

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ  
ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ИБРАЭ РАН

\_\_\_\_\_ О. В. Цацулина

« » \_\_\_\_\_ 2019

Руководство пользователя программного средства  
ЕВКЛИД/V1.2

Москва, 2019

# СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	6
1 Установка и запуск .....	7
1.1 Системные требования.....	7
1.2 Установка .....	7
1.3 Запуск расчёта.....	8
1.3.1 Запуск расчёта новой задачи .....	9
1.3.2 Запуск расчёта с помощью рестарт-файла.....	10
1.3.3 Запуск расчёта в параллельном режиме.....	11
1.3.4 Инструкция по подготовке нейтронно-физических констант .....	11
2 Структура кода ЕВКЛИД/V1 и алгоритм интеграции модулей .....	13
3 Краткое описание физических моделей .....	16
3.1 Теплогидравлический модуль .....	16
3.2 Нейтронно-физический модуль .....	17
3.2.1 Общее описание нейтронно-физического модуля .....	17
3.2.2 Блок-схема нейтронно-физического модуля .....	18
3.2.3 Система подготовки констант для нейтронно-физического расчёта .....	19
3.3 Твэльный модуль .....	20
3.3.1 Модель теплопроводности в твэле .....	22
3.3.2 Модель распухания топлива.....	23
3.3.3 Модель выхода ГПД под оболочку .....	23
3.3.4 Модель термомеханического состояния твэла.....	24
4 Общие сведения о входных и выходных файлах .....	25
4.1 Входные файлы.....	25
4.1.1 Базы данных .....	25
4.1.2 XML файлы .....	26
4.2 Выходные файлы.....	28

5	Формат входных файлов.....	29
5.1	Общее описание входного файла интегрального кода ЕВКЛИД/V1 .....	29
5.2	Тег <Main> ... </Main> .....	30
5.2.1	Тег <Description> ... </Description>.....	31
5.2.2	Тег <ModuleList> ... </ModuleList>.....	31
5.2.3	Тег <TimeTable> ... </TimeTable> .....	33
5.2.4	Тег <PlotList> ... </PlotList>.....	35
5.2.5	Пример тега <Main> ... </Main>.....	35
5.3	Тег <Core> ... </Core>.....	36
5.4	Тег <BERKUT>...</BERKUT> .....	59
5.4.1	Тег MainBERKUT .....	60
5.4.2	Тег FuelRod.....	66
5.4.3	Тег AbsorbingRod.....	71
5.4.4	Тег FuncBERKUT .....	71
5.5	Тег <Neutronics>...</Neutronics> .....	80
5.5.1	Тег <Geometry>.....	80
5.5.2	Тег <CommonInformation>.....	93
5.5.3	Тег <Autonomous_work>.....	97
5.5.4	Тег <SN_method>.....	98
5.5.5	Тег <Interpolation> .....	101
5.5.6	Тег <PrepareConst> .....	102
5.6	Тег <Hydraulics>...</Hydraulics> .....	103
5.7	ControlFunc – контрольные функции.....	104
5.7.1	Свойства элемента.....	104
5.7.2	Использование контрольных функций для вывода в файл .....	107
5.7.3	Вывод элементов 1D массива в файл .....	107
5.7.4	Вывод элементов 2D массива в файл .....	108

5.7.5	Список элементарных функций .....	108
5.7.6	Список элементарных операций .....	112
5.7.7	Свойства неконденсируемых газов.....	113
5.7.8	Использование констант .....	114
6	Список плот-переменных .....	116
6.1	Теплогидравлический модуль .....	116
6.2	Нейтронно-физический модуль .....	116
6.3	Твэльный модуль .....	117
7	Примеры расчётов .....	122
7.1	Моделирование эксперимента NIMRHE-2 по облучению твэлов со смешанным нитридным топливом в натриевом реакторе ФЕНИКС .....	122
7.1.1	Постановка задачи .....	122
7.1.2	Построение расчётной схемы .....	123
7.1.3	Файл входных данных .....	126
7.1.4	Выходные файлы и результаты расчёта .....	151
7.2	Интегральный расчет реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем BR-NPP-simulator .....	154
7.2.1	Постановка задачи .....	154
7.2.2	Файл входных данных .....	154
7.2.3	Выходные файлы и результаты расчета .....	177
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	180
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	182

