагмент>

Раздел описания секции зон завершается предложением «END».

<имя зоны> представляет собой метку предложения, которая служит для ссылки на конкретную зону. Этим именем может быть любой идентификатор, начинающийся с буквы и являющийся последовательностью, которая содержит не более 6 латинских букв и цифр. Все имена зон должны быть различными.

<тип поиска> может принимать следующие значения:

- буква Т означает табличный алгоритм поиска соседних тел для всех тел или их дополнений для данной зоны;
- конструкция вида /<положительное целое число> означает списковый алгоритм с дополнительным увеличением массива списков на указанное число элементов;
- отсутствие параметра означает списковый алгоритм без дополнительного увеличения массива списков.
- Начинаящему пользователю рекомендуется не использовать этот параметр.
- <имя тела> – имя-идентификатор тела, описанного в секции тел, или дополнение к этому телу, если <имя тела> содержит в первой позиции знак минус.

< знак операции> определяет операцию объединения или пересечения.

<конечный фрагмент> определяется следующим образом:

- /<натуральное число 1>:<натуральное число 2>[/<натуральное число 3>]. <натуральное число 1> означает регистрационный номер данной зоны,
- <натуральное число 2> означает материальный номер данной зоны,

<натуральное число 3> означает объектный номер данной зоны. Если <натуральное число 3> на вводе отсутствует, то объектный номер этой зоны принимает умалчиваемое значение, равное единице.

- /<натуральное число 1>[/<натуральное число 3>]

Такая форма употребляется, если данный регистрационный номер уже встречался, и, следовательно, соответствующий материальный номер уже определён. Если регистрационный номер встречался с разными материальными номерами, то выбирается последний из них.

- <натуральное число 2>

Такая форма употребляется, если для зоны не требуется задания регистрационного и объектного номеров. В этом случае их значения будут приняты равными единице.

- /<идентификатор>

Служит для обозначения специальной зоны, задающей краевые условия. Идентификатор означает тип условия, соответствующего пересечению прослеживаемой частицей границы этой зоны. Допускаются следующие типы: В – поглощение, W – белое отражение, М – зеркальное отражение, С – цилиндрическое белое отражение.

- Материальный номер должен быть задан обязательно, остальные номера и атрибуты могут отсутствовать. В случае отсутствия номера зоны или объекта его значение принимается равным единице.

Ниже даётся два примера описания очень простых систем.

Пример 1:

Описана двумерная (бесконечная по высоте) модель ячейки. Ячейка – правильная шестигранная призма с замедлителем. В центре расположен цилиндрический стержень, состоящий из топлива и оболочки, между которыми есть тонкий зазор. Бесконечность вдоль оси OZ задаётся с помощью граничных условий трансляции на торцах призмы. Условие бесконечности решётки шестигранных ячеек задаётся с помощью условия зеркального отражения на боковых поверхностях призмы.

HDNW 3 0 2000

CONT T T M M M M M M

* секция тел, первое тело – контейнер

HEX CONT 0.0 0.0 0.0 1.04 0.0 30.0

RCZ CLAD 0.0 0.0 0.0 30.0 0.50

RCZ GAP 0.0 0.0 0.0 30.0 0.475

RCZ FUEL 0.0 0.0 0.0 30.0 0.47

END

* секция зон

Z01 CONT –CLAD /1:2/1

Z02 CLAD –GAP /2:3/1

Z03 GAP –FUEL /3:4/1

Z04 FUEL /4:1/1

END

FINISH

Материальные номера имеют следующий смысл: 1 – топливо; 2 – замедлитель; 3 – материал оболочки; 4 – воздух.

Пример 2:

Эта модель описывает ту же самую ячейку, но с конечной высотой, то есть имеет трехмерную геометрию. Кроме того, некоторые параметры представлены в виде числовых констант: D1 – диаметр топливной таблетки, Th – толщина воздушного зазора, D2 – внешний диаметр топливного элемента (ТВЭЛ), pitch – шаг решётки, H – высота ТВЭЛ. Особенно полезно использовать числовые константы, когда параметры модели приходится изменять очень часто.

```

HDNW 3 0 2000
CONT T T M M M M M M
EQU H=30.0
EQU D1=1.0
EQU D2=0.94
EQU Th=0.005
EQU pitch=1.04
*      тела
HEX CONT 0.0 0.0 0.0 pitch 0.0 H
RCZ CLAD 0.0 0.0 0.0 H D2*0.5
RCZ GAP 0.0 0.0 0.0 H D2*0.5-Th
RCZ FUEL 0.0 0.0 0.0 H D1*0.5
END
*      зоны
Z01 CONT -CLAD /1:2/1
Z02 CLAD -GAP /2:3/1
Z03 GAP -FUEL /3:4/1
Z04 FUEL /4:1/1
END
FINISH

```

6.3 Описание сложных систем

Существует возможность упростить задание геометрических объектов, имеющих повторяющиеся элементы. Такие объекты можно задавать с помощью сетей и решёток (Приложение Б и В).

Сети позволяют заполнить плотно (или почти плотно) часть пространства ячейками, имеющими одинаковую внешнюю форму.

Описание сложной системы состоит из последовательности предложений, некоторые из которых объединены в секции. Порядок следования этих секций, следующий:

<заголовок>

<раздел граничных условий>

<секция тел>

<секция зон>

[<описание прототипов ячеек сетей>]

[<описание сетей основной геометрии>]

FINISH

Описание прототипов ячеек сетей, прототипов элементов решёток и самих сетей и решёток не обязательно должно быть выполнено в указанном порядке. Однако важно помнить одно правило: к моменту описания сети или решётки все используемые в них прототипы должны быть уже описаны.

<заголовок>, <раздел граничных условий>, <секция тел>, <секция зон>, задаются практически так же, как и для простой системы. Ниже представлены основные отличия.

В сложных системах используется конструкция, определяющая, что зона является зоной-носителем сети. Каждая такая зона описывается одним предложением в следующем формате:

<имя зоны> (<имя сети>) [<тип поиска>] <имя тела>...

[<знак операции> <имя тела> [<знак операции> <имя тела> [...]]] <конечный фрагмент>

Все фрагменты, кроме ранее не использованного (<имя сети>), имеют тот же смысл, что и в случае зоны, описанной для простых систем. Для фрагмента <тип поиска> запрещён тип Т – табличный поиск соседей.

Новый фрагмент, отличающий зону-носитель сети, есть:

(<имя сети>) – идентификатор, который начинается с буквы и содержит не более 6 латинских букв и цифр; определён при описании сети и здесь приводится для ссылки на неё.

Запрещается (!) использовать одну зону в качестве зоны-носителя нескольких сетей.

Пример задания сети:

Z01 [NT] A1 –A2 /5:1/1

6.3.1 Сети (основные понятия)

Структура геометрических данных, связанных с системой координат, имеет два уровня.

Конструкции в целом описываются в глобальной системе координат, которая представляет собой верхний уровень. В системах координат нижнего уровня описываются сети. *Сетью* называются двумерные или трёхмерные массивы ячеек одинаковой формы, которые плотно примыкают друг к другу.

Системы координат нижнего уровня представляют собой локальные системы координат ячеек, которые не зависят от сдвига, как будет описано ниже. Каждая сеть порождает набор систем координат нижнего уровня, количество которых соответствует числу ячеек в сети.

Ячейки в сети могут быть трёх типов:

- произвольный параллелепипед;
- параллелепипед, рёбра которого параллельны осям системы координат;
- правильная шестигранная призма с осью, параллельной оси OZ.

Сеть может быть двумерной или трёхмерной.

6.3.1.1 Двумерная сеть

Двумерная сеть образуется из ячеек с помощью сдвигов вида:

$C + P(i-1) + Q(j-1)$, где i, j – целые числа. Вектор C , называемый *корневым вектором*, задаёт положение в пространстве ячейки с индексами (1,1).

Двумерная сеть образуется из ячеек с помощью сдвигов вида:

- Для параллелепипеда: векторы P и Q являются векторами его первых двух рёбер.
- Для призмы: вектор P лежит в плоскости XOY, имеет длину, равную размеру под ключ, а поворот этого вектора соответствует ориентации призмы; вектор Q получается из вектора P поворотом на 120 градусов против часовой стрелки.

Пример:

Две боковые поверхности призмы параллельны плоскости YOZ, $\mathbf{P} = r\mathbf{l}_x$ и $\mathbf{Q} = -\sin(\pi/6)r\mathbf{l}_x + \sin(\pi/3)r\mathbf{l}_y$, где $\mathbf{l}_x, \mathbf{l}_y, \mathbf{l}_z$ – базисные векторы, а r – размер шестигранника под ключ.

6.3.1.2 Трёхмерная сеть

Трёхмерная сеть образуется из ячеек с помощью сдвигов вида:

$\mathbf{C} + \mathbf{P}(i-1) + \mathbf{Q}(j-1) + \mathbf{R}(k-1)$, где i, j, k – целые числа. Векторы \mathbf{C}, \mathbf{P} определяются так же, как в двумерном случае.

Для параллелепипеда вектор \mathbf{R} соответствует его третьему ребру.

Для призмы вектор \mathbf{R} определён как $h\mathbf{l}_z$, где h – высота призмы.

Индексы i, j, k принимают значения: $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq M, 1 \leq k \leq L$.

Каждая сеть вложена в одну или несколько зон, которые описываются в глобальной системе координат и называются *зонами-носителями сети*.

Когда моделируемая частица пересекает границу зоны-носителя, она покидает сеть и переходит в глобальную систему координат.

Если сеть не заполняет всю свою зону-носитель, она автоматически дополняется фиктивными ячейками, которые заполнены гомогенной средой с атрибутами зоны-носителя.

В двумерной сети все верхние и нижние грани ячеек (торцы) должны совпадать с границей или выходить за пределы зоны-носителя. Это означает, что по этой оси не добавляются фиктивные ячейки.

Зона-носитель может содержать не все ячейки сети или неполные ячейки. Это значит, что она может быть «обрезана» границей.

Все ячейки в одной сети должны иметь одинаковую внешнюю форму, но их внутренняя геометрия может быть совершенно различной.

При использовании сетей снижение быстродействия происходит не так заметно, а затраты памяти становятся существенно меньше, чем при использовании прямого описания.

6.3.2 Описание прототипа ячейки сети

Описание прототипа ячейки сети имеет следующую структуру:

CELL <имя прототипа ячейки сети>

<раздел тел>

<раздел зон>

Первым телом, выступающим в роли контейнера, должно быть либо тело SBOX, либо тело SHEX, либо тело RPP.

<имя прототипа ячейки сети> – это произвольный идентификатор, который начинается с буквы и может содержать не более 6 латинских букв и цифр. Это имя служит для ссылки на данный прототип при задании картограммы сети.

Это имя должно быть уникальным среди имён прототипов ячеек сетей и имён прототипов элементов решёток. Имена констант или имена тел могут совпадать с именами прототипов ячеек сетей.

При описании прототипа ячеек сети могут использоваться константы, определённые ранее. Могут быть определены новые константы, но их имена будут доступны лишь в пределах описания данного прототипа. Если определяемая константа имеет имя, уже использованное при описании глобальной геометрии, то новое значение будет сохраняться только при описании данного прототипа ячейки сети.

Раздел тел ничем не отличается от соответствующего раздела в описании глобальной геометрии (см. 6.2.3).

Нумерация тел ведётся от единицы. В разделе зон необходимо ссылаться только на тела данного описания прототипа.

Для определения регистрационных и объектных номеров, которые зависят не только от зоны прототипа ячейки сети, но и от положения ячейки в зоне-носителе, могут быть использованы условные регистрационные указатели (УРУ) и условные объектные указатели (УОУ). Каждый УРУ или УОУ кодируется отрицательным целым числом.

Перекодировка условных указателей в номера для разных сетей и для разных прототипов ячеек происходит независимо, поэтому *рекомендуется* для каждого прототипа ячейки кодировать эти указатели, начиная с –1.

Пример:

зона в описании прототипа ячейки сети.

ZPE A5 A6 -C /-6:1/-2

имеет условный регистрационный указатель 6, условный объектный указатель – 2, а материальный номер – 1.

Пример:

описание прототипа ячейки сети.

CELL NC

SBOX S 10.0 0.0 0.0 5.0 5.0 0.0 0.0 0.0 3.0

EQU RS=REM*0.5

SPH H 7.5 2.5 1.5 RS

END

ZN1 S -H /4:2/5

ZNTE H /-1:1/-1

END

Предполагается, что константа REM определена в основном блоке. Здесь зона ZN1 имеет «безусловные» регистрационный и объектный номера. Они равны 4 и 5 независимо от положения ячейки в сети.

6.3.3 Описание сетей основной геометрии

Описание сети основной геометрии имеет следующую структуру:

<заголовок>

<картограмма имён прототипов ячеек, заполняющих ячейки сети>

[<картограммы регистрационных номеров>]

[<картограммы объектных номеров>]

END

6.3.3.1 Заголовок

Заголовок состоит из одного предложения вида

NET <имя сети> <корневой вектор> <число столбцов> <число строк> [<число слоёв>]

NET – метка предложения.

<имя сети> – начинающийся с буквы идентификатор, содержащий не более 6 латинских букв и цифр. Оно служит для ссылки на данную сеть при описании её зоны-носителя.

<корневой вектор> – параметр, определённый тремя координатами корневого вектора C_x , C_y , C_z , каждая из которых может быть задана действительным числом, ранее определённым именем константы или выражением, содержащим числа и константы. Координаты должны быть разделены запятыми или пробелами.

<число столбцов> – натуральное число, равное числу сдвигов по первому вектору прототипа ячейки (N).

<число строк> – то же по второму вектору (M).

<число слоёв> – то же по третьему вектору (L).

Первый, второй и третий векторы определяются телом-контейнером ячеек сети. Это тело должно быть одним и тем же для всех прототипов ячеек одной сети.

Если параметр <число слоёв> отсутствует, то сеть определена как двумерная.

6.3.3.2 Картограмма имён прототипов ячеек

Картограмма имён прототипов ячеек сети для двумерного случая задаётся как M предложений, содержащих по N фрагментов каждый, где N – число сдвигов по первому вектору, а M – число сдвигов по второму вектору. Если сеть трёхмерная, то картограмма задаётся послойно, то есть совокупность из M предложений по N фрагментов каждый задаётся L раз, где L – число сдвигов по третьему вектору.

Метками M предложений должны быть идентификаторы, состоящие из латинской буквы T и номера строки, то есть T01, T02, T03,..., T09, T10, T11,... и т.д.

Каждое предложение отвечает одной строке, то есть набору индексов (1,j),..., (N,j), и содержит N фрагментов. Один фрагмент имеет вид:

[–]<имя прототипа ячейки сети>

Знак минус [–] означает, что ячейка не пересекается с границей зоны-носителя сети. Указание, что ячейка не пересекается с границей зоны-носителя сети, несколько увеличивает быстродействие, но требует большой

аккуратности при задании исходных данных. Начинающему пользователю не рекомендуется пользоваться знаком минус.

<имя прототипа ячейки сети> даёт ссылку на прототип, который соответствует данной ячейке и задан при описании прототипа.

Если подряд идут несколько ячеек, имеющих один и тот же прототип, то возможна сокращённая запись с помощью коэффициента размножения <k>.

{k <имя прототипа ячейки сети>}

Описание:

k – это целое число, указывающее количество повторений следующего за ним фрагмента. Целое число k и <имя прототипа ячейки сети> обязательно должны быть разделены двумя пробелами.

Пример:

TO1 {3 0} {3 TVEL} {1 BOR} {3 TVEL} {1 0}

эквивалентно предложению

TO1 0 0 0 TVEL TVEL TVEL BOR TVEL TVEL TVEL 0

Гомогенная ячейка с атрибутами зоны-носителя, которой при необходимости дополняется сеть, кодируется в картограмме символом 0 (ноль).

Порядок предложений в картограмме имён может быть произвольным, поскольку метка предложения содержит номер строки.

Для трёхмерной сети картограмма задаётся послойно. Задаётся L двумерных картограмм размерности NxM, каждая из которых начинается строкой вида:

TLAYER <номер слоя>

<номер слоя> – натуральные числа от 1 до L по порядку.

После этой строки следует M предложений с метками T01, T02, T03,..., T09, T10, T11,.. (Метки повторяются для каждого слоя).

6.3.3.3 Картограммы регистрационных номеров

Условные регистрационные указатели (УРУ) должны вводиться по порядку, желательно без пропусков, начиная с единицы. Для каждого регистрационного указателя должна вводиться своя картограмма. Значения

условных регистрационных указателей локальны в каждом прототипе ячейки. Значения регистрационных номеров помеченных таким образом зон ячеек сети присваиваются в соответствии с картограммой. Это означает, что в разных ячейках в зависимости от их положения в сети одному и тому же УРУ могут соответствовать разные регистрационные номера зон.

Все регистрационные номера, заданные в прототипах ячеек без использования условных указателей, сохраняются во всех ячейках независимо от того, что указано в картограммах. Их перекодировка никогда не производится.

Если число $N_{урu}$ означает максимальное значение условного регистрационного указателя во всех прототипах ячеек, составляющих сеть, то описание двумерной сети должно включать $N_{урu}$ картограмм значений регистрационных номеров.

Каждая картограмма регистрационных номеров состоит из M предложений, содержащих N номеров:

$P\langle k\rangle\langle j\rangle$ <регистрационный номер> <регистрационный номер>...

$P\langle k\rangle\langle j\rangle$ – метка предложения для k -ой картограммы и j -ой строки;

$\langle k\rangle$ – натуральное число от 1 до 99; для однозначных чисел слева записывается 0; значение УРУ;

$\langle j\rangle$ – натуральное число от 1 до 99; для однозначных чисел слева записывается 0; номер строки ячеек сети; меняется от 1 до M .

Пример:

если $j=5$, а $k=11$, то метка будет $P1105$

<регистрационный номер> – натуральное число, имеющее значение регистрационного номера, который будет присвоен зоне с условным регистрационным указателем k в ячейке, которая будет помещена в сети путём сдвига на j позиций по второму вектору и на число позиций, соответствующих положению в строке, по первому вектору.

Допустимы коэффициенты повторения отдельных чисел и групп чисел.

Использование имён констант **не разрешается (!)**.

Пример:

Строка картограммы регистрационных номеров

P0301 3 3 3 8 7 5 2 7 5 2

Эта строка означает, что зоны с третьим условным указателем в ячейках с индексами по векторам сдвигов (1,1), (2,1), (3,1) получают регистрационный номер 2, в ячейке (4,1) – номер 7, (5,1) – номер 5 и так далее.

Если вся k-ая картограмма состоит из одного и того же значения, то вместо M предложений можно написать одно предложение вида:

P<k>ALL <регистрационный номер>

<k> – натуральное число от 1 до 99; для однозначных чисел слева записывается 0; значение УРУ.

Пример (строка картограммы регистрационных номеров):

P02ALL 23

Строка означает, что второй условный указатель в помеченных этим условным указателем зонах всех ячеек получит значение 23.

Если сеть трёхмерная, то картограммы регистрационных номеров задаются послойно.

Задаётся $L \times N_{ур}$ картограмм размерности $M \times N$. Перед каждой картограммой вводится строка вида:

P<k>LAY <номер слоя>

<k> – натуральное число от 1 до 99; для однозначных чисел слева записывается 0; значение УРУ.

<номер слоя> – натуральные числа от 1 до L по порядку, имеющий значение номера слоя.

Пример:

P05LAY 11

Затем вводятся M предложений, построенных аналогично двумерному случаю.

6.3.3.4 Картограммы объектных номеров

Картограммы объектных номеров устроены полностью аналогично картограммам регистрационных номеров, но в метках предложений латинская буква 'P' должна быть заменена латинской буквой 'O'.

6.3.3.5 Картограммы материальных номеров

Картограммы материальных номеров устроены полностью аналогично картограммам регистрационных номеров, но в метках предложений латинская буква 'P' должна быть заменена латинской буквой 'M'.

7. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ МОДУЛЯ PHS

Физический модуль (PHS) формирует сечения и другие характеристики взаимодействия нейтронов со средой. В программе КМС используется модуль **PHS**, который позволяет решать задачи, связанные с моделированием стационарных и нестационарных процессов, происходящих в ядерных реакторах, а также задачи радиационной безопасности.

Физический модуль PHS позволяет учитывать эффекты непрерывного изменения энергии нейтрона при столкновениях, а также непрерывную зависимость сечений от энергии.

При проведении расчётов по программе КМС с использованием физического модуля PHS, необходим дополнительный файл с материальным составом рассматриваемой модели. По умолчанию, входной файл должен иметь следующее имя – *physics.dat*, в котором описываются концентрации материального состава модели. Также, при данном виде расчета требуется наличие файлов библиотеки оцененных ядерных данных для всех нуклидов, описанных в данном файле.

7.1 Файл материалов

В файле *physics.dat* содержится информация о материалах модели, их температурах, изотопном составе и признаках, является ли изотоп выгорающим. Информация о файлах библиотеки, их местоположения и методов расчёта берётся из файла *default.phm*, в файле *physics.dat* указываются лишь имена изотопов. Формат файла следующий. В первой строке указывается директория, в которой лежит файл *default.phm*. В последующих строках указывается материальный состав. Каждый материал задается следующим образом. Сначала идет строка, в которой указывается температура. Если температура не указана, то задается по умолчанию – *300K*. Затем задается материальный состав – по одной строке на каждый изотоп, в каждой строке сначала указывается концентрация, а затем имя изотопа. Между двумя материалами должна быть пустая строка.

Пример файла *physics.dat*:

PHS

task_type=n

nat="\\comsh\shared\$\kmc_lib\nat.dat"

aw="\\comsh\shared\$\kmc_lib\aw.dat"

temp_def = 300

lib_n=(

"\\comsh\shared\$\kir_library\e-71.njoy.tpc-poly.hdf\cfg_tpc\default.neu"

)

mat name=fuel burn=no

U234 4.9184E-04

U235 4.4994E-02

U238 2.4984E-03

finish

Здесь в первой строке указана директория, в которой лежит файл *default.pht* и затем заданы два материала. Первый материал состоит из одного изотопа с именем O^{16} с концентрацией $3.3444e-02$ при температуре $400K$, а второй материал состоит из двух изотопов с именами Pu^{239} и Pu^{240} и температурой $500K$.

7.2 Задание термализационных матриц

Для задания термализационной матрицы необходимо после имени изотопа поставить символ «|» и имя термализационной матрицы. Перед символом «|» и после него должен быть хотя бы один пробел.

Пример:

T=300

6.6888e-02 H2 | DD2O

3.3444e-02 O16

Здесь для изотопа с именем “H2” задана термализационная матрица с именем “DD2O”.

7.3 Задание выгорающих изотопов

Выгорающие изотопы можно отметить символом «@» в начале строки, например:

```
@4.5486e-04 Pu239
@2.4984e-05 Pu240
6.6888e-02 H2 | DD2O
3.3444e-02 O16
```

Можно также указать номера выгорающих изотопов в начале материала в первых строках после указания температуры, например:

```
T=500
@(4 - 12)
@(22 - 67)
4.5486e-04 Pu239
2.4984e-05 Pu240
...
```

В этом случае в материале выгорающими будут изотопы с 4 по 12 и с 22 по 67. Если в материале все изотопы выгорающие, это можно отметить символами «@@» в начале материала, после указания температуры, например

```
T=600
@@
4.5486e-04 Pu239
2.4984e-05 Pu240
...
```

В этом случае во втором материале все изотопы будут выгорающими.

Можно также задать номера материалов, в которых все выгорающие изотопы во второй и последующих строках файла с входными данными после трех символов «@@@» например:

D:\ACE\ENDFB8\

@@@(2 - 5)

@@@(7 - 18)

T=400

6.6888e-02 H2 | DD2O

3.3444e-02 O16

T=2100

4.5486e-04 Pu239

2.4984e-05 Pu240

...

в этом случае у материалов с 2 по 5 и с 7 по 18 все изотопы будут выгорающими.

7.4 Копирование материалов

Задать несколько материалов с одинаковым изотопным составом можно один раз задав этот материал, а затем вместо материала поставить знак «\$» и номер материала, данные которого нужно скопировать.

Пример:

T=1900

4.5486e-04 Pu239

2.4984e-05 Pu240

T=400
6.6888e-02 H2 | DD2O
3.3444e-02 O16

T=2000
4.5486e-04 U235
2.4984e-05 U238

\$2

T=1800
4.5486e-04 U234
2.4984e-05 U235

7.5 Файл настройки библиотеки

Файл *default.phm* должен находиться в директории, указанной в первой строке файла *physics.dat* и должен содержать информацию об используемых физмодулем ACE-библиотеках. У файла следующий формат. В первой строке должен быть указан набор температур, для которых имеются ACE-файлы. Начинаться строка должна с символов «T={» далее должны быть через запятую перечислены температуры и завершаться строка должна символом «}».

Пример:

T={300,400,500,600}

В последующих строках файла должна содержаться информация о содержащихся в библиотеке изотопах, на каждый изотоп по одной строке. Формат строки следующий. Начинаться строка должна с имени изотопа, которое будет использоваться для задания изотопного состава в *physics.dat*, затем должен быть указан набор параметров в виде:

<имя параметра> = <значение>.

ace

Параметр **ace** – имя ACE-файла. В имени файла символы {T} будут заменены на температуру. Например, если в файле содержится строка:

H1 ace=D:\ENDFB8\{T}\001H_001.{T}

а первая строка файла такая как в предыдущем примере, то физмодуль будет предполагать, что для изотопа, заданного в physics.dat под именем H1 имеются следующие ACE-файлы

D:\ENDFB8\300\001H_001.300

D:\ENDFB8\400\001H_001.400

D:\ENDFB8\500\001H_001.500

D:\ENDFB8\600\001H_001.600

для температур 300, 400, 500 и 600K соответственно. Наличие параметра **ace** является обязательным, при его отсутствии будет выдано сообщение об ошибке. Все остальные параметры являются необязательными, при их отсутствии будут использоваться значения по умолчанию.

fiss

Параметр **fiss** – является ли нуклид делящимся. Допустимые значения *false* и *true*. Значение по умолчанию *false*.

ptable

Параметр **ptable** – использовать ли для этого нуклида вероятностные таблицы. Допустимые значения *true* и *false*. Значение по умолчанию *false*.

В случае, если указано значение *true*, а в ACE-файле вероятностных таблиц нет, или, если, наоборот, указано значение *false*, а в ACE-файле вероятностные таблицы есть будет выдано соответствующее предупреждение. В обоих случаях расчет будет продолжен без использования вероятностных таблиц.

delayed

Параметр **delayed** – использовать ли информацию о запаздывающих нейтронах. Допустимые значения параметра: 0 – не использовать, *p* – только

мгновенные нейтроны, pd – мгновенные и запаздывающие нейтроны. Значение по умолчанию 0. Если нуклид не делящийся, а указанное значение не 0, выдаётся сообщение об ошибке.

thermal

Параметр `thermal` – является ли ACE-файл тепловым ACE-файлом. Допустимые значения *true* и *false*. Значение по умолчанию *false*. В случае, если указано $ptable=true$ или `delayed` не равно 0 будет выдано сообщение об ошибке.

hdf

Параметр `hdf` – представлен ли ACE-файл в формате HDF. Допустимые значения *true* и *false*. Значение по умолчанию *false*.

isotropic

Параметр `isotropic` – использовать ли при моделировании угла рассеяния у нуклида изотропное распределение, или моделировать то, которое задано в ACE-файле. Допустимые значения *true* и *false*. Значение по умолчанию *false*.

T

Параметр `T` – набор температур. Используется только для задания сетки температур термализационных матриц. Формат такой же, как при задании температур в первой строке файла. Значение по умолчанию – набор температур, заданный в первой строке файла. Параметр может быть задан только при $thermal=true$.

sigma1

Параметр `sigma1` – выполнять ли в процессе расчёта доплеровское уширение по методу SIGMA1. Допустимые значения – *true*, *false* и *OnTheFly*. Значение по умолчанию *false*. Если указано *false*, то в процессе счета

доплеровское уширение не выполняется. Если указано *true*, то доплеровское уширение выполняется с использованием кэша. Если указано *OnTheFly*, то выполняется доплеровское уширение без использования кэша. Если *thermal=true*, а *signal* не равно *false*, выдаётся сообщение об ошибке.

8. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ МОДУЛЯ REG

Регистрационный модуль (REG) в программе КМС выполняет ключевую роль в расчёте, накоплении и обработке функционалов, характеризующих моделируемые процессы. Регистрационный модуль программы КМС предназначен для выполнения следующих задач:

1. Задание и регистрация функционалов: позволяет пользователю определить набор физических величин (функционалов), которые необходимо рассчитать в ходе моделирования.
2. Обработка данных: преобразует исходные данные в удобный для программы внутренний формат и записывает их в файл библиотеки задачи (HDF).
3. Передача информации: через управляющий модуль предоставляет информацию о регистрируемых функционалах другим модулям программы.
4. Расчёт и анализ: производит оценку функционалов по истории моделируемых частиц, вычисляет их статистические погрешности, выполняет постобработку и формирует итоговые отчёты для печати.
5. Сохранение данных: обеспечивает периодическое сохранение накопленных данных на диск в сжатом формате HDF для надёжности и дальнейшего анализа.
6. Экспорт: преобразует вычисленные функционалы в формат, пригодный для использования внешними модулями или программами, и записывает их на диск.

В программе КМС предусмотрена возможность регистрации различных функционалов (Таблица 3) в зависимости от режимов расчёта.

Таблица 3. Функционалы, реализованные в программе КМС

| | | | |
|-----|---|----------|---|
| REG | → | GENERAL | Интегральные параметры системы, такие как Кэфф, βэфф, Лэфф и т.д. |
| | → | STD | Стандартные функционал усреднённые по заданным интервалам (временным, энергетическим, пространственным) |
| | → | BOUNDARY | Регистрация токов нейтронов через границы регионов/материалов/объектов |
| | → | KINETIC | Используется для частоты выдачи печати результатов в режиме счета |
| | → | MAGMA | Получение групповых микро/макро констант |
| | → | MZK | Выдача результатов для метода многозонной кинетики |

Все функционалы кроме GENERAL требуют дополнительного заголовка – REGTYPE. Каждый блок из STD, BOUNDARY, KINETIC, MAGMA, MZK начинается с директивы REGTYPE и завершается директивой END. Пользователь может задавать неограниченное количество регистраций функционалов (блоков REGTYPE). Порядок вывода результатов соответствует порядку задания блоков исходных данных.

Далее представлена схема задания исходных данных регистрационного модуля.

Схема исходных данных:

REG

(Задание General Functional)

REGTYPE type_functional_1

... (содержание блока 1)

END

REGTYPE type_functional_2

... (содержание блока 2)

END

...

REGTYPE type_functional_n

... (содержание блока n)

END

FINISH

Описание:

REG — начало задания исходных данных модуля регистрации;

Блоки **REGTYPE... END** — отдельные регистрационные функционалы;

type_functional — уникальное обозначение конкретного функционала (STD, BOUNDARY, KINETIC, MAGMA, MZK);

FINISH — завершение описания модуля регистрации.

Для получения выходных данных требуется, чтобы пользователь задал хотя бы один из возможных функционалов.

8.1 Функционал GENERAL

8.1.1 Описание функционала

Функционал GENERAL играет особую роль в структуре модуля регистрации программы КМС. Он задаётся непосредственно после объявления начала модуля регистрации, до любых блоков REGTYPE.

Особенность GENERAL заключается в том, что он может быть указан только один.

Основное предназначение функционала GENERAL — расчёт и выдача интегральных (обобщённых) параметров системы. К таким параметрам относятся:

- эффективный коэффициент размножения нейтронов ($K_{эфф}$);
- эффективная доля запаздывающих нейтронов ($\beta_{эфф}$);
- эффективная длина замедления ($L_{эфф}$).

Функционал GENERAL должен использоваться при моделировании процессов переноса частиц с участием нейтронов в рамках режима КМС.

Функционал GENERAL выступает в качестве базового инструмента для получения общих характеристик системы, обеспечивая пользователя ключевыми интегральными параметрами.

8.1.2 Схема задания исходных данных

Блок расчёта интегральных параметров системы предоставляет возможность выбора двух независимых опций: либо KEFF — для вычисления эффективного коэффициента размножения нейтронов в системе, либо PKIN — для определения набора запаздывающих кинетических параметров. Выбор PKIN позволяет получить такие ключевые для анализа кинетики реактора величины, как эффективная доля запаздывающих нейтронов ($\beta_{эфф}$), среднее время генерации нейтронов (Λ) и параметр реактивности «ро-альфа» ($\rho-\alpha$), характеризующие переходные процессы. Таким образом, пользователь может рассчитывать либо статическую характеристику (KEFF), либо динамические параметры (PKIN), необходимые для оценки устойчивости или переходных режимов работы рассматриваемой системы.

Расчёт на собственные значения.

KEFF — включает задачу на собственные значения (эффективный коэффициент размножения). В выводе программы КМС будут выведены $K_{эфф}$ по следующим оценкам: по длине пробега, по столкновениям, по делениям, по поглощениям и совместные оценки по методу ... [].

Расчёт параметров точечной кинетики.

Для получения эффективных параметров точечной кинетики требует ввести структуру PKIN...END.

Полная структура:

```
PKIN
ESTIMATION <тип оценки>
METHOD <номер метода расчета>
GENERATIONS <число итераций>
Delayed <число групп>
END
```

Описание:

ESTIMATION — карта, обозначающая ввод типа оценки функционалов (таблица 4);

METHOD — карта, обозначающая ввод типов алгоритма расчёта параметров уравнения точечной кинетики. Алгоритмы и их обозначения в программе КМС представлены в таблице 5;

GENERATIONS — количество скрытых поколений (блоков) моделирования нейтронов;

Delayed — требуемое число групп параметров ядер-предшественников запаздывающих нейтронов. (6 или 8 групп запаздывающих нейтронов, в зависимости от используемой библиотеки оценённых ядерных данных).

Рекомендация:

Значение GENERATIONS устанавливать не менее 10, но возможно, что потребуется увеличить данное число в зависимости от модели и типа решаемой задачи.

Таблица 4. Типы оценки функционалов.

| № | Тип функционала оценки | Обозначение в КМС |
|---|------------------------|-------------------|
| 1 | По длине пробега | t |
| 2 | По столкновениям | c |
| 3 | По поглощениям | a |
| 4 | По делениям | f |

Таблица 5. Алгоритмы кинетики.

| № | Алгоритм | Обозначение в КМС |
|---|---------------------------|-------------------|
| 1 | ББП (блок без перекрытия) | 0 |
| 2 | БСП (блок с перекрытием) | 1 |
| 3 | Метод Усачёва-Гурвица | 2 |

Краткое описание алгоритма расчёта параметров уравнения точечной кинетики:

- ББП (блок без перекрытия) – алгоритм с неперекрывающимися блоками: начало следующего блока лежит в асимптотическом поколении предыдущего. Результаты моделирования каждого блока при достаточно большом размере промежуточных блоков можно считать независимыми от других блоков. Аналогичный алгоритм реализован в программе MCNP (версия 5 и выше).
- БСП (блок с перекрытием) – алгоритм с множественным перекрытием блоков: в каждом поколении моделирования формируется независимый расчётный блок. При этом часть данных моделирования каждого блока включает результаты моделирования других блоков, что может приводить к влиянию корреляции оценок. Аналогичный алгоритм реализован в программе Serpent2.
- Метод Усачёва-Гурвица – расчёт осуществляется непосредственно в момент моделирования поглощения нейтрона в топливе. Для этого проводится моделирование дополнительных историй нейтронов деления, в том числе и отдельно запаздывающих нейтронов, в течение заданного числа скрытых поколений нейтронов с использованием неаналогового моделирования.

Далее приведён пример задачи исходных данных регистрационного модуля для функционала GENERAL, в котором введён запрос на получение собственных значений системы ($K_{эфф}$), параметров точечной кинетики с оценкой по длине пробега по методу Усачёва-Гурвица с 20-тью скрытыми поколениями и выдачей параметров ядер-предшественников запаздывающих

нейтронов в шести группах. Пример вывода для данной задачи задания исходных данных приведён в Приложении Б (пример Б.1).

```
REG
KEFF
PKIN
ESTIMATION t
METHOD 2
GENERATIONS 20
Delayed 6
END
FINISH
```

8.2 Функционалы REGTYPE

В программе КМС присутствуют 5 типов функционалов REGTYPE, которые используются в различных режим расчета программы, или необходимости получения тех или иных функционалов.

Функционалы STD предназначены для регистрации стандартных функционалов в расчётах стационарных и нестационарных процессов, позволяя при этом проводить усреднение по времени, энергии и пространству в требуемых регионах, материалах, объектах и/или в определенных изотопах.

Функционалы BOUNDARY предназначены для получения тока нейтронов пересекающих границу регионов, материалов и объектов с возможностью усреднения по времени, энергии и пространству.

Функционалы KINETIC предназначены для возможности задавать частоту вывода данных при моделировании кинетических процессов. Это особенно актуально в связи с высокой продолжительностью расчётов методом Монте-Карло: благодаря функционалам KINETIC можно оценивать результаты непосредственно в процессе вычисления, а не только по его завершении.

Функционалы MAGMA предназначены для формирования библиотек групповых констант с произвольной энергетической сеткой, заданной

пользователем. Пользователь получает основные микро или макро-сечения, которые в дальнейшем может служить для расчета в групповом приближении по программе КМС с физическим модулем MAGMA, или же использовать данные сечения для расчета по программам прецизионного класса.

Функционалы MZK предназначены для вывода результатов метода многозонной кинетики, который подробно описан в работах [].

Как уже было описано ранее, блоки REGTYPE можно задавать неограниченное количество раз. Каждый блок должен быть объявлен.

Блок REGTYPE:

```
REGTYPE type_functional  
... (содержание блока)  
END
```

За каждым типом функционала закреплены соответствующие ему карты, с помощью которых пользователь формирует требуемые ему функционалы. Подробное соответствие карт каждому типу функционала программы КМС приведены в таблице 6.