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

а.з.	– активная зона.
АЗ	– аварийная защита.
АР	– стержни рабочих органов автоматического регулирования.
БГ	– благородные газы.
БР	– реактор на быстрых нейтронах.
ГПД	– газообразные продукты деления.
МВТО	– механическое взаимодействие топлива и оболочки.
МОХ	– смешанное уран-плутониевое оксидное топливо (Mixed-Oxide Fuel).
НДС	– напряжённо-деформированное состояние.
НЭ	– нормальная эксплуатация.
РУ	– реакторная установка.
РК	– расчётный код.
РЯ	– расчётная ячейка.
СИ	– Международная система единиц.
сна	– смещение на атом.
СУЗ	– система управления и защиты реактора.
ТВС	– тепловыделяющая сборка.
твэл	– тепловыделяющий элемент.
ТГС	– теплогидравлическая сеть.
ТС	– теплопроводящая структура.
ЧС-68 х.д.	– сталь 06Х16Н15М2Г2ТФР холоднодеформированная.
ЭК164-ИД х.д.	– сталь 07Х16Н19М2Г2БТФР холоднодеформированная
ЭП-823	– сталь 16Х12МВСФБР.
ЭП-450	– сталь 12Х12М1БФР.
ЯЭУ	– ядерная энергетическая установка.

## ВВЕДЕНИЕ

Первая версия динамического интегрального универсального расчётного кода нового поколения ЕВКЛИД/V1 разработана в ИБРАЭ РАН для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, проектируемых в рамках проектного направления «ПРОРЫВ», и позволяет моделировать поведение РУ БР в условиях НЭ (в стационарных и переходных режимах работы), ННЭ и при проектных авариях путём выполнения связанных нейтронно-физических, термомеханических и теплогидравлических расчётов.

Интегральный код ЕВКЛИД/V1 [1] разработан на базе системного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 [2, 3], нейтронно-физического кода DN3D и инженерной версии твэльного кода БЕРКУТ [4]. Код имеет модульную структуру, что позволяет наращивать количество модулей, описывающих соответствующие явления. При разработке кода использовались методология объектно-ориентированного программирования и динамическая аллокация памяти. Модули интегрального кода написаны на языках C++ и FORTRAN-2003.

Для создания интегрального кода ЕВКЛИД/V1 выбрана системная оболочка SMART\_LM [5]. Системная оболочка SMART\_LM предоставляет следующие возможности пользователю:

- задание исходных данных расчёта для различных программных модулей через графический интерфейс пользователя;
- запуск задач на счёт;
- отображение результатов расчётов;
- получение значений свойств материалов с использованием базы данных по свойствам материалов;
- проведение многовариантных расчётов и выполнение анализа неопределённостей.

Входной файл интегрального кода написан на основе стандарта языка XML, обладающего рядом преимуществ по сравнению с текстовым файлом, главным из которых является его соответствие объектно-ориентированному иерархическому построению данных и методов их обработки.

Руководство пользователя предназначено для работы с версией 1.2 интегрального кода ЕВКЛИД (далее ЕВКЛИД/V1) и включает описание установки и запуска

интегрального кода, структуру интегрального кода и алгоритм интеграции модулей, краткое описание используемых моделей, описания входных и выходных файлов. Детальное описание моделей интегрального кода приведено в Руководстве по моделям интегрального кода ЕВКЛИД/V1.

## 1 Установка и запуск

### 1.1 Системные требования

Расчётный код ЕВКЛИД/V1 написан на языках программирования C++ и FORTRAN с использованием динамического распределения памяти и подходов объектно-ориентированного программирования. Обеспечена совместимость с различными компиляторами C++ и FORTRAN, в том числе Microsoft VS C++, Intel C++, GNU C++, Intel Composer XE, Gfortran. Реализовано распараллеливание теплогидравлического модуля кода на основе стандартов параллельного программирования OpenMP для многопроцессорных систем с общей памятью и MPI для многопроцессорных систем с распределённой памятью.

Версия расчётного кода, входящая в данный комплект поставки, функционирует:

- под управлением операционных систем семейства Microsoft Windows, включая Windows XP 64, Windows Vista 64; Windows 7 64, Windows 8 64;
- на однопроцессорных компьютерах с одноядерными или многоядерными процессорами;
- на многопроцессорных компьютерах.

Технические средства должны удовлетворять следующим системным требованиям:

- центральный процессор, совместимый с архитектурой x64, с тактовой частотой 1 ГГц и выше (рекомендуемые процессоры: Intel Core 2, Core I3, I5, I7; Intel Xeon E3, E5, E7; CPU и APU AMD архитектуры K10 и выше);
- объём оперативной памяти не менее 4 Гб;
- доступный объём дискового пространства не менее 1 Гб.

Время расчёта определяется постановкой задачи, количеством нодализационных элементов и расчётных ячеек, используемых для каждого нодализационного элемента.