Таблица 6. Список карт, используемых в функционалах REGTYPE

| Параметр | Тип функционала | | | | |
|--------------|-----------------|----------|---------|-------|-----|
| | STD | BOUNDARY | KINETIC | MAGMA | MZK |
| ESTIMATION | ✓ | | | ✓ | |
| PARTICLE | ✓ | ✓ | | | |
| SUBPARTICLE | ✓ | ✓ | | | |
| TIME | ✓ | ✓ | | | |
| ENERGY | ✓ | ✓ | | ✓ | |
| ISOTOPE | ✓ | | | | |
| REACTION | ✓ | | | | |
| DOMAIN | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| SORT | ✓ | ✓ | | | |
| DETECTOR | ✓ | | | | |
| PRINT | | | ✓ | | ✓ |
| DELAYED | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| SPTYPE | | | | ✓ | |
| SCATTERING | | | | ✓ | |
| PRINTSIZEMAX | | | | | ✓ |

8.2.1 Описание карт, используемых в функционалах REGTYPE

ESTIMATION — карта, обозначающая ввод типа оценки функционалов при счёте.

Структура ввода:

ESTIMATION <тип оценки>

Описание:

<тип оценки> – тип оценки функционалов в процессе расчёта программы КМС (таблица 3). При отсутствии карты – по умолчанию используется оценка по длине пробега.

Таблица 7. Типы оценки функционалов.

| № | Тип функционала оценки | Обозначение в КМС |
|---|-------------------------|-----------------------|
| 1 | По длине пробега | t |
| 2 | По столкновениям | c |
| 3 | По поглощениям | a |
| 4 | По делениям | f |
| 5 | По всем оценкам (1 – 4) | all |
| 6 | Комбинированная оценка | <список оценок> combo |

Примеры:

- 1: ESTIMATION t
- 2: ESTIMATION all
- 3: ESTIMATION t a f combo

Так, в первом примере в процессе счета регистрация функционалов будет проходить с оценкой по длине пробега, во втором примере комбинированная по всем оценкам (по длине пробега, по столкновениям, по поглощениям и по делениям), в третьем примере – для комбинированной оценки только по длине пробега, поглощениям и делениям.

PARTICLE – карта, обозначающая ввод типа частицы (частиц), для которых будет происходить регистрация функционалов.

Структура ввода:

PARTICLE <список типов частиц>

Описание:

<список типов частиц> – обозначения типов частиц, реализованных в программе КМС (таблица 8). Если карта не была введена, то по умолчанию регистрация функционалов происходит по типу частицы – нейтрон.

Таблица 8. Список частиц, которые моделируются в программе КМС и их обозначения в модуле регистрации.

| № | Тип частицы | Обозначение в КМС |
|---|-------------|-------------------|
| 1 | Нейтрон | 1 или Neutron |
| 2 | Гамма-квант | 2 или Gamma |
| 3 | Электрон | 3 или Electron |
| 4 | Протон | 4 или Proton |

Примечание:

Тип частицы, запрашиваемый в регистрационном модуле, должен соответствовать режиму моделирования программы КМС. Если используется моделирование только нейтронов, а запрос регистрации функционалов был сделан для гамма-квантов, то в выходных данных пользователь получит нулевые значения результатов расчёта.

Примеры:

- 1: PARTICLE 1
- 2: PARTICLE 1 2
- 3: PARTICLE neutron 3
- 4: PARTICLE gamma proton

В первом примере введён запрос получения функционалов для нейтронов, во втором – для нейтронов и гамма-квантов, в третьем – для нейтронов и электронов, в четвёртом – для гамма-квантов и протонов.

SUBPARTICLE — карта, обозначающая ввод подтипа частиц. Вводится только при наличии карты PARTICLE и для типов частиц, указанных в PARTICLE. Данная карта вводится для каждого типа частицы, указанного в карте PARTICLE, отдельно. При отсутствии карты SUBPARTICLE регистрация будет происходить интегрально по всем подтипам частицы.

Структура ввода:

SUBPARTICLE <тип частицы> <список подтипов частиц>

Описание:

<тип частицы> – тип частицы, присутствующий в карте PARTICLE, <список подтипов частиц> - обозначения подтипов частиц, рассматриваемых в процессе расчёта по программе КМС. Возможные подтипы частиц указаны в таблице 9.

Примечание:

В настоящее время подтипы реализованы только для типа частиц – нейтрон.

Таблица 9. Подтипы частиц и их обозначения в модуле регистрации.

| № | Тип частицы | Подтип частицы | Обозначение в КМС |
|---|--------------------------|------------------------------|-------------------|
| 1 | Нейтрон | Интегрально по всем подтипам | 0 |
| 2 | | Мгновенный | 1 |
| 3 | | Запаздывающий | 2 |
| 4 | Фотон (γ -квант) | Интегрально по всем подтипам | 0 |
| 5 | Электрон | Интегрально по всем подтипам | 0 |
| 6 | Протон | Интегрально по всем подтипам | 0 |

Примеры:

1: PARTICLE 1 2

SUBPARTICLE 1 0 2

SUBPARTICLE 2 0

2: PARTICLE neutron 3

SUBPARTICLE 1 1

3: PARTICLE 1 gamma

SUBPARTICLE neutron 1

SUBPARTICLE gamma 0

В первом примере введена регистрация функционалов по типам частиц: нейтрон и гамма-квант, для нейтрона регистрация функционалов будет проходить интегрально по всем подтипам и отдельно по запаздывающим нейтронам, для гамма-квантов – интегрально по всем подтипам. Во втором примере рассматривается регистрация по типам частиц: нейтрон и электрон, регистрация функционалов для нейтронов рассматривается только для подтипа – мгновенные, для электронов – интегрально по всем подтипам (по умолчанию). В примере 3 показано возможность использования разных стилей ввода типов частиц (символьное или числовое значение).

TIME – карта, обозначающая ввод временной сетки регистрационных функционалов. При отсутствии карты задаётся по умолчанию $[0; 10^{200}]$ с.

Структура ввода:

TIME <Число интервалов 1> <Правая граница интервалов 1>
<Число интервалов 2> <Правая граница интервалов 2>
...
<Число интервалов N> <Правая граница интервалов N>

Описание:

<Число интервалов N> - число интервалов, на которую будет разделён временной отрезок времени $[0; \text{<Правая граница интервалов 1>}]$ для первого ввода, или же $[\text{<Правая граница интервалов N-1>; <Правая граница интервалов N>}]$ для последующих временных отрезков.

Примеры:

- 1: TIME 1000 10.
2: TIME 10 1E-3 9 1E-2 9 1E-1 9 1E+0 9 1E+1

В первом примере приведено равномерное разбиение временной области $[0; 10]$ секунд на 1000 равных по времени интервалов. Во втором примере аналогичную временную область разбили на интервалы по времени в логарифмическом масштабе: 10 равных интервалов на отрезке $[0.000; 0.001]$ секунд, 9 равных интервалов от $[0.001; 0.010]$ секунд и т.д.

Примечание 1:

Может быть использована в стационарном режиме, в котором время отсчитывается от рождения нейтрона ($t=0$ с) до его исчезновения. Также важно учитывать моделируемое время кинетического процесса, заданное в исходных данных модуля траекторий (должны быть согласованы).

Примечание 2:

В функционалах STD и BOUNDARY возможно задавать в одном блоке несколько временных разбиений, требуется только повторно ввести карту и требуемую временную сетку.

ENERGY – карта, обозначающая ввод энергетической сетки регистрации функционалов. При отсутствии карты – по умолчанию регистрация проводится по всей энергетической области. Данная карта при

моделировании с прецизионным физическим подмодулем (NEU, GAM) и с групповым подмодулем MAGMA имеет различный тип ввода.

Структура ввода при моделировании с прецизионным подмодулем:

ENERGY <Левая граница E1>

<Левая граница E2>

...

<Левая граница E_n>

Описание:

<Левая граница> – левая граница энергетического полуинтервала, которая формируется следующим образом:

[<Левая граница E1>;<Левая граница E2>)

...

[[<Левая граница E_{n-1}>;<Левая граница E_n>)

...

[[<Левая граница E_n>; ∞)

Структура ввода при моделировании с групповым модулем MAGMA:

ENERGY <Группа 1> <Группа 2> ... <Группа N>

Описание:

<Группа> – это номер энергетической группа, соответствующий групповому энергетическому разбиению, используемому в исходных данных физического модуля MAGMA.

Примеры:

1: ENERGY 6.25E-6 2.15E-3 10.E0

2: ENERGY 0.0 1E2

3: ENERGY 1 5

В первом примере представлено энергетическое разбиение с тремя энергетическими полуинтервалами: [0.625 эВ; 2.15 кэВ), [2.15кэВ; 10 МэВ), [10 МэВ; ∞). Во втором примере представлено два энергетических полуинтервала: [0.0 эВ; 10 МэВ), [10 МэВ; ∞). Третий пример – задание исходных энергетических групп для расчёта по групповому физическому

модулю MAGMA, в котором должно быть задано не менее пяти энергетических групп.

Примечание:

В функционалах STD и BOUNDARY возможно задавать в одном блоке несколько энергетических разбиений, требуется только повторно ввести карту и требуемую энергетическую сетку.

ISOTOPE – карта, обозначающая ввод изотопов, в которых будет происходить регистрация функционалов. При отсутствии карты – по умолчанию используется регистрация по всем изотопам (MIXED).

Структура ввода:

ENERGY <Изотоп 1> <Изотоп 2> ... <Изотоп N>

Описание:

<Изотоп> – название изотопа согласно формату входных данных физического модуля. При запросе регистрации функционалов в указанных в регистрационном модуле изотопах, требует обратить внимание, что данные изотопы должны присутствовать в исходных данных физического модуля в рассматриваемых материалах, регионах или объектах.

Примеры:

1: ISOTOPE U235 U238 U239

2: ISOTOPE MIXTURE U235

В первом примере введён запрос получения функционалов в ^{235}U , ^{238}U и ^{239}U . Во втором примере приведён запрос интегральных значений функционалов по всем изотопам и для ^{235}U .

REACTION – карта, обозначающая ввод типа реакции, для которого требуется найти функционалы. При отсутствии карты, по умолчанию – происходит регистрация плотности потока нейтронов.

Структура ввода:

REGION <value_1> <value_2> ... <value_N>

Описание:

<value> – номер скорости реакции или потока нейтронов, согласно используемой библиотеки оценённых ядерных данных.

Основные обозначения скоростей реакций представлены в таблице 10. Более подробно описание обозначений реакций приведены в [1].

Таблица 10. Обозначения номеров типов реакций

| № | Частица | Реакция | Расшифровка |
|-----|---------|-------------------|--|
| 3 | n | (z,nonelas.) | Неупругое рассеяние |
| 16 | n | (z,2n) | Образование двух нейтронов (Сумма реакций MT = 875-891) |
| 17 | n | (z,3n) | Образование трех нейтронов |
| 18 | n | (z,fission) | Деление (Сумма реакций 19 – 21, 38) |
| 19 | n | (n,f) | Первая вероятность деления, вызванное нейтронами |
| 20 | n | (n,nf) | Вторая вероятность деления, вызванное нейтронами |
| 21 | n | (n,2nf) | Третья вероятность деления, вызванное нейтронами |
| 22 | n | (z,n α) | Появление нейтрона и альфа-частицы. |
| 23 | n | (n,n3 α) | Появление нейтрона и трех альфа-частиц |
| 24 | n | (z,2n α) | Появление двух нейтронов и альфа-частицы |
| 25 | n | (z,3n α) | Появление трех нейтронов и альфа частицы |
| 27 | n | (n,abs) | Поглощение, сумма реакций MT = 18, 102-117, 155, 182, 191-193, 197 |
| 28 | n | (z,np) | Появление нейтрона и протона |
| 29 | n | (z,n2 α) | Появление нейтрона и двух альфа-частиц |
| 30 | n | (z,2n2 α) | Появление двух нейтронов и двух альфа-частиц |
| 38 | n | (n,3nf) | Четвертая вероятность деления |
| 101 | n | (n,disap) | Поглощение нейтрона, равная сумме MT = 102-117, 155, 182, 191-193, 197 |
| 102 | n | (z, γ) | Радиоактивный захват |
| 103 | n | (z,p) | Появление протона (сумма реакций MT = 600-649, если имеются в наличие) |
| 104 | n | (z,d) | Появление дейтрона (сумма реакций MT = 650-699, если имеются в наличие) |
| 106 | n | (z,3He) | Появление 3He, сумма реакций MT = 750-799, если они имеются. |
| 107 | n | (z, α) | Появление альфа-частицы (сумма реакций MT = 800-849, если имеются в наличие) |
| 108 | n | (z,2 α) | Появление двух альфа-частиц |
| 109 | n | (z,3 α) | Появление трех альфа -частиц |
| 111 | n | (z,2p) | Появление двух протонов |
| 112 | n | (z,p α) | Появление протона и альфа-частицы |
| 155 | n | (z,t α) | Появление тритона и альфа-частицы |
| 182 | n | (z,dt) | Появление дейтрона и тритона |

Продолжение таблицы 10.

| № | Частица | Реакция | Расшифровка |
|-----|---------|------------------------|--|
| 191 | n | (z,p ³ He) | Появление протона и гелия |
| 192 | n | (z,d ³ He) | Появление дейтрона и гелия |
| 193 | n | (z, ³ Heα) | Появление альфа-частицы и гелия |
| 197 | n | (z,3p) | Появление трех протонов |
| 501 | γ | | Полное сечение взаимодействия |
| 502 | γ | (γ,γ) | Когерентное рассеяние |
| 504 | γ | (γ,γ) | Некогерентное рассеяние |
| 516 | γ | (γ,2γ) | Образование электрон-позитронных пар |
| 522 | γ | (γ,nγ) | Фотоэффект |
| 534 | γ | (γ,nγ) | Фотоэффект на электронных оболочках |
| ... | | | |
| 572 | γ | (γ,nγ) | Фотоэффект на электронных оболочках |
| 600 | n | (z,p0) | Появление протона с ядром в стабильном состоянии |
| 601 | n | (z,p1) | Появление протона с ядром в первом возбуждённом состоянии. |
| ... | | | |
| 648 | n | (z,p48) | Появление протона с ядром в 48-ом возбуждённом состоянии. |
| 649 | n | (z,pc) | Появление протона в континууме (не включено в вышеуказанное дискретное представление) |
| 650 | n | (z,d0) | Появление дейтрона с ядром в стабильном состоянии |
| 651 | n | (z,d1) | Появление дейтрона с ядром в первом возбуждённом состоянии. |
| ... | | | |
| 698 | n | (z,d48) | Появление дейтрона с ядром в 48-ом возбуждённом состоянии. |
| 699 | n | (z,dc) | Появление дейтрона в континууме (не включено в вышеуказанное дискретное представление) |
| 700 | n | (z,t0) | Появление тритона с ядром в стабильном состоянии |
| 701 | n | (z,t1) | Появление тритона с ядром в первом возбуждённом состоянии. |
| ... | | | |
| 748 | n | (z,t48) | Появление тритона с ядром в 48-ом возбуждённом состоянии. |
| 749 | n | (z,tc) | Появление тритона в континууме (не включено в вышеуказанное дискретное представление) |
| 750 | n | (z, ³ He0) | Появление гелия с ядром в стабильном состоянии |
| 751 | n | (z, ³ He1) | Появление гелия с ядром в первом возбуждённом состоянии. |
| ... | | | |
| 798 | n | (z, ³ He48) | Появление гелия с ядром в 48-ом возбуждённом состоянии. |
| 799 | n | (z, ³ Heс) | Появление гелия в континууме (не включено в вышеуказанное дискретное представление) |

Продолжение таблицы 10.

| № | Частица | Реакция | Расшифровка |
|------|---------|------------------|---|
| 800 | n | $(z, \alpha 0)$ | Появление гелия с ядром в стабильном состоянии |
| 801 | n | $(z, \alpha 1)$ | Появление гелия с ядром в первом возбуждённом состоянии. |
| ... | | | |
| 848 | n | $(z, \alpha 48)$ | Появление гелия с ядром в 48-ом возбуждённом состоянии. |
| 849 | n | $(z, \alpha c)$ | Появление гелия в континууме (не включено в вышеуказанное дискретное представление) |
| 918 | n | (nFiss) | Произведение скорости реакции деления на средние число вторичных нейтронов |
| 1002 | n | (E) | Энерговыделение |

DOMAIN – карта, обозначающая ввод регистрационных зон или материалов, или объектов, соответствующих исходным данным геометрического модуля, в которых будет происходить регистрация функционалов.

Структура ввода (для функционалов STD, MAGMA, MZK):

REGION <Зона 1> <Зона 2> ... <Зона N>

или

MATERIAL <Материал 1> <Материал 2> ... <Материал N>

или

OBJECT <Объект 1> <Объект 2> ... <Объект N>

или

INTEGRALVOLUME

Описание:

<Зона>, <Материал>, <Объект> – обозначает номер зоны, материала или объекта, который соответствует данным, предоставленным в геометрическом модуле. Если вместо конкретных номеров зон, материалов или объектов указывается значение 0, система выполняет вывод функционалов для каждой зоны, материала или объекта, присутствующего в исходных данных геометрического модуля, — в отдельности.

Карта INTEGRALVOLUME означает, что функционалы будут находить интегрально по всему расчётному объёму рассматриваемой модели.

Также для данных карт присутствует формат ввода интервалов, которую можно комбинировать со стандартным вводом номеров регионов. Представим структуру задания интервалов на примере карты REGION:

REGION L<Левая граница 1>R<Правая граница 1>

...

<Зона>

...

L<Левая граница N>R<Правая граница N>

Описание:

<Левая граница> и <Правая граница> - эта левая и правая границы интервала регионов.

Примеры:

1: REGION 1 5 7

2: OBJECT 0

3: MATERIAL L2R13 L20R40 45

В первом примере задан запрос на регистрацию функционалов в регистрационных зонах с номерами 1, 5 и 7.

Во втором примере сформирован запрос на регистрацию функционалов для каждого объекта, присутствующего в геометрическом модуле, по отдельности (то есть по одному объекту на запись результата).

В третьем примере указан запрос на регистрацию функционалов:

- в материалах со 2-го по 13-й включительно;
- в материалах с 20-го по 40-й включительно;
- в материале с номером 45.

В функционале BOUNDARY используется уникальный ввод. На примере карты REGION приведём структуру карты:

REGION <Зона i>:<Зона j>

Описание:

<Зона i>:<Зона j> - означает регистрацию тока нейтронов на границе i и j зоны, при пересечении частиц из i-ой в j-ую зону.

Также как и в случае стандартного ввода данных карт для функционалов STD, MAGMA, MZK в регистрационном функционале BOUNDARY присутствует возможность ввода через интервалы.

Структура ввода:

REGION L<Зона i>R<Зона i+n>:L<Зона j>R<Зона j+k>

Описание:

структура L<Зона i>R<Зона i+n>:L<Зона j>R<Зона j+k> означает регистрацию тока нейтронов из каждой регистрационной зоны из интервала [i; i+n] в каждую регистрационную зону в интервале [j; j+k]. В данных картах нет ограничения на количество данных структур.