### 1.2 Установка

Интегральный код ЕВКЛИД/V1 имеет модульную структуру. Под программными модулями подразумеваются пакеты программ, объединённые по функциональному содержанию. В текущей версии интегрального кода объединены следующие три основных модуля: теплогидравлический (HYDRA-IBRAE/LM/V1.1), нейтронно-физический (DN3D) и твэльный (БЕРКУТ-V1). Интегрирующая оболочка (SMART\_LM) обеспечивает согласованный расчёт модулей. Таким образом, интегральный код включает в себя следующие обязательные элементы:

- smart-task.exe – основная запускаемая программа, интегрирующая модули и запускающая расчёт;
- smart-client.exe – клиентская оболочка, обеспечивающая графическое отображение данных;
- CFunc.dll – библиотека модуля контрольных функций (моделирует системы контроля и управления);
- Hydra.dll – библиотека функций теплогидравлического модуля;
- DN3D.dll – библиотека функций нейтронно-физического модуля;
- BERKUT.dll – библиотека функций твэльного модуля.

Для работы с интегральным кодом ЕВКЛИД/V1 необходимо создать отдельную директорию (например, EUCLID) и в ней – поддиректории bin-win64 и etc. В папку bin-win64 необходимо скопировать файлы библиотек функций всех трёх модулей (Hydra.dll, DN3D.dll, BERKUT.dll), библиотеку модуля контрольных функций CFunc.dll, библиотеку для работы с базой данных свойств материалов UniLib\_x64\_Release.dll и исполняемый файл smart-task.exe. В папке etc необходимо создать подпапки DN3D и Hydra. В папку DN3D копируются файлы баз данных с нейтронно-физическими константами: папка const\_reseau – в этой папке хранятся коэффициенты аппроксимирующих полиномов для расчёта констант по программе RESEAU, папка const\_interp – здесь хранятся файлы констант, рассчитанных по программе CONSYST. В папку Hydra копируются бинарные файлы со свойствами теплоносителей, файл базы данных свойств материалов SmartDB.xml и xml-файл со списком плот-переменных теплогидравлического модуля. Также в папку etc необходимо положить файл базы данных свойств материалов SmartDB.xml.

### 1.3 Запуск расчёта

Работа с управляющей программой smart-task.exe осуществляется с помощью консоли (интерпретатора командной строки – cmd.exe) или пакетных файлов с



расширением .bat, содержащих последовательности команд, предназначенных для исполнения cmd.exe.

Консоль вызывается командой «cmd» в диалоговом окне «Выполнить», либо нажатием кнопки «Пуск», далее «Все программы» => «Стандартные» => «Командная строка», либо в окне проводника щелчком правой клавишей мыши при нажатой клавише «Shift» и далее «Открыть окно команд». Перечень основных команд, обрабатываемых интерпретатором, в том числе, смена текущей директории, выход, пауза и т.д., можно посмотреть, набрав в командной строке «help» и нажав «Enter».

Пакетные файлы, содержащие команду вызова управляющей программы smart-task.exe и другие, нужные пользователю команды, создаются в любом текстовом редакторе, например, в Блокноте или NotePad++ и сохраняются с расширением .bat. Выполнение данного файла производится либо из консоли набором команды «<Имя файла>.bat» и далее нажатием «Enter», либо двойным щелчком левой клавиши мыши.

### 1.3.1 Запуск расчёта новой задачи

Для запуска новой задачи на счёт необходимо создать рабочую директорию, например, Test. Скопировать в неё входной файл интегрального кода и запустить управляющую программу smart-task.exe: находясь в директории Test, набрать в окне консоли команду «<Относительный путь>\smart-task.exe -n <Имя файла>.xml», позволяющую начать новый расчёт, либо создать пакетный файл start.bat, содержащий строку «<Относительный путь>\smart-task.exe -n <Имя файла>.xml», положить его в директорию Test и выполнить из консоли, либо двойным щелчком мыши.

При запуске задачи на счёт создаётся файл с расширением .flag, который является защитой от затирания: если он существует, то новый расчёт не запустится, пока указанный файл не будет удалён. Реализована возможность отключения защиты от затирания результатов расчётов. Для этого пользователю необходимо в команду запуска добавить параметр «-p», в этом случае команда запуска принимает следующий вид: «<Относительный путь>\smart-task.exe -n -p <Имя файла>.xml».

Допускается использование как относительных, так и полных (абсолютных) путей к файлам. Если имена папок и файлов содержат пробелы или русские буквы, то всю строку пути необходимо заключать в кавычки.

Все выходные файлы с результатами расчётов будут располагаться в каталоге, содержащем входной файл интегрального кода. Для отображения результатов расчёта

необходимо использовать программу smart-client.exe, которая находится в папке PrePostProcessor.

### 1.3.2 Запуск расчёта с помощью рестарт-файла

Для продолжения расчёта с рестарт-файла необходимо: в рабочую директорию скопировать входной файл и ранее насчитанный рестарт-файл (файлы должны относиться к одной и той же задаче), в окне консоли набрать команду «<Относительный путь>\smart-task.exe -s N <Имя файла>.xml», где N – номер шага по времени, с которого необходимо продолжить расчёт, либо – «<Относительный путь>\smart-task.exe -t T <Имя файла>.xml», где T – значение момента времени, с которого необходимо продолжить расчёт. Отключение защиты от затирания производится добавлением в команду запуска параметра «-p».

При запуске расчёта с рестарт-файла пользователю дана возможность менять значения и выражения для контрольных функций (подраздел 5.8) и функций твэльного модуля (пункт 5.5.4). Остальные параметры, такие как нодализационная схема, число каналов, типы каналов, ТВС и твэлов, типы топлива и теплоносителя и т.д. должны оставаться неизменными.

Рассмотрим пример запуска продолжения расчёта с изменённым расходом теплоносителя через а.з. РУ. Предположим, что изначально расчёт режима работы РУ проводился с расходом теплоносителя, задаваемым контрольной функцией представленной на рисунке 1.1.

```
<Constant Name="MFluxSum" Value="39600" />
<ControlFunc Name="PumpMassFlow" Func="0." Formula="interpol([0,2,
1000],[0.0,MFluxSum,MFluxSum],t)">
  <Arg ShortName="t" LongName="Time" Module="Hydra" />
</ControlFunc>
```

Рисунок 1.1 – Пример исходной контрольной функции

Было насчитано 100 расчётных секунд и возникла необходимость с момента времени 35 с изменить расход теплоносителя через реактор и пересчитать задачу, например, по причине изменения сценария. В этом случае пользователю необходимо продолжить расчёт с рестарт-файла с момента времени 35 с, при этом поменяв соответствующим образом вид контрольной функции во входном файле. Пример новой контрольной функции, в которой расход теплоносителя с 35 по 40 расчётные секунды

снижается до половины номинального значения и остаётся на этом уровне, представлен на рисунке 1.2.

```
<Constant Name="MFluxSum" Value="39600" />
<ControlFunc Name="PumpMassFlow" Func="0."
Formula="interpol([0,2,35,40,1000],[0.0,MFluxSum,MFluxSum,0.5*MFluxSum,0.5*MF
luxSum],t)">
  <Arg ShortName="t" LongName="Time" Module="Hydra" />
</ControlFunc>
```

Рисунок 1.2 – Пример обновлённой контрольной функции

### 1.3.3 Запуск расчёта в параллельном режиме

В интегральном коде ЕВКЛИД/V1 за параллельные вычисления отвечает каждый модуль в отдельности. В текущей версии интегрального кода имеется возможность запуска на однопроцессорных многоядерных или многопроцессорных системах с общей памятью теплогидравлического, нейтронно-физического и твэльного модулей. Для запуска расчёта задачи с теплогидравлическим, нейтронно-физическим и твэльным модулями в параллельном режиме на однопроцессорной многоядерной или многопроцессорной системе с общей памятью необходимо в теги Hydraulics, Neutronics и BERKUT добавить подтеги Parallel с единственным атрибутом OMP\_NTR, который имеет целочисленное значение и равен числу параллельных процессов (нитей). В случае однопроцессорных многоядерных систем значение OMP\_NTR меньше, либо равно числу ядер процессора. Пример записи тега Parallel для системы с шестиядерным процессором представлен на рисунке 1.3.

```
<Hydraulics>
  <Parallel OMP_NTR="6" />
...
...
...
</Hydraulics>
```