Примеры:

1: REGION 1:2 2:3 3:2

2: OBJECT L1R3:L5R7 9:8

3: MATERIAL 2:L7R9

В первом примере задаётся запрос на определение токов частиц, пересекающих границы между зонами: из первой зоны во вторую, из второй зоны в третью, а также из третьей зоны обратно во вторую.

Во втором примере формируется запрос на расчёт токов, направленных:

- из первого объекта — в объекты 5, 6 и 7;
- из второго объекта — в объекты 5, 6 и 7;
- из третьего объекта — в объекты 5, 6 и 7;
- из девятого объекта — в восьмой объект.

В третьем примере указывается запрос на регистрацию токов на границах, при условии перехода частиц из второго материала:

- между 2-м и 7-м объектами;
- между 2-м и 8-м объектами;
- между 2-м и 9-м объектами.

SORT — карта, обозначающая очередность сортировки введённых карт, для более удобного предоставления выходных данных программы КМС в

табличном виде. Данная карта предусмотрена для двух функционалов: STD и BOUNDARY.

Структура ввода (для функционалов STD, MAGMA, MZK):

SORT <type_card_1>

<type_card_2>

...

<type_card_N-1>

<type_card_N>

Описание:

<type_card> – это название карт, присутствующих в STD или BOUNDARY функционале. При формировании выходных данных будут выданы таблицы для всех возможных вариантов, заданных пользователем, начиная с карты <type_card_1> до <type_card_N-2>. Тогда как <type_card_N-1> и <type_card_N> непосредственно отвечает за формирование таблицы:

- <type_card_N-1> – данные, которые будут формировать в строку.
- <type_card_N> – данные, которые будут формироваться в столбец.

Рассмотрим данную структура для STD и BOUNDARY в отдельности.

При использовании карты SORT в стандартных функционалах пользователь должен ввести следующие карты в требуемом ему порядке: ESTIMATION, PARTICLE, ENERGY, TIME, REACTION, ISOTOPE, DOMAIN. При отсутствие данной карты – сортировка по умолчанию: TIME ISOTOPE PARTICLE REACTION ENERGY ESTIMATION DOMAIN.

При использовании карты SORT в граничных функционалах пользователь должен ввести следующие карты в требуемом ему порядке: PARTICLE, ENERGY, REACTION, TIME, DOMAIN. При отсутствие данной карты – сортировка по умолчанию: TIME PARTICLE REACTION ENERGY DOMAIN.

Пример 1 (Regtype STD):

```
REG
*
REGTYPE STD
ESTIMATION t
PARTICLE 2
REACTION 0
ENERGY 0.2 0.6
REGION 1 2 5
SORT ESTIMATION ISOTOPE TIME REACTION PARTICLE ENERGY DOMAIN
END
*
REGTYPE STD
ESTIMATION t
PARTICLE 1 2
REACTION 0
ENERGY 0.2 0.6
REGION 1 2 5
SORT ESTIMATION ISOTOPE TIME REACTION PARTICLE DOMAIN ENERGY
END
*
FINISH
```

В данном запросе вводится два блока REGTYPE одного типа (STD). В первом блоке STD запрашивается поток (region = 2) гамма-квантов (particle = 2) с разбиением на энергетические интервалы (energy = 0.2; 0.6) для 1, 2 и 5 регионов. Так как карты TIME и ISOTOPE не были введены, то используются их значения по умолчанию (на всем временном промежутке времени, интегрально по всем изотопам). Сортировка для данного функционала произведена следующим образом: запрашиваются отдельные таблицы для каждого введенного ESTIMATION, PARTICLE, REACTION, TIME и ISOTOPE. Таблицы формируются: энергии выводятся в строку, регионы выводятся в столбец.

Во втором блоке STD запрашивается поток (region = 2) нейтронов и гамма-квантов (particle = 2) с аналогичными разбиениями по энергиям и регионам. Сортировка для данного функционала произведена следующим образом: запрашиваются отдельные таблицы для каждого введенного ESTIMATION, PARTICLE, REACTION, TIME и ISOTOPE. Таблицы формируются: регионы выводятся в строку, энергии выводятся в столбец.

Далее представлен формат выходных данных программы КМС для рассматриваемого примера задания исходных модуля регистрации для стандартных функционалов.

Пример выходных данных:

STD Functionals Block # 1

- Estimation: by tr.s.col.(t)
- Isotope: Mixed
- Flux
- Particle: Gamma
- By Region

Energy: 0.200000 0.600000 D(0.2000) D(0.6000)

Region

| | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|
| 1 | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX |
| 2 | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX |
| 5 | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX |

STD Functionals Block # 2

- Estimation: by tr.s.col.(t)
- Isotope: Mixed
- Flux
- Particle: Neutron
- By Region

Region: 1 2 5 D(1) D(2) D(5)

Energy (MeV)

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.200000 | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX |
| XXXXXXXXXX | | | | | |
| 0.600000 | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX |
| XXXXXXXXXX | | | | | |

- Estimation: by tr.s.col.(t)
- Isotope: Mixed
- Flux
- Particle: Gamma
- By Region

Region: 1 2 5 D(1) D(2) D(5)

Energy (MeV)

| | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 0.200000 | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX |
| XXXXXXXXXX | | | | | |
| 0.600000 | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX | XXXXXXXXXX |
| XXXXXXXXXX | | | | | |

9. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ МОДУЛЯ RRS

Модуль Реакторного Радиационного Источника (RRS) моделирует фазовые координаты частиц источника, в том числе для начального пакета нейтронов при решении стационарной (на $K_{эфф}$) и нестационарной (нейтронная кинетика и неоднородная задача с внешним источником) задач.

Источник частиц RRS написан на языке программирования C++ 2017 [3]. Разработка кода проводилась с использованием современных методов объектно-ориентированного программирования. Исходные данные внешнего источника представлены в виде набора шаблонов исходных данных. Источник частиц при решении разнообразных задач существенно расширяет области применения программы КМС.

9.1 Создание внешнего источника

Компоновка данных для внешнего источника начинается с формирования заголовка и ключевого слова «RRS», а заканчивается ключевым словом «FINISH». Далее следует указание общего *количества источников* после ключевого слова «SOURCE». *Список вероятностей* с указанием вероятности вылета частицы из каждого источника указывается в явном виде после ключевого слова «PROBABILITY». Количество указанных вероятностей должно строго соответствовать количеству указанных источников. Вероятности задаются неотрицательными значениями и могут быть не нормированы. Указание нулевой вероятности для источника не будет вызывать ошибку, но такой источник не будет моделироваться. Нормировка вероятностей произойдёт после считывания исходных данных. Если же вероятности для источников не указываются в явном виде, т.е. строка с ключевым словом «PROBABILITY» отсутствует, то источники считаются равновероятностными. После указания *списка источников* необходимо закрыть секцию ключевым словом «END».

Шаблон заголовка RRS:

RRS

SOURCE <количество_источников>

PROBABILITY <список_вероятностей_источников>

<список_источников>

END

Описание:

<количество_источников> – общее количество источников RRS;

<список_вероятностей_источников> – список вероятностей испускания частицы для каждого источника;

<список_источников> – перечисление всех источников по заданным шаблонам.

Список источников содержит описание каждого из источников через соответствующий шаблон. Количество описаний источников должно совпадать с параметром *количество источников*. Каждый источник начинается с ключевого символа «S» и обязательно должен содержать Имя («Name»), Спектр («Spectrum», см. п. 9.3) и Форму (см. п. 9.2). Данный вариант источника можно считать стандартным и его шаблон представлен далее.

Стандартный шаблон источника со спектром:

...

S NAME=<имя> Spectrum=<имя_спектра> <форма>

...

Описание:

<имя> – название источника;

<имя_спектра> – название секции спектра для источника (см. п. 9.3);

<форма> – указание формы источника (см. п. 9.2).

Также шаблон источника может содержать дополнительный параметр «ANGLE», с помощью которого задаётся направление частиц источника (см. п. 9.4). Этот вариант источника служит для создания источника

с независимыми моделированиями энергии и угла частицы и представлен ниже.

Шаблон источника с независимыми энерго-угловыми составляющими:

...

S NAME=<имя> ANGLE=<имя_направления> Spectrum=<имя_спектра> <форма>

...

Описание:

<имя> – название источника;

<имя_ направления> – название секции направления для источника (см. п. 9.4);

<имя_спектра> – название секции спектра для источника (см. п. 9.3);

<форма> – указание формы источника (см. п. 9.2).

Существует возможность задать сложный энерго-угловой источник, но в этом случае дальнейшее описание секции «ANGLE» должно обязательно содержать подсекцию «ANGULAR» (для подробного описания см. п. 9.4). Такой вариант не может считаться стандартным, т.к. для его указания в шаблоне источника достаточно указать только ключевое слово «ANGLE» без указания «Spectrum». Шаблон представлен далее.

Шаблон источника со сложным энерго-угловым спектром:

...

S NAME=<имя> ANGLE=<имя_направления> <форма>

...

Описание:

<имя> – название источника;

<имя_ направления> – название секции направления для источника (см. п. 9.4);

<форма> – указание формы источника (см. п. 9.2).

Примеры задания источников приведены в Приложениях Г и Д.

9.2 Форма источника

Формирование источника начинается с определения его формы. Существует пять разновидностей форм, которые реализованы в классе блока источника:

1. Точечная – Point (PNT);
2. Цилиндрическая – Cylinder (RCX, RCY, RCZ);
3. Шестиугольная – Hexagonal (HEXX, HEXY, HEXZ (HEX));
4. Трубовидная – Tubular (TCX, TCY, TCZ);
5. Параллелепипедная – Parallelepiped (RPP).

Параметры для каждой формы задаются соответственно в таблице 11.

Таблица 11. Формы и параметры источника

| № | Название | | Обозначение | Параметры |
|---|-------------------|----------------|------------------------|--|
| 1 | Точечная | Point | PNT | X0, Y0, Z0 |
| 2 | Цилиндрическая | Cylinder | RCX, RCY, RCZ | X0, Y0, Z0, H, R |
| 3 | Шестиугольная | Hexagonal | HEXX, HEXY, HEXZ | X0, Y0, Z0, ΔX , ΔY , ΔZ |
| 4 | Трубовидная | Tubular | TCX, TCY, TCZ | X0, Y0, Z0, H, R1, R2 |
| 5 | Параллелепипедная | Parallelepiped | RPP | X0, X1, Y0, Y1, Z0, Z1 |

Шаблон формы источника:

...

<Обозначение> <Параметры>

...

Описание:

<Обозначение> – обозначение-сокращение из таблицы 11;

<Параметры> – набор параметров из таблицы 11.

Параметры источника для соответствующих форм расшифровываются следующим образом.

Точечная. X_0, Y_0, Z_0 – координаты (радиус-вектор $\mathbf{C} = (X_0, Y_0, Z_0)$) точки в трёхмерном пространстве.

Цилиндрическая. Ось цилиндра параллельна координатной оси OX – $RCX, OY - RCY, OZ - RCZ$. X_0, Y_0, Z_0 – координаты (радиус-вектор $\mathbf{C} = (X_0, Y_0, Z_0)$) центра нижнего основания цилиндра в трёхмерном пространстве. H – высота, R – радиус (Рисунок 21).

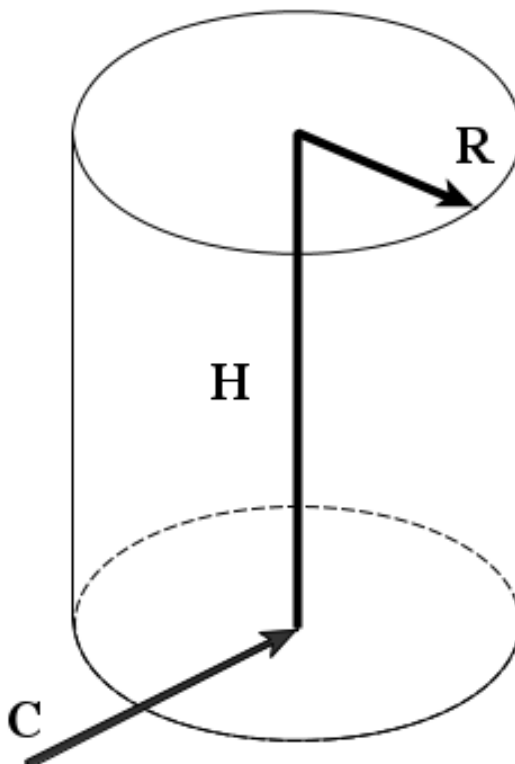


Рисунок 21 – Цилиндрическая форма источника

Шестиугольная. Ось шестигранника параллельна координатной оси $OX - HEXX, OY - HEXY, OZ - HEXZ$ (HEX). X_0, Y_0, Z_0 – координаты (радиус-вектор $\mathbf{C} = (X_0, Y_0, Z_0)$) центра нижнего основания шестигранной призмы в трёхмерном пространстве. $\mathbf{V} = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ – вектор приращения для центра противоположного ребра боковой верхней грани от центра ребра нижней грани. ΔX – ширина под ключ, ΔY – поворот призмы в плоскости (X, Y) , ΔZ – высота призмы (Рисунок 22).

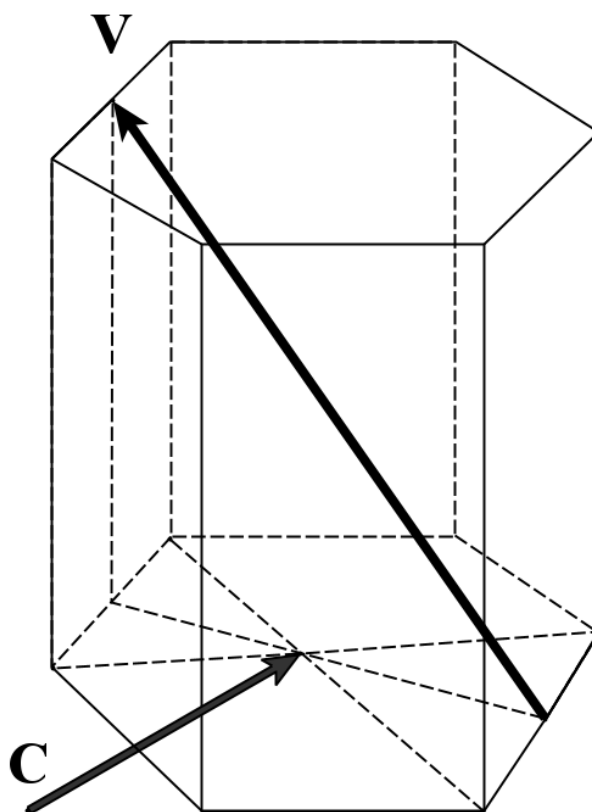


Рисунок 22 – Шестиугольная форма источника

Трубовидная. Ось цилиндра параллельна координатной оси $OZ - TCZ$. X_0, Y_0, Z_0 – координаты (радиус-вектор $\mathbf{C} = (X_0, Y_0, Z_0)$) центра нижнего основания цилиндра в трёхмерном пространстве. H – высота, R_1 – внутренний радиус или радиус круга первого цилиндра, R_2 – внешний радиус или радиус круга второго цилиндра (Рисунок 23). Радиусы R_1 и R_2 могут быть заданы в любом порядке, т.е. не строго обязательно по возрастанию.

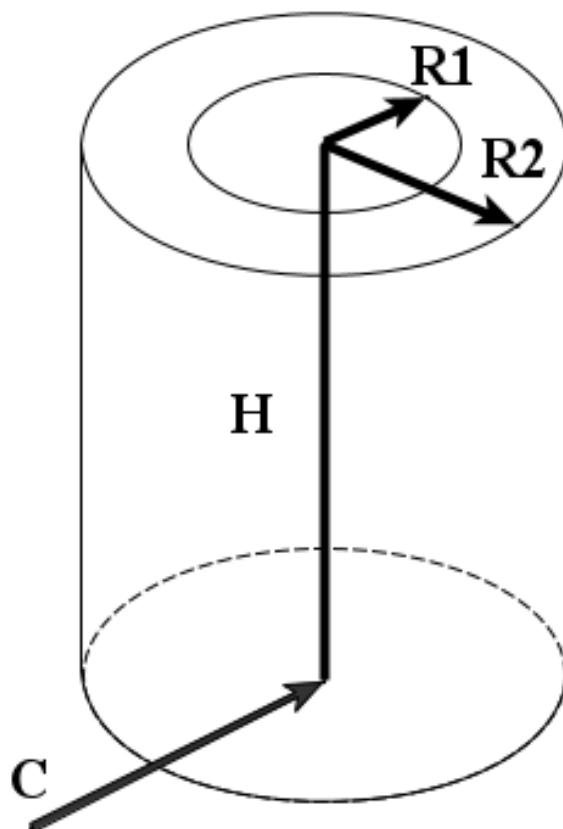


Рисунок 23 – Трубовидная форма источника

Параллелепипедная. Рёбра параллелепипеда параллельны координатным осям. X_0, Y_0, Z_0 – координаты (радиус-вектор $\mathbf{C}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$) нижнего левого угла параллелепипеда в трёхмерном пространстве. X_1, Y_1, Z_1 – координаты (радиус-вектор $\mathbf{C}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$) противоположного ему верхнего правого угла параллелепипеда в трёхмерном пространстве соответственно. Координаты задаются таким образом, что $X_0 \leq X_1, Y_0 \leq Y_1$ и $Z_0 \leq Z_1$ (Рисунок 24).

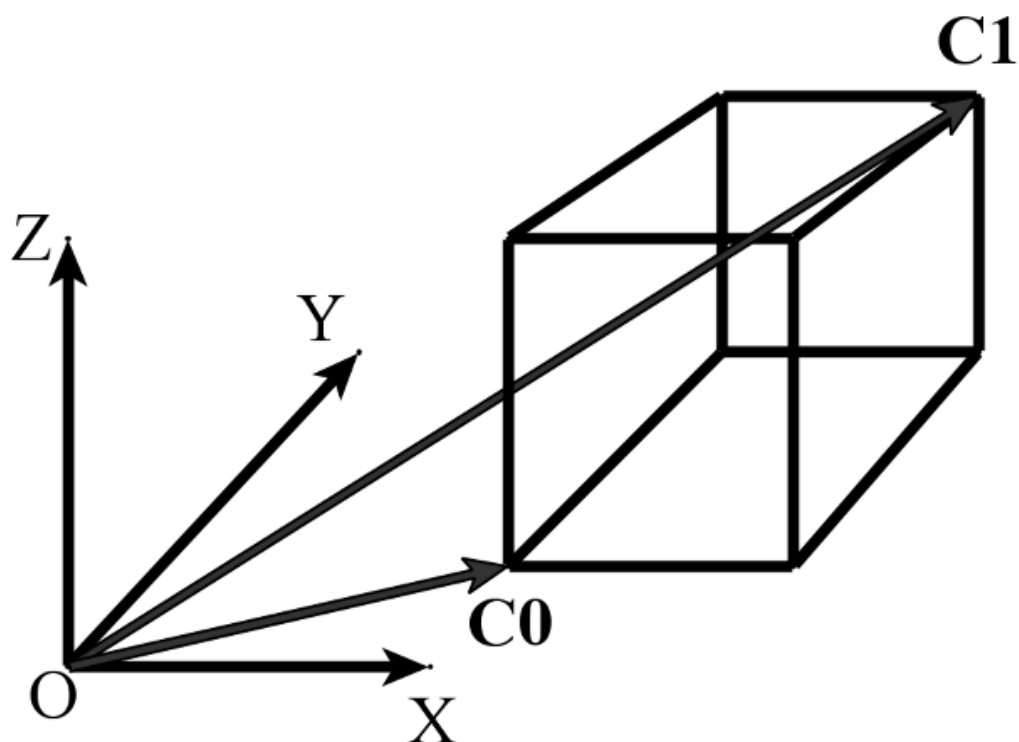


Рисунок 24 – Параллелепipedная форма источника

Примеры задания источников с разными формами приведены в Приложении Г.