Рисунок 1.3 – Пример тега <Parallel>

### 1.3.4 Инструкция по подготовке нейтронно-физических констант

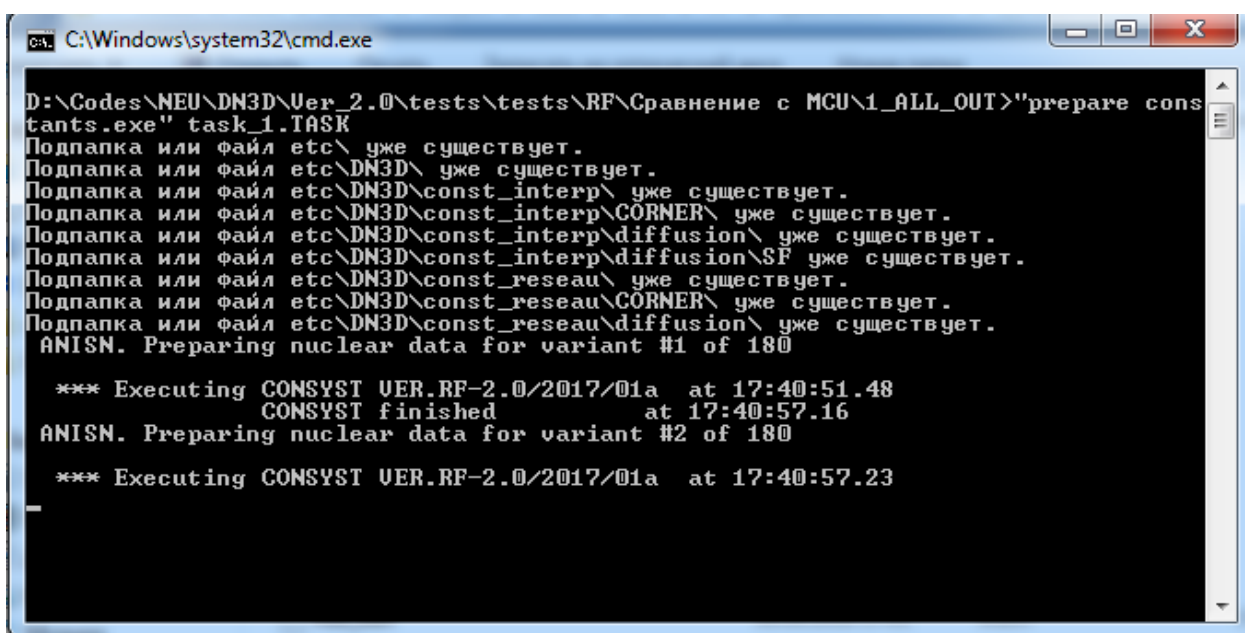
Перед запуском процесса подготовки констант для нейтронно-физического расчёта необходимо поместить в директорию с исполняемым файлом PrepareConst.exe входной файл кода ЕВКЛИД/V1 с данными для расчета конкретного расчетного варианта, а также исполняемый файл программы RESEAU (Approx.exe). Исполняемый файл CONSYST и

соответствующие библиотеки CONSYST помещаются по пути, заданному в теге PrepareConst входного файла. Для запуска программы prepare constants можно использовать подготовленный bat-файл с соответствующей командой или ввести данную команду в консоли:

*PrepareConst.exe Test.task,*

где “Test.task” – имя входного файла.

Пример консольной выдачи при запуске программы PrepareConst представлен на рисунке 1.4.



```
C:\Windows\system32\cmd.exe
D:\Codes\NEU\DN3D\Uer_2.0\tests\tests\RF\Сравнение с MCU\1_ALL_OUT>"prepare constants.exe" task_1.TASK
Подпапка или файл etc\ уже существует.
Подпапка или файл etc\DN3D\ уже существует.
Подпапка или файл etc\DN3D\const_interp\ уже существует.
Подпапка или файл etc\DN3D\const_interp\CORNER\ уже существует.
Подпапка или файл etc\DN3D\const_interp\diffusion\ уже существует.
Подпапка или файл etc\DN3D\const_interp\diffusion\SF уже существует.
Подпапка или файл etc\DN3D\const_reseau\ уже существует.
Подпапка или файл etc\DN3D\const_reseau\CORNER\ уже существует.
Подпапка или файл etc\DN3D\const_reseau\diffusion\ уже существует.
ANISN. Preparing nuclear data for variant #1 of 180

*** Executing CONSYST UER.RF-2.0/2017/01a at 17:40:51.48
CONSYST finished at 17:40:57.16
ANISN. Preparing nuclear data for variant #2 of 180

*** Executing CONSYST UER.RF-2.0/2017/01a at 17:40:57.23
```