9.3 Спектр источника

Энергетическая составляющая источника определяет энергию испускаемой частицы. Энергия может быть не постоянной, но и задана некоторым спектром. *Имя спектра* присваивается пользователем после ключевого слова «Spectrum». Спектры источника могут быть достаточно разнообразны, однако все они должны быть представимы в виде табличной функции неотрицательной «условной» вероятности от энергии $P(E)$. Причём вначале задаются все энергии в единицах «эВ», а потом соответственно все вероятности. Нормировку вероятностей производить не обязательно, она производится автоматически после считывания данных.

Секция энергетического спектра начинается с ключевого слова «Spectrum» и соответствующего *имени спектра*. Далее следуют последовательно подсекции «Energy» и «Probability» для указания значений

энергий и соответствующих им *вероятностей*. Завершается секция указания энергетического спектра ключевым словом «END».

Шаблон секции энергетического спектра:

```
SPECTRUM <имя_спектра>  
ENERGY  
<список_энергий>  
PROBABILITY  
<список_вероятностей>  
END SPECTRUM <имя_спектра>
```

Описание:

<имя_спектра> – название спектра (должно совпадать с именем, указанным для источника после ключевого слова «Spectrum»);

<список_энергий> – список энергий в эВ (первый символ обязательно должен быть пробелом);

<список_вероятностей> – список вероятностей (первый символ обязательно должен быть пробелом).

Существует также возможность создавать моноэнергетический источник частиц с постоянной энергией. Спектр такого источника должен содержать одну энергию и одну положительную условную вероятность. По умолчанию есть моноэнергетический источник «Default», в котором постоянная энергия принята равной 2 МэВ. Указание секции спектра с именем «Default» не будет являться ошибкой, однако, не будет учитываться при моделировании. Вместо этого будет моделироваться моноэнергетический источник «Default», в котором постоянная энергия принята равной 2 МэВ.

Примеры задания источников со спектрами приведены в Приложении Г.

9.4 Направление источника

Угловая составляющая источника определяет направление испускаемой частицы. Указание направления определяется изотропно или анизотропно. Источники анизотропного вида могут быть достаточно разнообразны. По умолчанию источник формируется в изотропном виде. Формирование анизотропного источника начинается с указания ключевого слова «ANGLE» и

присвоения имени углового спектра в строке с ключевым символом «S», формирующей источник.

Секция углового спектра начинается с ключевого слова «Angle» и соответствующего имени. Далее следует либо подсекция «Degrees», либо «Cosines» (по желанию пользователя) для указания значения *направления* в виде *градусов углов*, которые образуются с координатными осями, или же в виде *направляющих косинусов* соответственно. Завершается секция указания углового спектра ключевым словом «END».

Шаблон секции углового спектра «Angle»:

```
ANGLE <имя_направления>  
<направление>  
END ANGLE <имя_направления>
```

Описание:

<имя_направления> – название направления (должно совпадать с именем, указанным для источника после ключевого слова «Angle»);

<направление> – одна из подсекций, задающих направление («Degrees» или «Cosines»).

Далее представлены шаблоны подсекций, задающие *направление* для источника.

Шаблон подсекции «Degrees» углового спектра «Angle»:

```
...  
Degrees  
<список_углов>  
...
```

Описание:

<список_углов> – три угла, которые образует вектор направления источника с координатными осями (первый символ обязательно должен быть пробелом).

Шаблон подсекции «Cosines» углового спектра «Angle»:

...

Cosines

<список_косинусов>

...

Описание:

<список_косинусов> – три направляющих косинуса (первый символ обязательно должен быть пробелом).

Если требуется задать только некоторое *направление* частиц независимо от энергетического спектра, то вышеуказанный вариант в полной мере предоставляет эту возможность. Необходимо заметить, что если пользователь укажет обе подсекции «Degrees» и «Cosines» одновременно, то моделироваться будет только последнее из указанных направлений.

Сложный энерго-угловой спектр может быть сформирован через указание подсекции «Angular» после задания *направления* источника.

Шаблон секции углового спектра «Angle» с подсекцией «Angular»:

ANGLE <имя_направления>

<направление>

ANGULAR

<угловая_часть>

<энергетическая_часть>

END ANGULAR

END ANGLE <имя_направления>

Описание:

<имя_направления> – название направления (должно совпадать с именем, указанным для источника после ключевого слова «Angle»);

<направление> – одна из подсекций, задающих направление («Degrees», или «Cosines»);

<угловая_часть> – угловая часть энерго-углового спектра;

<энергетическая_часть> – энергетическая часть энерго-углового спектра.

Подсекция «Angular» состоит из двух последовательных частей: *угловой* и *энергетической*. Каждая часть начинается с ключевого слова «ASpectrum» и произвольного имени, а завершается ключевым словом «END».

Угловая часть содержит границы интервалов направляющего косинуса по оси Z с вероятностями, которые задаются последовательно через подсекции «Cosine» и «Probability». Количество вероятностей должно соответствовать количеству указанных интервалов косинусов, поэтому последнее значение вероятности должно быть задано равным нулю. Нормировка вероятностей может быть произвольной, т.к. она будет произведена автоматически после считывания.

Шаблон угловой части:

```
ASPECTRUM <имя_спектра>  
COSINE  
  <список_косинусов>  
PROBABILITY  
  <список_вероятностей>  
END ASPECTRUM <имя_спектра>
```

Описание:

<имя_спектра> – произвольное название спектра;

<список_косинусов> – список интервалов направляющего косинуса для оси OZ (первый символ обязательно должен быть пробелом);

<список_вероятностей> – список вероятностей (первый символ обязательно должен быть пробелом).

Энергетическая часть содержит энергетические спектры для всех соответствующих интервалов направляющего косинуса из *угловой части*. Энергетические спектры задаются последовательно через ключевое слово «ASpectrum» для каждого интервала и формируются аналогично правилам создания секции «Spectrum», описанным в п. 9.3.

Шаблон одного из спектров для энергетической части:

ASPECTRUM <имя_спектра>

ENERGY

<список_энергий>

PROBABILITY

<список_вероятностей>

END ASPECTRUM <имя_спектра>

Описание:

<имя_спектра> – произвольное название спектра;

<список_энергий> – список энергий в эВ (первый символ обязательно должен быть пробелом);

<список_вероятностей> – список вероятностей (первый символ обязательно должен быть пробелом).

Направление частицы вдоль оси OZ может быть изменено с помощью угла или направляющего косинуса для оси OZ подсекции «Degrees» или «Cosines», на который умножается полученный направляющий косинус для оси OZ порождаемой частицы.

Примеры анизотропных источников представлены в Приложении Д.

10. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ МОДУЛЯ TRA

Транспортный модуль (TRA) осуществляет организацию моделирования отдельных траекторий нейтронов в случае решения стационарной задачи.

В процессе счёта КМС модуль вызывает функции-подпрограммы (методы) и обеспечивает перенос данных у следующих модулей: геометрический (GEO), физический (PHS), параллельных очередей частиц (PPQ), модуль регистрации (REG), модуль источников (RRS). Сам транспортный модуль вызывается из управляющего модуля CTR.

Исходные данные транспортного модуля задаются после заголовка TRA. Далее задаются параметры, которые нельзя поменять в течение счёта:

packsize (pack_size, size) – количество частиц в пакете;

bankmpi (bank_mpi) – распределение частиц через MPI (0 или 1);

genski (pack_skip, skip) – число поколений, которое будет смоделировано без регистрации функционалов.

regime – режим моделирования (0, 1 или 2. 0 – стационарная задача; 1 – задача с источником; 2 – кинетическая задача);

dtzm (record_every, record) – количество серий, после которых производится запись на диск;

mxsr (pack_count, count) – число серий;

finish – окончание блока.

Пример:

```
tra
regime 0
bankmpi 1
size 1E7
skip 50
count 250
finish
```

Примечание:

Допускается ввод вещественных значений, причём перед выполнением расчёта введённого значения будет осуществлено округление до ближайшего целого числа.

11. СИСТЕМНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Для работы комплекса требуется 64-разрядная ОС WINDOWS 10 (или выше). Кроме того, ПС КМС может быть задействован на рабочих станциях с многоядерными процессорами и 64-разрядной ОС LINUX.

Для записи комплекса программ и библиотек требуется около 35 Гб свободного пространства накопителя. При работе для записи результатов работы одного типичного задания с тремя высотными зонами потребуется около 200 Мб.

Время расчёта одного задания на персональном компьютере может варьироваться в зависимости от сложности задачи и архитектуры компьютера. Файлы листингов для ненулевых MPI-процессов располагаются в папке LST, а регистрационные данные – в папке REG. Результаты выполнения задачи выводятся в файл с расширением «.fin».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белл Д., Глесстон С. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974. с. 19-20.
2. Михайлов Г.А., Медведев И.Н. Оптимизация весовых алгоритмов статистического моделирования – Новосибирск: Омега Принт, 2011. – 304 с.
3. С++17. Электронный ресурс: <https://en.cppreference.com/w/cpp/17.html> (дата обращения 31.12.2025).
4. Белоусов В.И., Гомин Е.А., Гуревич М.И., Давиденко В.Д., Дудкин К.О., Дьячков И.И., Иоаннисиан М.В., Малков М.Р., Писарев А.Н., Чернов К.Г. Программный комплекс КИР и его возможности. — Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Сер. Ядерно-реакторные константы, 2025, вып. 2, с. 66-79.
5. F.B. Brown, J.T. Goorley, & J.E. Sweezy, “MCNP5 Parallel Processing Workshop”, Workshop on parallel processing with MCNP5, presented at the ANS Mathematics & Computation Topical Meeting, Gatlinburg TN, April 11, 2003. Covers parallel Monte Carlo on Unix, Linux, & Windows systems, LA-UR-03-2228 (April, 2003).
6. Brown F.B., Booth T.E. et al. MCNP — a General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. LA-UR-03-1987, LANL, 2003.
7. Leppänen J., Aufiero M., Fridman E., Rachamin R., Marck S. Calculation of effective point kinetics parameters in the Serpent 2 Monte Carlo code // Annals of Nuclear Energy, Volume 65, Pages 272-279. – 2014.
8. Давиденко В.Д. Разработка детерминированных моделей повышенной точности и программных комплексов для прямого моделирования физических процессов в ядерных реакторах: Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук: Специальность 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / Давиденко Владимир Дмитриевич. Москва, 2017. – 253 с.

9. THE HDF5® LIBRARY & FILE FORMAT. Электронный ресурс:
<https://www.hdfgroup.org/solutions/hdf5> (дата обращения 31.05.2023).
10. Gurevich M.I., Pryanichnikov A.V. Algorithms of NCG geometrical module.
— Physics of Atomic Nuclei, ISSN 1063-7788, 2012, vol. 75(14);
p. 1661-1668.
11. J.N. Conlin (ed) A Compact ENDF (ACE) Format Specification // Report LA
UR-19-29016, Los Alamos National Laboratory.
12. Evaluated Nuclear Data File (ENDF), Database Version of 2021-05-14,
Software Version of 2021-09-17. Электронный ресурс:
<https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm> (дата обращения 31.05.2023).
13. Chadwick M.B., Obložinský P., Herman M., Greene N.M. et al. ENDF/B-
VII.0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and
technology. — Nuclear Data Sheets, 2006, vol. 107, p. 2931.
14. Николаев М.Н. РОСФОНД — российская национальная библиотека
оценённых нейтронных данных. — В мире науки, 2006, № 9, с. 78—81.
15. Забродская С.В., Игнатюк А.В., Кошечев В.Н., Манохин В.Н., Николаев
М.Н., Проняев В.Г. РОСФОНД — российская национальная библиотека
оценённых нейтронных данных. — ВАНТ. Сер. Ядерные константы,
2007, № 1—2, с. 3-21.
16. РОСФОНД — РОСсийская библиотека Файлов Оценённых Нейтронных
Данных. Под ред. М.Н. Николаева. Электронный ресурс:
<https://www.ippe.ru/reactors/reactor-constants-datacenter/rosfond-neutron-database> (дата обращения 21.01.2025).
17. Brown D.A., Chadwick M.B., Capote R., Kahler A.C. et al. ENDF/B-VIII.0:
the 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project
cross sections, new standards and thermal scattering data. — Nuclear Data
Sheets, 2018, vol. 148, p. 1-142.
18. The Joint Evaluated Fission and Fusion File (JEFF, NEA). Электронный
ресурс: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_20182/jeff (дата обращения
21.03.2024).

19. Nakagawa T., Shibata K., Chiba S., Fukahori T., Nakajima Y., Kikuchi Y., Kawano T., Kanda Y., Ohsawa T., Matsunobu H., Kawai M., Zukeran A., Watanabe T., Igarasi S., Kosako K., T. Asami. Japanese evaluated nuclear data library. Version 3. Revision-2: JENDL-3.2. — J. Nucl. Sci. Technol., 1995, vol. 32, p. 1259.
20. R.E. MacFarlane, D.W. Muir, R.M. Boicourt, A.C. Kahler. The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2012. Theoretical Division Los Alamos National Laboratory. LA-UR-12-27079 (2012).
21. MacFarlane R.E., Muir D.W., Boicourt R.M., Kahler A.C. The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 2012. Theoretical Division Los Alamos National Laboratory. LA-UR-12-27079, 2012.
22. В.В. Синица. Пакет Процессинговых Программ GRUCON-D, версия 2019-12, свидетельство о государственной регистрации № 2014663246. Электронный ресурс: <https://www-nds.iaea.org/grucon> (дата обращения 31.05.2023).
23. Синица В.В. Пакет процессинговых программ GRUCON-D, версия 2019-12. Свидетельство о государственной регистрации № 2014663246. Доступно на сайте <https://www-nds.iaea.org/grucon/>.
24. Кощеев В.Н., Перегудов А.А., Рожихин Е.В., Семенов М.Ю., Якунин А.А. Использование методики температурно-пропорциональных концентраций для расчёта моделей быстрых реакторных установок. — ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2019, вып. 2, с. 68-76.
25. Mattes M., Keinert J. Thermal Neutron Scattering Data for the Moderator Materials H₂O, D₂O, and ZrH_x in ENDF-6 Format and as ACE Library for MCNP(X) Codes. Report INDC (NDS)-0470, IAEA, April 2005.
26. В.И. Белоусов, М.И. Гуревич, В.Д. Давиденко, М.В. Иоаннисиан, К.Ф. Раскач. Разработка и реализация в программе КИР-С метода учёта непрерывности распределения плотности материалов. — ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2024, вып. 1, с. 11-18.

- 27.Белоусов В.И., Иоаннисиан М.В., Малков М.Р., Писарев А.Н., Чернов К.Г. Разработка модуля расчёта γ -транспорта методом Монте-Карло. — ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2025, вып. 5, с. 30-38.
- 28.Белоусов Н.И., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Программа UNK для детального расчёта спектра в ячейке ядерного реактора: Препринт ИАЭ-6083/4. Москва, 1998.
- 29.Davidenko V.D., Tsibulsky V.F. Detailed calculation of neutron spectrum in cell of a nuclear reactor. — In: Intern. Conf. on the Physics of Nuclear Science and Technology. Long Island, New York, USA, Oct. 5-8, 1998, p. 1755-1760.
- 30.Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Расчёт выгорания в программе UNK. — В сб.: Нейтроника-1999. Обнинск, 2000.
- 31.В.И. Белоусов, М.И. Гуревич, В.Д. Давиденко, М.В. Иоаннисиан, К.Ф. Раскач, К.Г. Чернов. Модификация алгоритма Франк-Каменецкого для параллельных вычислений. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2024, вып. 2, с. 25-37.
- 32.В.И. Белоусов, Е.А. Гомин, В.Д. Давиденко, И.И. Дьячков, М.В. Иоаннисиан, К.Ф. Раскач, А.Н. Писарев. Алгоритмы расчёта эффективных параметров уравнения точечной кинетики на основе метода Монте-Карло, их верификация и валидация. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2024, вып. 1, с. 19-31.
- 33.М. В. Иоаннисиан, Е. А. Гомин, В. Д. Давиденко, И. И. Дьячков. О моделировании начального источника мгновенных нейтронов для решения нестационарных задач методом Монте-Карло. Нейтроника-2019.
- 34.Darwish, M.; Mangani, L.; Moukalled, F. The finite volume method in computational fluid dynamics : an advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab®. — 1 st ed.. — Springer, 2015. — Т. 113. — xxiv+791 с. — (Fluid mechanics and its applications). — ISBN 978-3-319-16873-9.
- 35.OpenFOAM and The OpenFOAM Foundation. Электронный ресурс: <https://openfoam.org/> (дата обращения 20.08.2024).

36. Белоусов В.И., Давиденко В.Д., Дьячков И.И., Елкин Н.Н., Малков М.Р., Иоаннисиан М.В., Чернецкий М.Г., Черницкая А.А., Зборовский В.Г., Лиханский В.В., Хоружий О.В. Код КИР-С-ТГ для тестового взаимосвязанного теплогидравлического и нейтронно-физического расчёта реактора типа ВВЭР-СКД. — Атомная энергия. 2023, том 134, номер 5-6, с. 226-230.
37. Chaudat J.P., Darrouzet M., Fisher E.A. Experiment in Pure Uranium Lattices with Unit K_{∞} Assemblies: SNEAK818Z, UK1 and UK5 in ERMINE and HARMONIE. KFK-1865 (CEA-R-4552). (1974)
38. Гомин Е.А., Давиденко В.Д., Широков Р.В. Тестирование программы КИР-С на критических экспериментах с растворным топливом. — ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2020, вып. 4, с. 26-32.
39. International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (ICSBER). Электронный ресурс: https://www.oecd-neo.org/jcms/pl_24498/international-criticality-safety-benchmark-evaluation-project-icsber (дата обращения 21.03.2024).
40. NEA (2019). "IRPhe Handbook 2017", International Reactor Physics Evaluation Project Handbook (database), <https://doi.org/10.1787/fa47762a-en> (дата обращения 21.03.2024).
41. J. Dugone, "SPERT III REACTOR FACILITY: E-CORE REVISION" U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION, 1965.
42. Alex Levinsky, Ville Valtavirta, Frederick P. Adams, Vinicius N.P. Anghel, "Modeling of the SPERT transients using Serpent 2 with time-dependent capabilities", Annals of Nuclear Energy, 125, 2019.
43. Писарев А.Н. Моделирование нейтронной кинетики в активной зоне реактора SPERT III в программе КИР-С. Нейтроника-2024.
44. Белоусов В.И., Бояринов В.Ф., Давиденко В.Д., Дьячков И.И., Иоаннисиан М.В., Чернов К.Г. Результаты расчётов кинетического бенчмарка C5G7 TD методом Монте-Карло. — ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2023, вып. 3, с. 18-32.

- 45.Бояринов В.Ф., Давиденко В.Д., Моряков А.В. Транспортный вариант нестационарного диффузионного теста BSS-6. — Там же, 2019, вып. 2, с. 49-63.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Рассматриваемая модель (шестигранная ячейка типа ВВЭР с тепловыделяющим элементом (ТВЭЛ), в котором присутствует оболочка и зазор).

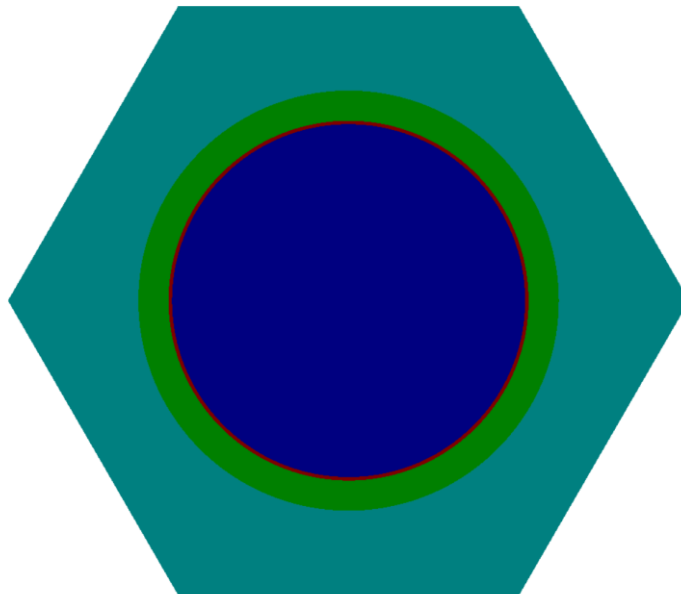


Рисунок А.1. Модель ячейки ВВЭР

Входной файл “kmc.ini” для модели «vver»:

```
VAR vver
GEO vver.ncg
PHS physics.dat
REG vver.reg
RRS vver.rrs
TRA vver.tra
```

Содержание файла «vver.ncg»:

```
HDNW 1 0 500
CONT B B T T T T T T
EQU HZ=373.0
HEX N1 0. 0. 0. 1.099852 0.635 HZ
C= TELA TVELA
RCZ N2 0. 0. 0. HZ 0.4525
RCZ N3 0. 0. 0. HZ 0.3875
RCZ N4 0. 0. 0. HZ 0.3800
*ТОЛЩИНА СЛОЯ ПО ТОПЛИВУ
EQU DZ=HZ/2
EQU POGR=DZ*1
SLA T1 0. 0. 0. 0. 0. DZ
SLA T2 0. 0. 1*DZ 0. 0. DZ
SLA BOR 0. 0. HZ 0. 0. -POGR
END
R001 4 T1 /1:1/1
R001 4 T2 /2:1/2
R002 3 -4 /3:4/3
R003 2 -3 /3:2/3
R004 1 -2 BOR /3:3/3
R004 1 -2 -BOR /3:3/3 *BOR MATERIAL, TO SET BOR - "/3:5/3"
END
FINISH
```

Содержание файла «*physics.dat*»

```
PHS
task_type=n
nat="//comsh\shared$\kmc_lib\nat.dat"
aw="//comsh\shared$\kmc_lib\aw.dat"
temp_def = 300
print="out.phs"
lib_n=(
  "\\comsh\shared$\kir_library\e-71.njoy.tpc-poly.hdf\cfg_tpc\default.neu"
)
```

```
mat name=fuel burn=no
U235 2.1907022E-04
U238 2.2975370E-02
O164.6388E-02
```

```
mat name=clad burn=no
Zr90 2.1984585E-02
Zr91 4.7943060E-03
Zr92 7.3281950E-03
Zr94 7.4264740E-03
Zr96 1.1964400E-03
Nb93 4.3200000E-04
Hf174 1.0692000E-08
Hf176 3.4359600E-07
Hf177 1.2279960E-06
Hf178 1.8016020E-06
Hf179 8.9951400E-07
Hf180 2.3166000E-06
```

```
mat name=water burn=no
H1 6.6714000E-02
O16 3.3357000E-02
```

```
mat name=foil burn=no
1.0000000E-06 Al27
```

```
mat name=water_with_bor burn=no
H1 6.6714000E-02
O16 3.3357000E-02
B10 5.0000000E-06
```

Содержание файла «*vver.reg*»

```
REG
KEFF
END
FINISH
```

Содержание файла «*vver.rrs*»:

```
RRS
SOURCE 2
PROBABILITY 0.5 0.5
S NAME=S1 SPECTRUM=SP1 PNT 0.0 0.0 150.0
S NAME=S2 SPECTRUM=SP2 PNT 0.0 0.0 323.0
END
SPECTRUM SP1
ENERGY
2E6
PROBABILITY
1.0
END
SPECTRUM SP2
ENERGY
2E6
PROBABILITY
1.0
END
FINISH
```

Содержание файла «vver.tra»

NTOT 1000
NSKI 50
FINISH
MXSR 1000
FINISH

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Рассматривается легководный реактор типа PWR. Модель представляет собой $\frac{1}{4}$ активной зоны. Данная модель задаётся с использованием сложной геометрии (сетей). Также, для описания органов регулирования используется решётка, что позволяет изменять положение органов регулирования независимо от основной модели.

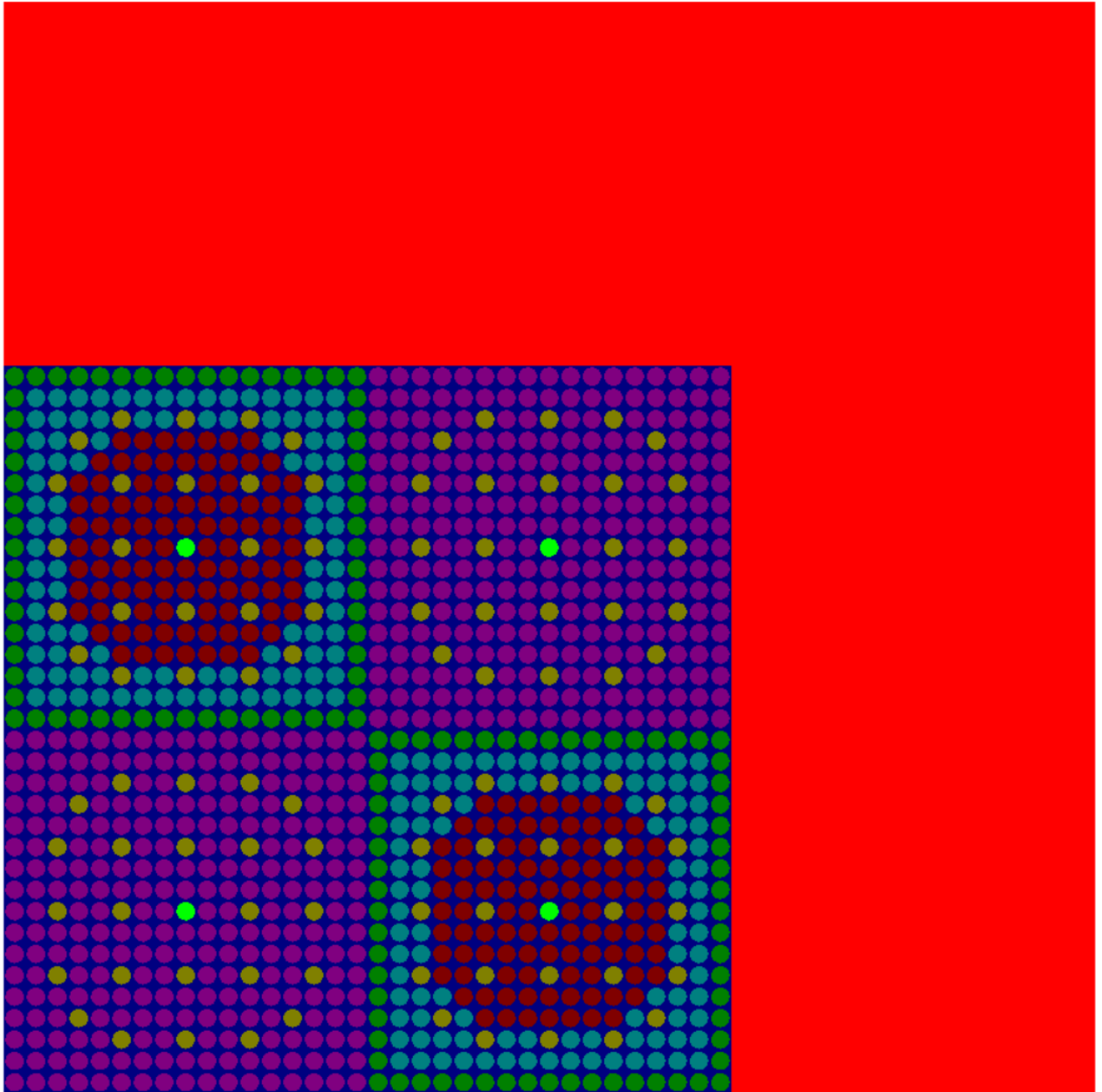


Рисунок Б.1. Схема активной зоны PWR

HDNW 1 0 200000
*Параметры констант
EQU HZ=128.52
EQU HZA=149.94
EQU XNet=-21.42
EQU YNet=-42.84
EQU Step=1.26
*Граничные условия
CONT T T B B B B

*----- Active Zone -----

***Основной контейнер**

***Описание тел**

RPP K2 -21.42 42.84 -42.84 21.42 -21.42 HZA

RPP K1 -21.42 21.42 -42.84 0.0 0.0 HZA

END

***Описание Зон**

Z1 K2 -K1 /2:12/2

Z2 (UW) K1 /1:12/1

END

***Описание ячеек (для каждого типа тепловыделяющего элемента используется свой прототип ячейки, который состоит из названия прототипа и стандартного описание тел и зон)**

* -----MOX fuel with enrichment 4.3%-----

CELL M43

SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. HZA

RCZ N2 0.63 0.63 0.0 HZ 0.54

END

z6 1 -2 /1:1/1

z7 2 /1:2/1

END

* -----MOX fuel with enrichment 7.0%-----

CELL M70

SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. HZA

RCZ N2 0.63 0.63 0.0 HZ 0.54

END

z6 1 -2 /1:1/1

z7 2 /1:3/1

END

* -----MOX fuel with enrichment 8.7%-----

CELL M87

SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. HZA

RCZ N2 0.63 0.63 0.0 HZ 0.54

END

z6 1 -2 /1:1/1

z7 2 /1:4/1

END

* -----UO2 fuel-----

CELL UO2

SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. HZA

RCZ N2 0.63 0.63 0.0 HZ 0.54

END

z6 1 -2 /1:1/1

z7 2 /1:5/1

END

* -----Guide Tube for FUEL ASSEMBLIES 1-----

CELL GT0

SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. HZA

RCZ N2 0.63 0.63 0.0 HZA 0.54

END

z6 1 -2 /1:1/1

z7 2 /1:6/1

END

* -----Guide Tube for FUEL ASSEMBLIES 1-----

CELL GT1

SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. HZA

RCZ N2 0.63 0.63 0.0 HZ 0.54

END

z6 1 -2 /1:1/1

z7 2 /1:6/1

END

* -----Guide Tube for FUEL ASSEMBLIES 2-----

CELL GT2

SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. HZA

RCZ N2 0.63 0.63 0.0 HZ 0.54

END

z6 1 -2 /1:1/1

z7 2 /1:7/1

END

* -----Guide Tube for FUEL ASSEMBLIES 3-----

CELL GT3

SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. HZA

RCZ N2 0.63 0.63 0.0 HZ 0.54

END

z6 1 -2 /1:1/1

z7 2 /1:8/1

END
 * -----Guide Tube for FUEL ASSEMBLIES 4-----
 CELL GT4
 SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. HZA
 RCZ N2 0.63 0.63 0.0 HZ 0.54
 END
 z6 1 -2 /1:1/1
 z7 2 /1:9/1
 END
 * -----Fission Chamber rod-----
 CELL FCH
 SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. HZA
 RCZ N2 0.63 0.63 0.0 HZ 0.54
 END
 z6 1 -2 /1:1/1
 z7 2 /1:10/1
 END
***Формирование сети**
*** Название сети и начала координат относительно глобальной геометрии**
 NET UW -21.42, -42.84, 0.0, 34, 34
 * 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 *24 25 26 27 28 29 30
 31 32 33 34
*** Заполнение расстановки прототипов ячеек**
 T01 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M43 M43 M43 M43
 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43
 T02 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 M70 M70
 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M43
 T03 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 M70 M70
 GT0 M70 M70 GT0 M70 M70 GT0 M70 M70 M70 M70 M43
 T04 UO2 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 GT0 M70
 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 GT0 M70 M70 M43
 T05 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 M70 M87
 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M70 M43
 T06 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 M43 M70 GT0 M87 M87
 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M70 M43
 T07 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 M87 M87
 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M43
 T08 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 M87 M87
 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M43
 T09 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 FCH UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 M43 M70 GT0 M87 M87
 GT0 M87 M87 FCH M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M70 M43
 T10 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 M87 M87
 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M43
 T11 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 M87 M87
 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M43
 T12 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 M43 M70 GT0 M87 M87
 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M70 M43
 T13 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 M70 M87
 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M70 M43
 T14 UO2 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 GT0 M70
 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 GT0 M70 M70 M43
 T15 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 M70 M70
 GT0 M70 M70 GT0 M70 M70 GT0 M70 M70 M70 M70 M43
 T16 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M70 M70 M70 M70
 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M43
 T17 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 M43 M43 M43 M43 M43
 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43
 * 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 - - - - -
 T18 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 T19 M43 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 T20 M43 M70 M70 M70 M70 GT0 M70 M70 GT0 M70 M70 GT0 M70 M70 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 GT0
 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2
 T21 M43 M70 M70 GT0 M70 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 GT0 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 UO2
 T22 M43 M70 M70 M70 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 T23 M43 M70 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M70 M43 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0
 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2
 T24 M43 M70 M70 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 T25 M43 M70 M70 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2

T26 M43 M70 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 FCH M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M70 M43 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0
 UO2 UO2 FCH UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2
 T27 M43 M70 M70 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 T28 M43 M70 M70 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 T29 M43 M70 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M87 M87 GT0 M70 M43 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0
 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2
 T30 M43 M70 M70 M70 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 T31 M43 M70 M70 GT0 M70 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M87 M70 GT0 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 UO2
 T32 M43 M70 M70 M70 M70 GT0 M70 M70 GT0 M70 M70 GT0 M70 M70 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 GT0
 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 GT0 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 T33 M43 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M70 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 T34 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 M43 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2 UO2
 END

***Прототипы органов регулирования для решётки**

*** Для каждой ТВС введена собственная решётка, для независимости групп органов регулирования друг от друга при изменении положения**

CELL CR

SBOX N1 1.26 0. 0. 0. 1.26 0. 0. 0. 2*HZ

RCZ N2 0.63 0.63 HZ HZ 0.54

RCZ N3 0.63 0.63 0. HZ 0.54

END

gz01 1 -2 -3 /3:1/1

gz02 2 /4:11/1

gz 03 3 /5:6/1

END

LCELL CR1

RCZ N1 0.63 0.63 0.0 HZA 0.54

END

crz1 (NT1) 1 /3:11/1

END

*

*** Описание решётки**

NET NT1 0.0, 0.0, 0.0, 1, 1

T01 CR

END

ENDL

LATT GLTL Z1 Z2

LISTEL CR1

*

*** Расположение решётки**

PARM 2*Step-21.42 5*Step-42.84 0.0

2*Step-21.42 8*Step-42.84 0.0

2*Step-21.42 11*Step-42.84 0.0

*

3*Step-21.42 3*Step-42.84 0.0

3*Step-21.42 13*Step-42.84 0.0

*

5*Step-21.42 2*Step-42.84 0.0

5*Step-21.42 5*Step-42.84 0.0

5*Step-21.42 8*Step-42.84 0.0

5*Step-21.42 11*Step-42.84 0.0

5*Step-21.42 14*Step-42.84 0.0

*

8*Step-21.42 2*Step-42.84 0.0

8*Step-21.42 5*Step-42.84 0.0

8*Step-21.42 11*Step-42.84 0.0

8*Step-21.42 14*Step-42.84 0.0

*

11*Step-21.42 2*Step-42.84 0.0

11*Step-21.42 5*Step-42.84 0.0

11*Step-21.42 8*Step-42.84 0.0

11*Step-21.42 11*Step-42.84 0.0

11*Step-21.42 14*Step-42.84 0.0

*

13*Step-21.42 3*Step-42.84 0.0

13*Step-21.42 13*Step-42.84 0.0

*

14*Step-21.42 5*Step-42.84 0.0

14*Step-21.42 8*Step-42.84 0.0

```

14*Step-21.42 11*Step-42.84 0.0
*
LCELL CR2
RCZ N1 0.63 0.63 0.0 HZA 0.54
END
crz1 (NT2) 1 /3:11/1
END
*
NET NT2 0.0, 0.0, 0.0, 1, 1
T01 CR
END
ENDL
LATT GLTL Z1 Z2
LISTEL CR2
*
PARM 2*Step-21.42 22*Step-42.84 0.0
      2*Step-21.42 25*Step-42.84 0.0
      2*Step-21.42 28*Step-42.84 0.0
*
      3*Step-21.42 20*Step-42.84 0.0
      3*Step-21.42 30*Step-42.84 0.0
*
      5*Step-21.42 19*Step-42.84 0.0
      5*Step-21.42 22*Step-42.84 0.0
      5*Step-21.42 25*Step-42.84 0.0
      5*Step-21.42 28*Step-42.84 0.0
      5*Step-21.42 31*Step-42.84 0.0
*
      8*Step-21.42 19*Step-42.84 0.0
      8*Step-21.42 22*Step-42.84 0.0
      8*Step-21.42 28*Step-42.84 0.0
      8*Step-21.42 31*Step-42.84 0.0
*
      11*Step-21.42 19*Step-42.84 0.0
      11*Step-21.42 22*Step-42.84 0.0
      11*Step-21.42 25*Step-42.84 0.0
      11*Step-21.42 28*Step-42.84 0.0
      11*Step-21.42 31*Step-42.84 0.0
*
      13*Step-21.42 20*Step-42.84 0.0
      13*Step-21.42 30*Step-42.84 0.0
*
      14*Step-21.42 22*Step-42.84 0.0
      14*Step-21.42 25*Step-42.84 0.0
      14*Step-21.42 28*Step-42.84 0.0
*
LCELL CR3
RCZ N1 0.63 0.63 0.0 HZA 0.54
END
crz1 (NT3) 1 /3:11/1
END
*
NET NT3 0.0, 0.0, 0.0, 1, 1
T01 CR
END
ENDL
LATT GLTL Z1 Z2
LISTEL CR3
*
PARM 19*Step-21.42 5*Step-42.84 0.0
      19*Step-21.42 8*Step-42.84 0.0
      19*Step-21.42 11*Step-42.84 0.0
*
      20*Step-21.42 3*Step-42.84 0.0
      20*Step-21.42 13*Step-42.84 0.0
*
      22*Step-21.42 2*Step-42.84 0.0
      22*Step-21.42 5*Step-42.84 0.0
      22*Step-21.42 8*Step-42.84 0.0
      22*Step-21.42 11*Step-42.84 0.0
      22*Step-21.42 14*Step-42.84 0.0
*
      25*Step-21.42 2*Step-42.84 0.0
      25*Step-21.42 5*Step-42.84 0.0
      25*Step-21.42 11*Step-42.84 0.0