Рисунок 1.4 – Пример консольной выдачи при запуске программы PrepareConst

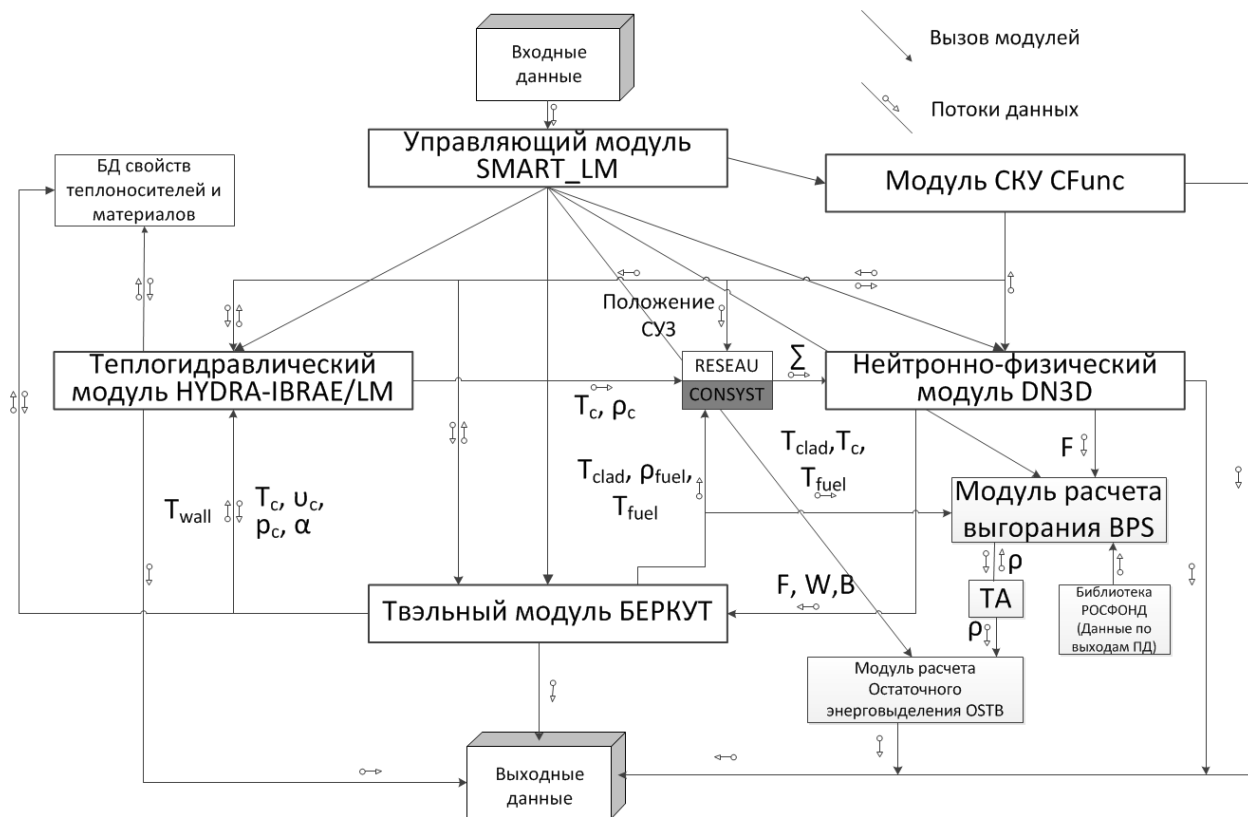
В первую очередь программа создает структуру папок для размещения констант либо выдает диагностическое сообщение о том, что необходимые папки уже существуют.

Далее запускается программа CONSYST для подготовки нейтронно-физических констант с конкретным набором параметров сетки теплогидравлических параметров. Сначала подготавливаются константы в формате ANISN для расчета с применением кинетической опции, затем подготавливаются константы в формате АРАМАКО для расчета с применением диффузионной опции. При этом пользователю выдается сообщение с номером текущего варианта, для которого готовятся константы, и общим количеством расчетных вариантов.

Подготовленные библиотеки располагаются в директории \etc\DN3D. При этом директория DN3D имеет две поддиректории – const\_interp (содержит данные для линейной интерполяции констант) и const\_reseau (содержит данные для подготовки констант по программе RESEAU). Каждая из папок содержит две подпапки – CORNER (с данными для расчета по кинетической опции) и diffusion (с данными для расчета по диффузионной опции).

## 2 Структура кода ЕВКЛИД/V1 и алгоритм интеграции модулей

В интегральном коде ЕВКЛИД/V1 совместно работают три основных расчётных модуля: теплогидравлический (HYDRA-IBRAE/LM/V1.1), нейтронно-физический (DN3D) и твэльный (БЕРКУТ-V1). Управляющая программа интегрирующей оболочки SMART\_LM (smart-task.exe) организует расчёт конкретной задачи, загружая необходимые для расчёта программные модули, реализует главный временной цикл, а также осуществляет обмен данными и интегрированный ввод-вывод. Структура интегрального кода представлена на рисунке 2.1.