```

```

25*Step-21.42 14*Step-42.84 0.0
*
28*Step-21.42 2*Step-42.84 0.0
28*Step-21.42 5*Step-42.84 0.0
28*Step-21.42 8*Step-42.84 0.0
28*Step-21.42 11*Step-42.84 0.0
28*Step-21.42 14*Step-42.84 0.0
*
30*Step-21.42 3*Step-42.84 0.0
30*Step-21.42 13*Step-42.84 0.0
*
31*Step-21.42 5*Step-42.84 0.0
31*Step-21.42 8*Step-42.84 0.0
31*Step-21.42 11*Step-42.84 0.0
*
LCELL CR4
RCZ N1 0.63 0.63 0.0 HZA 0.54
END
crz1 (NT4) 1 /3:11/1
END
*
NET NT4 0.0, 0.0, 0.0, 1, 1
T01 CR
END
ENDL
LATT GLTL Z1 Z2
LISTEL CR4
*
PARM 19*Step-21.42 22*Step-42.84 0.0
19*Step-21.42 25*Step-42.84 0.0
19*Step-21.42 28*Step-42.84 0.0
*
20*Step-21.42 20*Step-42.84 0.0
20*Step-21.42 30*Step-42.84 0.0
*
22*Step-21.42 19*Step-42.84 0.0
22*Step-21.42 22*Step-42.84 0.0
22*Step-21.42 25*Step-42.84 0.0
22*Step-21.42 28*Step-42.84 0.0
22*Step-21.42 31*Step-42.84 0.0
*
25*Step-21.42 19*Step-42.84 0.0
25*Step-21.42 22*Step-42.84 0.0
25*Step-21.42 28*Step-42.84 0.0
25*Step-21.42 31*Step-42.84 0.0
*
28*Step-21.42 19*Step-42.84 0.0
28*Step-21.42 22*Step-42.84 0.0
28*Step-21.42 25*Step-42.84 0.0
28*Step-21.42 28*Step-42.84 0.0
28*Step-21.42 31*Step-42.84 0.0
*
30*Step-21.42 20*Step-42.84 0.0
30*Step-21.42 30*Step-42.84 0.0
*
31*Step-21.42 22*Step-42.84 0.0
31*Step-21.42 25*Step-42.84 0.0
31*Step-21.42 28*Step-42.84 0.0
*Окончание ввода данных геометрического модуля
FINISH GM
*===== SOURCE =====
*Модуль источника
RRS
SOURCE 1
S NAME=S1 SPECTRUM=SP1 PNT 0.64 -22.07 500
END
SPECTRUM SP1
ENERGY
1E6
PROBABILITY
1.0
END
FINISH
*===== PARAMETERS =====
*Модуль регистрации

```

RUGA
KEFF
END
FINISH
*

***Транспортный модуль**

NTOT 10000
NBAT 1
NSKI 100
FINISH
*

NAMV c5g7
MXSR 2000
DTZM 100
FINISH

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Рассматривается а.з. реактора ВВЭР, которая формируется через гексагональную решётку ТВС.

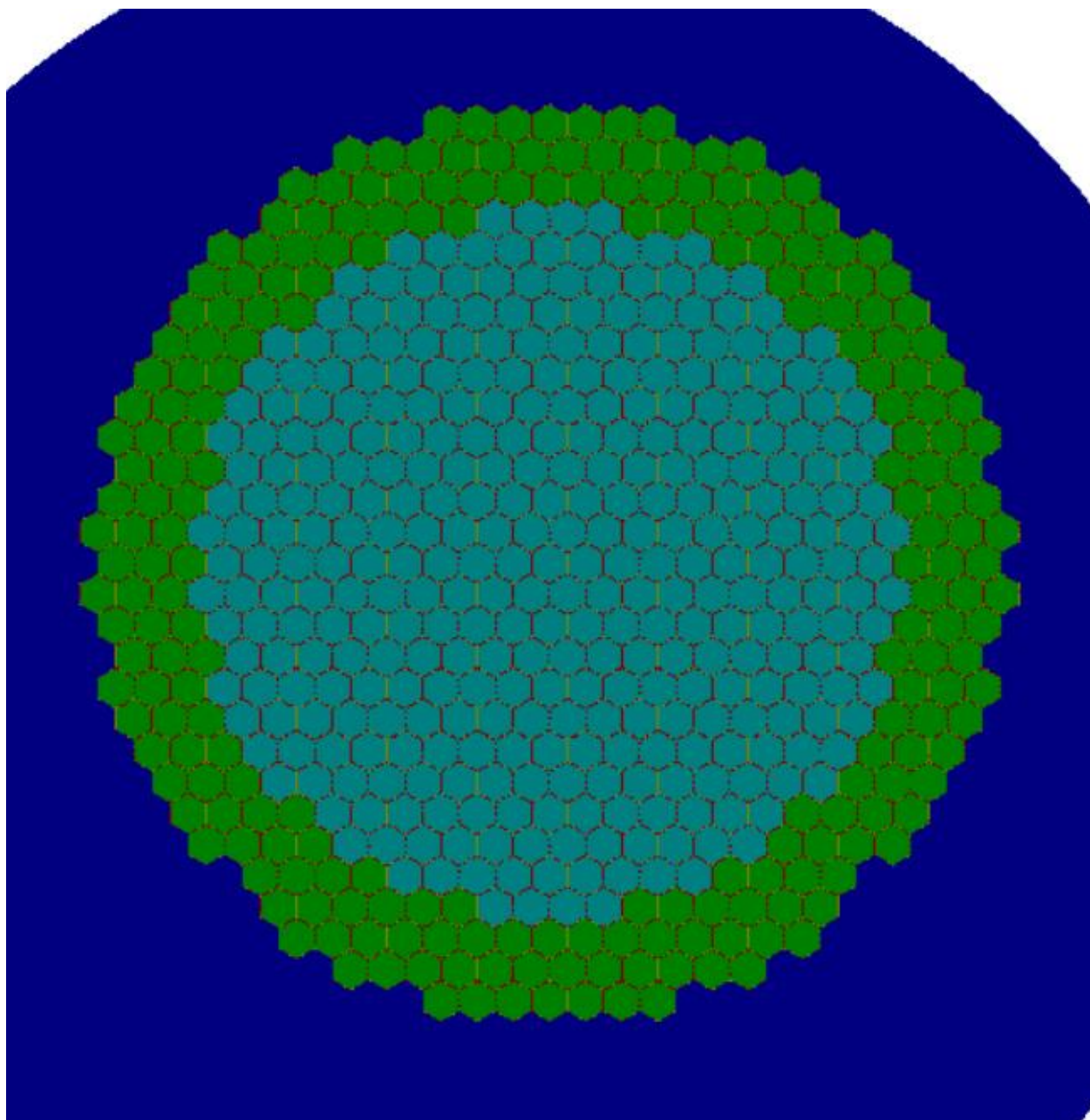


Рисунок В.1. Схема активной зоны ВВЭР

В каждой ТВС располагается гексагональная сетка тепловыделяющих элементов.

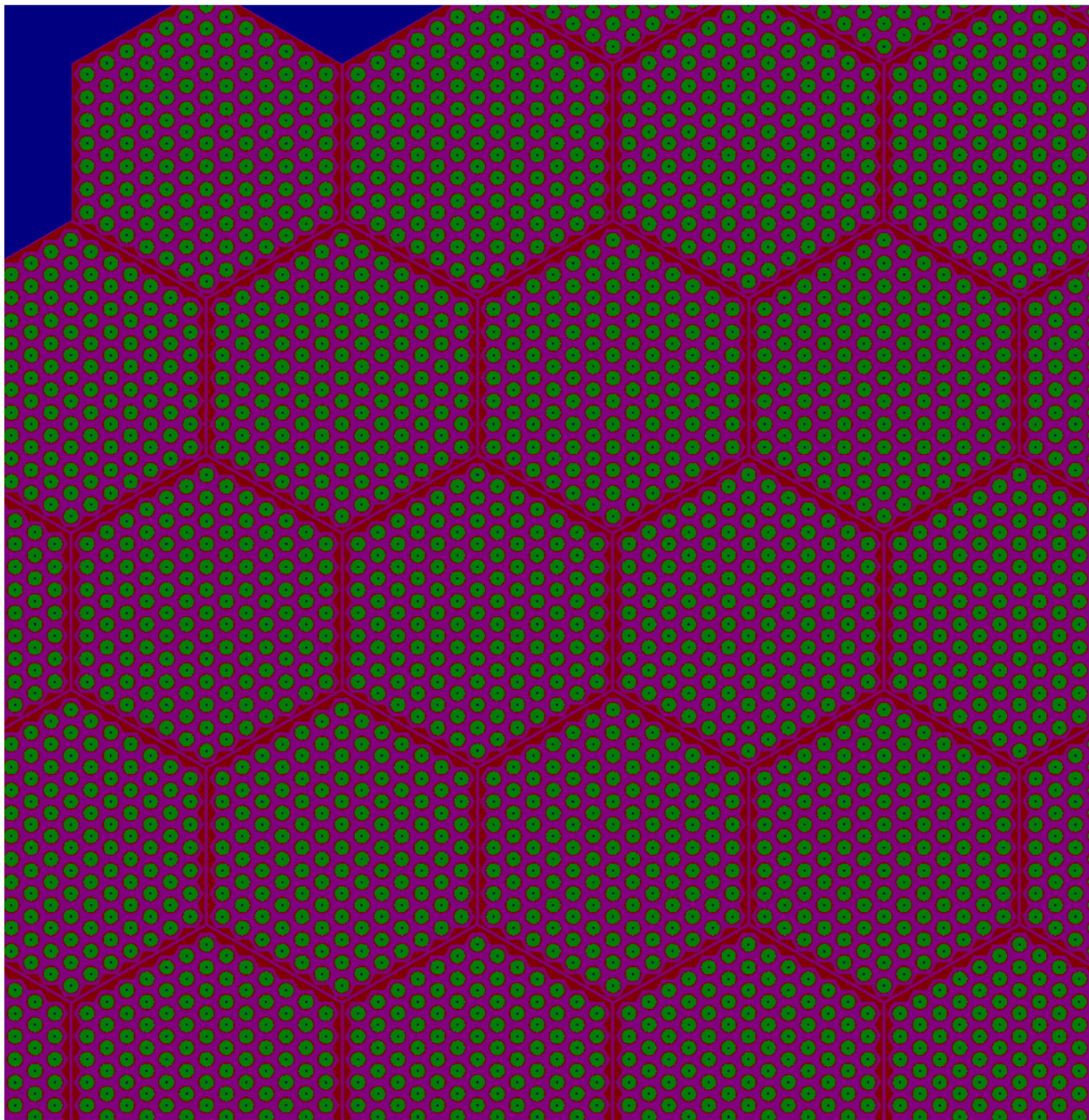


Рисунок В.2. Схема расстановки ТВЭЛОВ

HDNW 1 0 2000
CONT B B B

*=====

*-----*Parameters TWS M487UG*-----*

EQU HZ7G=236
EQU HKR=18.
EQU HZ7=236
EQU Key=14.5
EQU Wall=0.15
EQU Angle=30

*-----*TVEL, TVEG, Central tube*-----*

EQU Step2=1.23
EQU Rhole=0.06
EQU Rfuel=0.388
EQU Rshel=0.455

EQU HZtv=10
 EQU Rctex=0.515
 EQU Rctin=0.45
 *-----*END Parameters*-----*

RCZ AZ 0 0 -50. 400 300.
 END
 B1 AZ /1:1/3
 END

CELL CEL1
 SHEX A1 1.230 236.00 30
 RCZ A2 0.00 0.00 0.000 236.00 0.455
 RCZ A3 0.00 0.00 0.000 236.00 0.387
 RCZ A4 0.00 0.00 0.000 236.00 0.380
 RCZ A5 0.00 0.00 0.000 236.00 0.060
 END
 z1 A5 / 1: 2/1
 z2 A4 -A5 / 2: 2/1
 z3 A3 -A4 / 3: 2/1
 z4 A2 -A3 / 4: 2/1
 z5 A1 -A2 / 5: 2/1
 END

CELL CEL2
 SHEX A1 1.230 236.00 30
 RCZ A2 0.00 0.00 0.000 236.00 0.455
 RCZ A3 0.00 0.00 0.000 236.00 0.387
 RCZ A4 0.00 0.00 0.000 236.00 0.380
 RCZ A5 0.00 0.00 0.000 236.00 0.060
 END
 z1 A5 / 1: 3/1
 z2 A4 -A5 / 2: 3/1
 z3 A3 -A4 / 3: 3/1
 z4 A2 -A3 / 4: 3/1
 z5 A1 -A2 / 5: 3/1
 END

CELL CEL3
 SHEX A1 1.230 18.000 30
 RCZ A2 0.00 0.00 0.000 18.000 0.455
 RCZ A3 0.00 0.00 0.000 18.000 0.387
 RCZ A4 0.00 0.00 0.000 18.000 0.380
 RCZ A5 0.00 0.00 0.000 18.000 0.060
 END
 z1 A5 / 1: 2/1
 z2 A4 -A5 / 2: 2/1
 z3 A3 -A4 / 3: 2/1
 z4 A2 -A3 / 4: 2/1
 z5 A1 -A2 / 5: 2/1
 END

* TWS 214 =====
 * 49W

LCELL C1
 HEX CLAD 0.0 0.0 0.0 Key 0 HZ7
 HEX AZ 0.0 0.0 0.0 Key-Wall 0 HZ7
 END
 z1 (NT) AZ /19:19/2
 z2 CLAD -AZ /20:21/1
 END

NET NT 0.*Step2 -7.0*COS(30)*Step2 0 13 13
 T01 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 0 0 0 0 0 0
 T02 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 0 0 0 0 0
 T03 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 0 0 0 0
 T04 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 0 0 0
 T05 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 0 0
 T06 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 0
 T07 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1
 T08 0 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1
 T09 0 0 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1
 T10 0 0 0 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1
 T11 0 0 0 0 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1
 T12 0 0 0 0 0 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1
 T13 0 0 0 0 0 0 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1 CEL1
 END


```
* TWS 214 =====
* 49W
LCELL C3
HEX CLAD 0.0 0.0 0.0 Key 0 HKR
HEX AZ 0.0 0.0 0.0 Key-Wall 0 HKR
END
z1 (NT) AZ /19:19/2
z2 CLAD -AZ /20:21/1
END
```


L07 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 0 0 0 0 0 0 0
 L06 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 0 0 0 0 0 0 0
 L05 0 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 0 0 0 0 0 0 0
 L04 0 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 0 0 0 0 0 0 0
 L03 0 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 0 0 0 0 0 0 0
 L02 0 0 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 L01 0 0 0 0 C3 C3 C3 C3 C3 C3 C3 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
 FINISH

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Пример 1. Точечный моноэнергетический источник со спектром, принятым по умолчанию.

```
RRS
SOURCE 1
PROBABILITY 1
S Name=U0 Spectrum=Default PNT 9., 9., 117.
END SOURCE
FINISH RRS
```

Пример 2. Точечный моноэнергетический источника с заданным в явном виде спектром, который совпадает с принятым по умолчанию.

```
RRS
SOURCE 1
S NAME=S1 SPECTRUM=SP1 PNT 0.0 0.0 24.5
END SOURCE
SPECTRUM SP1
ENERGY
2E6
PROBABILITY
1.0
END SPECTRUM SP1
FINISH RRS
```

Пример 3. Шестиугольный источник с заданным в явном виде спектром.

```
RRS
SOURCE 1
PROBABILITY 1
*S NAME=S1 SPECTRUM=SP1 PNT -1.732*SH 4.*SH 90
S NAME=S1 SPECTRUM=SP1 HEX 0. 0. 50 14.0607 0. 160.
END SOURCE
SPECTRUM SP1
ENERGY
1 2 3 4 5
PROBABILITY
1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
END SPECTRUM SP1
FINISH RRS
```

Пример 4. Цилиндрический источник с заданным в явном виде спектром.

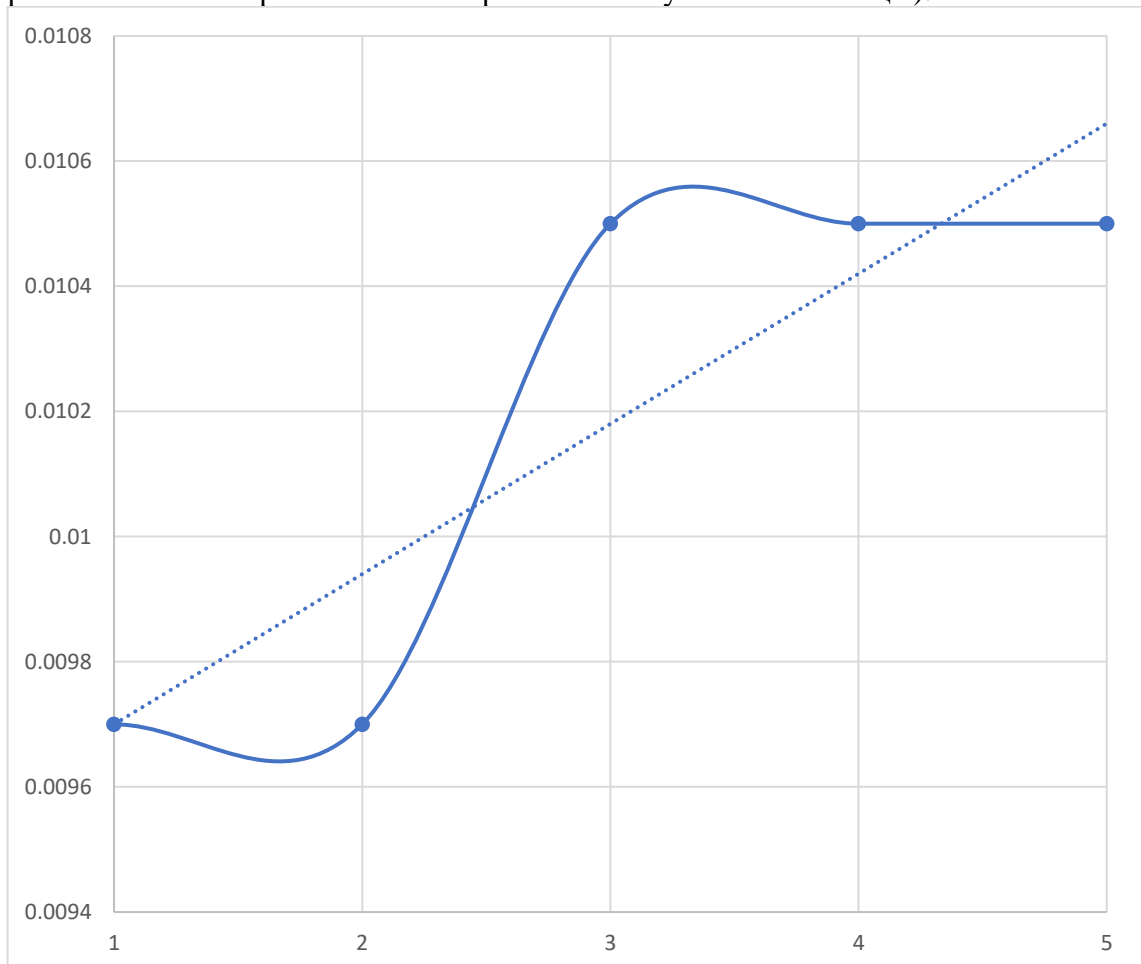
```
RRS
SOURCE 1
PROBABILITY 1
S NAME=S1 SPECTRUM=SP1 RCZ 0. 0. 50 14.0607 160.
END SOURCE
SPECTRUM SP1
ENERGY
1 2 3 4 5
PROBABILITY
1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
END SPECTRUM SP1
FINISH RRS
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

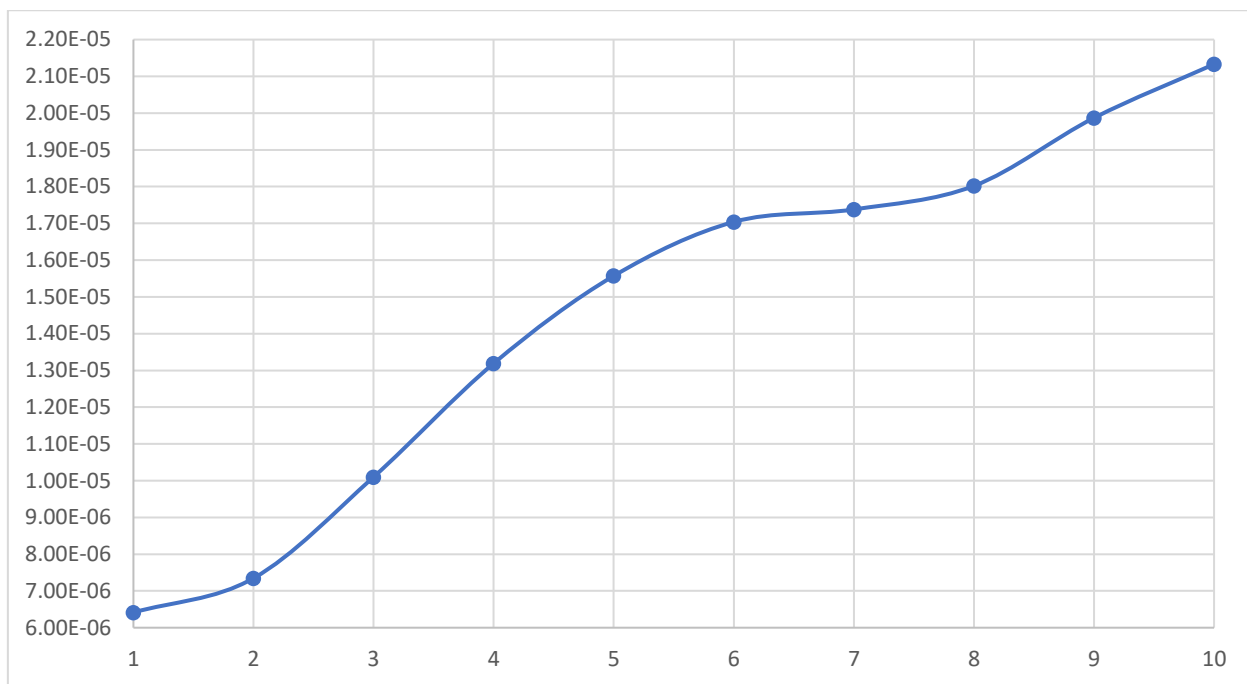
Пример точечного источника с постоянным направлением
(энергетический спектр не зависит от направления испускаемой частицы).

```
RRS
SOURCE 1
PROBABILITY 1
S NAME=S1 ANGLE=ANG0 SPECTRUM=SP1 PNT 1.0 1.0 2.0
END SOURCE
ANGLE ANG0
Degrees
90 90 0
Cosines
0.0 0.0 1.0
END ANGLE ANG0
SPECTRUM SP1
ENERGY
1 2 3 4 5
PROBABILITY
1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
END SPECTRUM SP1
FINISH RRS
```

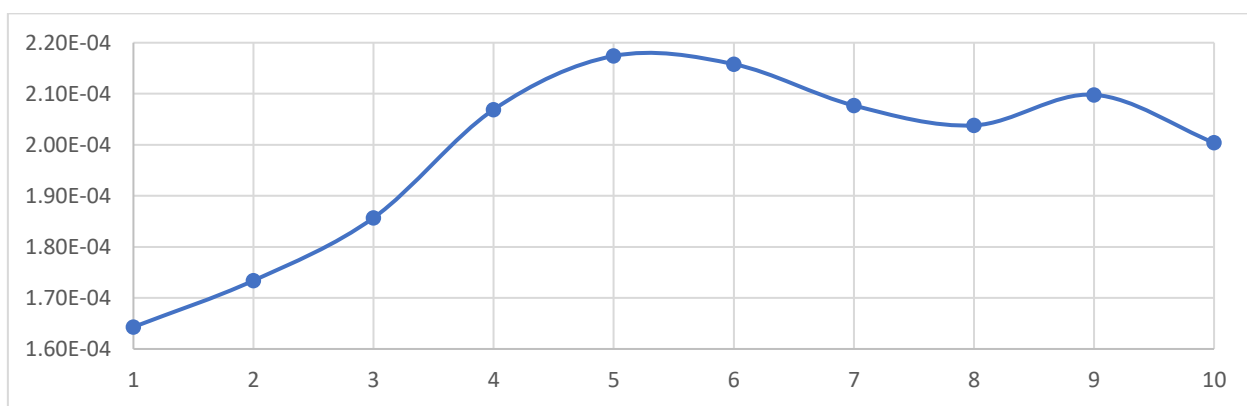
Пример точечного источника с энерго-угловым спектром
(энергетический спектр зависит от направления испускаемой частицы).



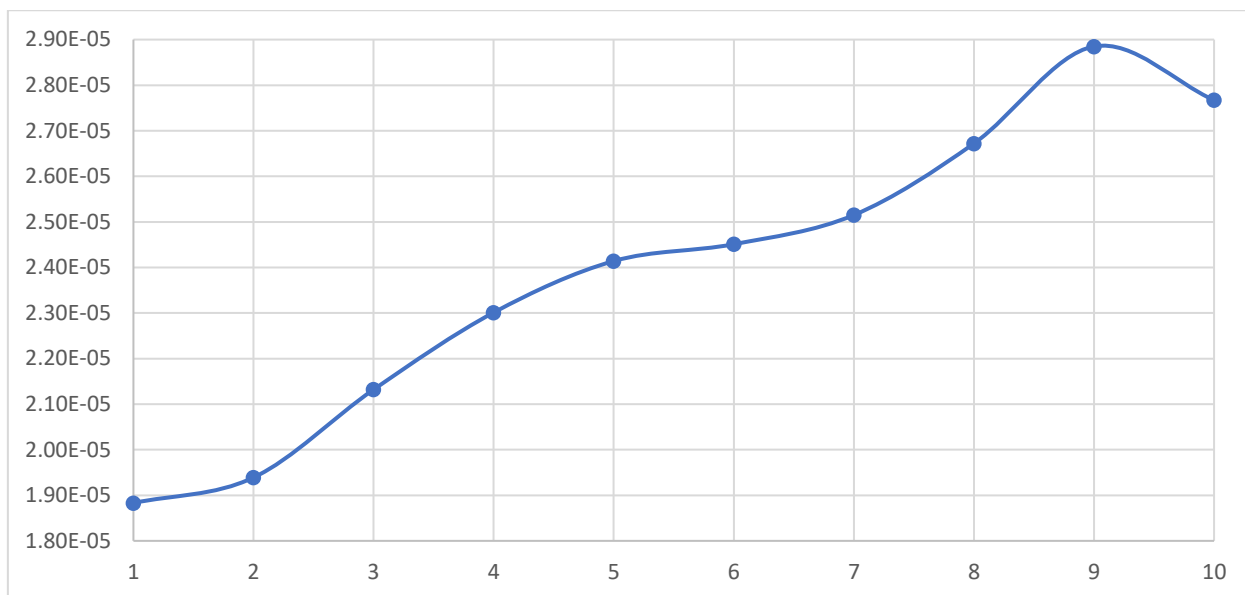
Интервальный угловой спектр



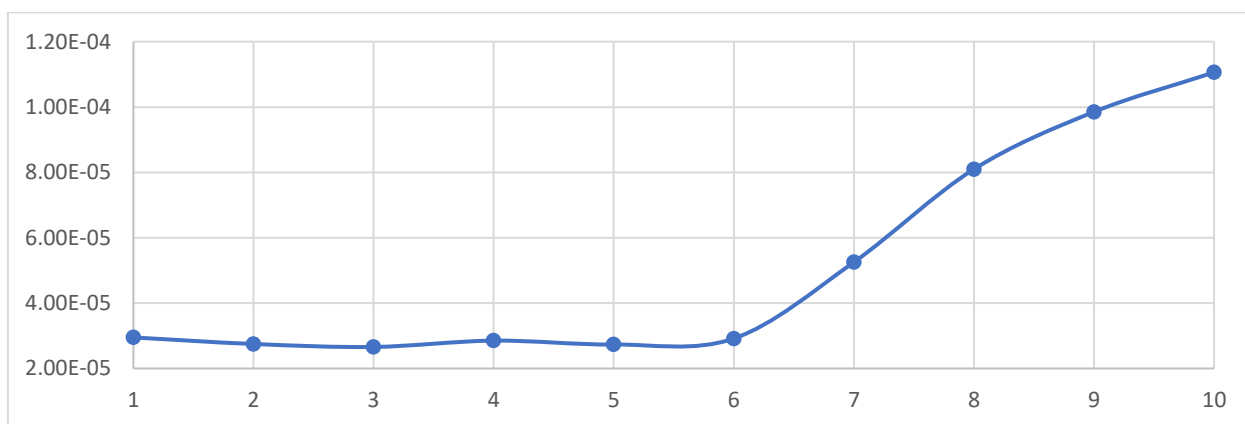
Спектр AS3



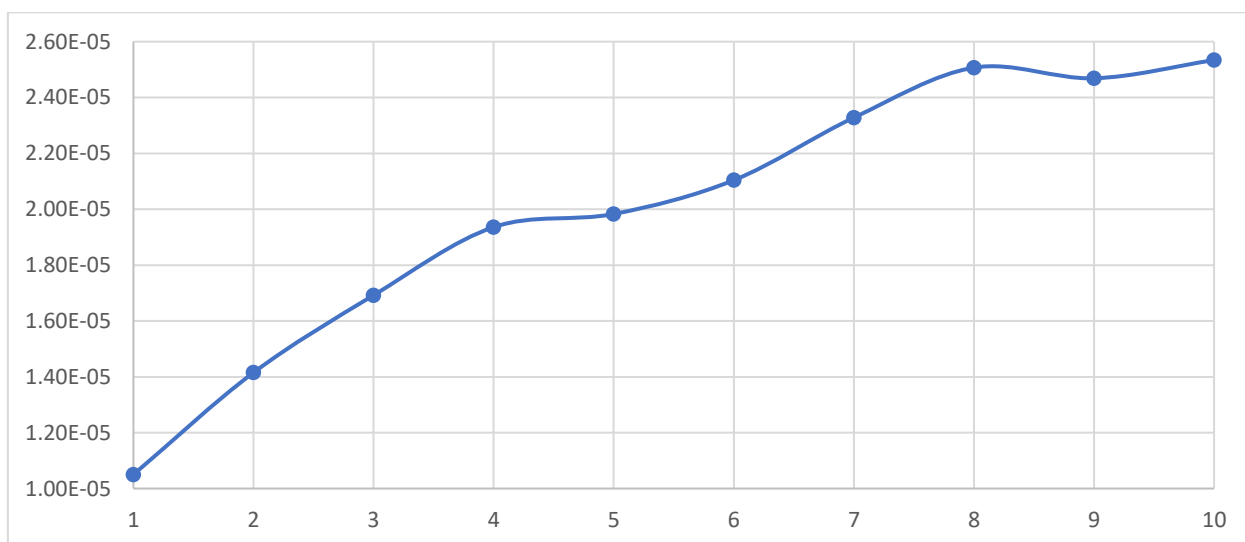
Спектр AS4



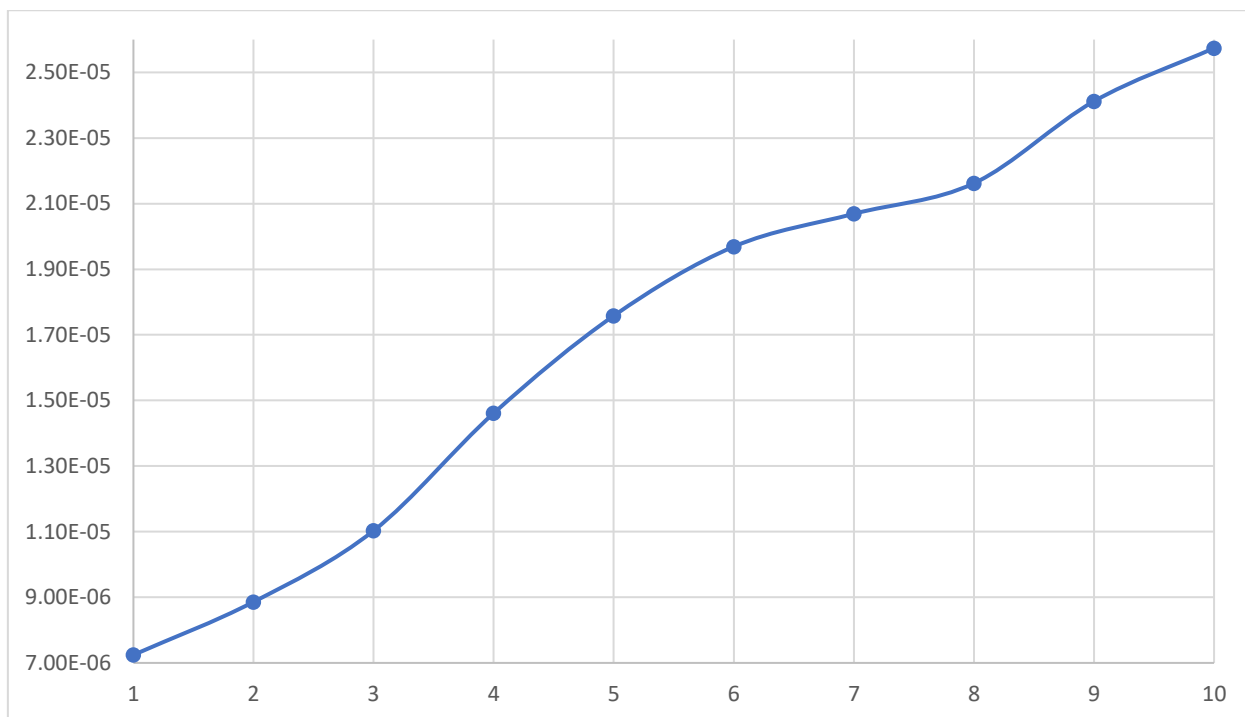
Спектр AS5



Спектр AS6



Спектр AS7



Спектр AS8

```

RRS
SOURCE 1
PROBABILITY 1
S NAME=S1 ANGLE=ANG0 PNT 302.0 325.0 135.375
END SOURCE
ANGLE ANG0
*Degrees
* 90 90 -180
Cosines
0.0 0.0 -1.0
ANGULAR
* title
* pos = 0 0 0.375 dir=d1 erg=fdir d2 vec = 0 0 -1
ASPECTRUM A
COSINE
-1.0000 -0.9596 -0.8788 0.8586 0.8990 0.9394 1.0000
PROBABILITY
0.0096 0.0097 0.0097 0.0105 0.0105 0.0105 0.0
END ASPECTRUM A
ASPECTRUM AS3
ENERGY
12.0000E06 12.0100E06 12.0200E06 12.0301E06 12.0401E06 12.0501E06 12.0601E06 12.0701E06 12.0802E06
12.0902E06
PROBABILITY
6.414e-06 7.346e-06 1.010e-05 1.319e-05 1.557e-05 1.704e-05 1.738e-05 1.802e-05 1.987e-05 2.133e-05
END ASPECTRUM AS3
ASPECTRUM AS4
ENERGY
16.9098E06 16.9198E06 16.9299E06 16.9399E06 16.9499E06 16.9599E06 16.9699E06 16.9800E06 16.9900E06
17.0000E06
PROBABILITY
1.643e-04 1.734e-04 1.857e-04 2.069e-04 2.174e-04 2.158e-04 2.077e-04 2.038e-04 2.098e-04 2.004e-04
END ASPECTRUM AS4
ASPECTRUM AS5
ENERGY
16.7094E06 16.7194E06 16.7295E06 16.7395E06 16.7495E06 16.7595E06 16.7695E06 16.7796E06 16.7896E06
16.7996E06
PROBABILITY
1.883e-05 1.939e-05 2.132e-05 2.301e-05 2.414e-05 2.451e-05 2.515e-05 2.672e-05 2.885e-05 2.767e-05
END ASPECTRUM AS5
ASPECTRUM AS6

```


ENERGY
 15.1062E06 15.1162E06 15.1263E06 15.1363E06 15.1463E06 15.1563E06 15.1663E06 15.1764E06 15.1864E06
 15.1964E06
 PROBABILITY
 2.949e-05 2.749e-05 2.659e-05 2.852e-05 2.733e-05 2.917e-05 5.252e-05 8.098e-05 9.852e-05 1.106e-04
 END ASPECTRUM AS6
 ASPECTRUM AS7
 ENERGY
 12.7014E06 12.7114E06 12.7214E06 12.7315E06 12.7415E06 12.7515E06 12.7615E06 12.7715E06 12.7816E06
 12.7916E06
 PROBABILITY
 1.050e-05 1.415e-05 1.692e-05 1.936e-05 1.983e-05 2.104e-05 2.328e-05 2.507e-05 2.469e-05 2.534e-05
 END ASPECTRUM AS7
 ASPECTRUM AS8
 ENERGY
 16.7094E06 16.7194E06 16.7295E06 16.7395E06 16.7495E06 16.7595E06 16.7695E06 16.7796E06 16.7896E06
 16.7996E06
 PROBABILITY
 7.244e-06 8.859e-06 1.103e-05 1.461e-05 1.758e-05 1.969e-05 2.069e-05 2.162e-05 2.412e-05 2.574e-05
 END ASPECTRUM AS8
 END ANGULAR
 END ANGLE
 FINISH RRS