$T_{wall}$  – температура поверхности оболочки твэла;  $T_c$  – температура теплоносителя;  $T_{clad}$  – средняя по объёму температура оболочки твэла;  $T_{fuel}$  – температура топлива;  $\rho_{fuel}$  – плотность топлива;  $\rho_c$  – плотность теплоносителя;  $u_c$  – скорость теплоносителя;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $p_c$  – давление теплоносителя;  $F$  – поток нейтронов;  $W$  – линейная мощность энерговыделения;  $B$  – выгорание;  $\rho$  – ядерные концентрации нуклидов топлива и продуктов деления;  $\Sigma$  – нейтронные сечения

Рисунок 2.1 – Структура интегрального кода ЕВКЛИД/V1

Для работы с интегрирующей оболочкой SMART\_LM в каждом из модулей выделены следующие функции:

- smart\_init – регистрирует обработчиков служебных и обменных запросов;
- PreStart – отвечает за ту часть межмодульного обмена, которая не зависит от входного файла;
- Start – отвечает за чтение входного файла;
- Link – инициализирует межмодульный обмен (передаёт указатели на обменные структуры);
- PreRun – инициализирует расчёт и задаёт список выходных переменных;
- Load – отвечает за чтение файла продолжения расчёта (рестарт-файла);
- Save – записывает данные в файл продолжения расчёта;
- PlotData – отвечает за подготовку данных для записи в файл интегрированного вывода (для последующего графического отображения данных встроенным в оболочку SMART\_LM пост-процессором);
- OutPut – отвечает за запись данных в текстовые выходные файлы;
- Stop – завершение расчёта (освобождение памяти и т.д.);

Временной цикл:

- PreStep – выполняет действия перед расчётом нового временного шага программным модулем (например, считывание данных для расчёта из обменной структуры);
- Step – проводит расчёт состояния системы в следующий момент времени;
- Fallback – осуществляет возврат значений всех переменных на начало временного шага в случае, если необходимая точность решения задачи не достигается и необходимо произвести пересчёт данного шага по времени с меньшим шагом;

– PostStep – выполняет действия после расчёта одного временного шага программным модулем (например, запись рассчитанных данных в обменную структуру).

При запуске программные модули декларируют и регистрируют описанные функции, а интегрирующая оболочка поочередно их вызывает в каждом из модулей. Временной шаг регулируется управляющей программой, исходя из данных во входном файле интегрального кода и запросов модулей. Схема вызовов функций оболочкой SMART\_LM представлена на рисунке 2.2.

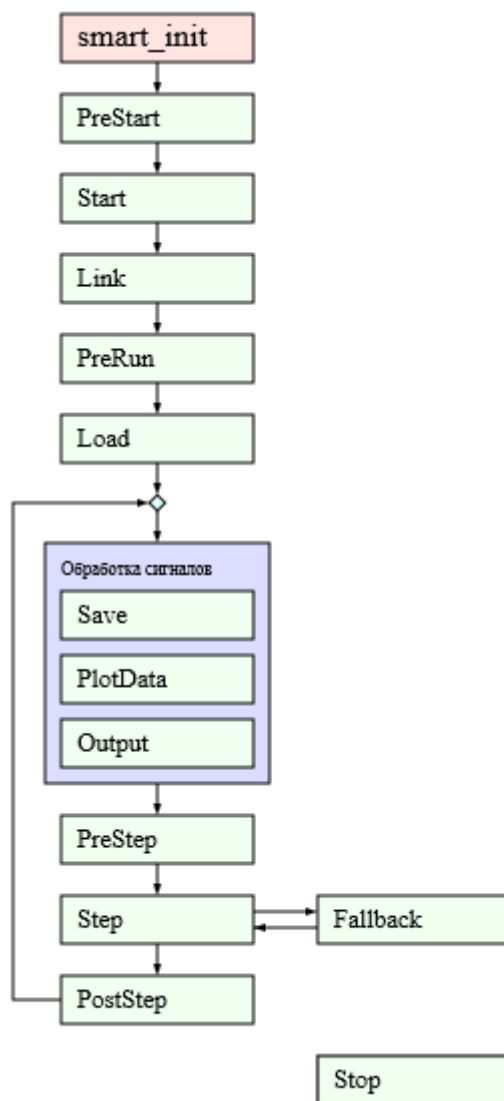


Рисунок 2.2 – Схема вызова функций программных модулей оболочкой SMART\_LM

Для решения связанной задачи расчётные модули на каждом шаге обмениваются необходимыми данными. Обмен данными между программными модулями производится через общую память, что обеспечивает минимальные накладные расходы. При запуске

расчёта каждый модуль получает указатель на обменную структуру. Данные берутся с предыдущего шага по времени. Схема обмена данными и переменные, которыми обмениваются программные модули, показаны на рисунке 2.1.

В частности, теплогидравлическому модулю HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 в качестве входных данных необходимо значение температуры поверхности оболочки твэла/пэла в градусах Кельвина (получает от модуля БЕРКУТ-V1).

Нейтронно-физическому модулю DN3D необходимы следующие входные данные:

- средняя температура топлива в градусах Кельвина (от модуля БЕРКУТ-V1);
- средняя температура оболочки твэла/пэла в градусах Кельвина (от модуля БЕРКУТ-V1);
- аксиальное удлинение топливного столба в м (от модуля БЕРКУТ-V1);
- относительное изменение плотности тяжёлых ядер в расчётных ячейках (от модуля БЕРКУТ-V1);
- плотность теплоносителя ( $\text{кг/м}^3$ ) (от модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1);
- температура теплоносителя в градусах Кельвина (от модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1);
- уровень теплоносителя в каналах СПОС (от модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1).

Топливному модулю БЕРКУТ необходимы следующие входные данные:

- температура (К), скорость (м/с), давление (Па) теплоносителя и коэффициент теплоотдачи ( $\text{Вт/К/м}^2$ ) (от модуля HYDRA-IBRAE/LM/V1.1);
- линейное тепловыделение в твэле/пэле (Вт/м) (от модуля DN3D);
- выгорание топлива (% т. ат.) и повреждающая доза (сна) (от модуля DN3D).

### 3 Краткое описание физических моделей

#### 3.1 Теплогидравлический модуль

В качестве теплогидравлического модуля интегрального кода ЕВКЛИД/V1 используется ПК HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 [2]. ПК HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 моделирует теплогидравлические процессы на основе одномерного приближения. Вся расчётная область разбивается на «каналы», для которых записываются балансовые законы сохранения массы, энергии и количества движения. Результатом расчёта являются значения давлений и температур теплоносителя в каналах и скоростей на гранях, соединяющих каналы. Основная система уравнений двухжидкостной неравновесной



теплогидравлики состоит из уравнений сохранения масс, уравнений моментов и уравнений сохранения энергии. Описание моделей теплогидравлического модуля представлено в верификационном отчёте [2] и руководствах пользователя и по моделям ПК HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 [3].

## 3.2 Нейтронно-физический модуль

### 3.2.1 Общее описание нейтронно-физического модуля

Нейтронно-физический модуль DN3D предназначен для моделирования в а.з. реактора на быстрых нейтронах нестационарных трёхмерных распределений плотности потока нейтронов, трёхмерных распределений мощности энерговыделения и расчёта функционалов, соответствующих интегральным нейтронно-физическим параметрам, важным для безопасности, и параметрам, по которым установлены проектные пределы безопасной эксплуатации.

В нейтронно-физическом модуле реализованы нейтронно-физические модели, позволяющие моделировать стационарные состояния на разрешённых уровнях мощности, штатные переходные процессы, включая вывод остановленного реактора в критическое состояние, подъём мощности до минимально контролируемого уровня (МКУ), подъём мощности до энергетического уровня, управляемое изменение мощности реактора, плановый и аварийный останов реактора, аварийные режимы, связанные с единичным отказом систем нормальной эксплуатации при дополнительно единичном отказе систем безопасности.

Для моделирования перечисленных выше состояний и режимов в нейтронно-физическом модуле реализованы алгоритмы решения нестационарного уравнения переноса нейтронов в улучшенном квазистатическом приближении [6], стационарного уравнения переноса с источником, условно-критической задачи и соответствующей сопряженной задачи в трёхмерной геометрии на регулярной гексагональной решетке в многогрупповом диффузионном приближении с учётом запаздывающих нейтронов, пассивных физических обратных связей по теплогидравлическим и термомеханическим параметрам и активных обратных связей, обусловленных функционированием штатной системы управления и систем безопасности. Поскольку нейтронно-физические параметры и характеристики, важные для безопасности ядерного реактора, являются функционалами интегрального по угловой переменной распределения плотности потока нейтронов, то в

нейтронно-физическом модуле рассматривается уравнение непосредственно для интегрального по угловой переменной распределения плотности потока нейтронов.

Нейтронно-физический модуль ориентирован на использование заранее подготовленной с использованием программы CONSYST [7, 8] 26-групповой библиотеки нейтронно-физических констант на сетке теплогидравлических и термомеханических параметров, по которым реализуются физические обратные связи. Для пересчёта констант в процессе реакторного расчёта в нейтронно-физическом коде предусмотрено два варианта: процедура восстановления нейтронно-физических констант из их аналитических зависимостей с помощью программного модуля RESEAU [9] или линейная интерполяция.

### 3.2.2 Блок-схема нейтронно-физического модуля

Блок-схема нейтронно-физического модуля приведена на рисунке 3.1. На этапе установления, то есть до начала реального физического процесса, в нейтронно-физическом модуле решается задача с источником (на рисунке 3.1 – условие "if t = 0", ветка "true"), когда процесс установления закончился, время для нейтронно-физического модуля перестало быть равным нулю, и на первом шаге по времени (на рисунке 3.1 – условие "if t = dt", ветка "true") решаются условно-критическая и сопряжённая задачи, затем на каждом шаге решается только нестационарная задача.

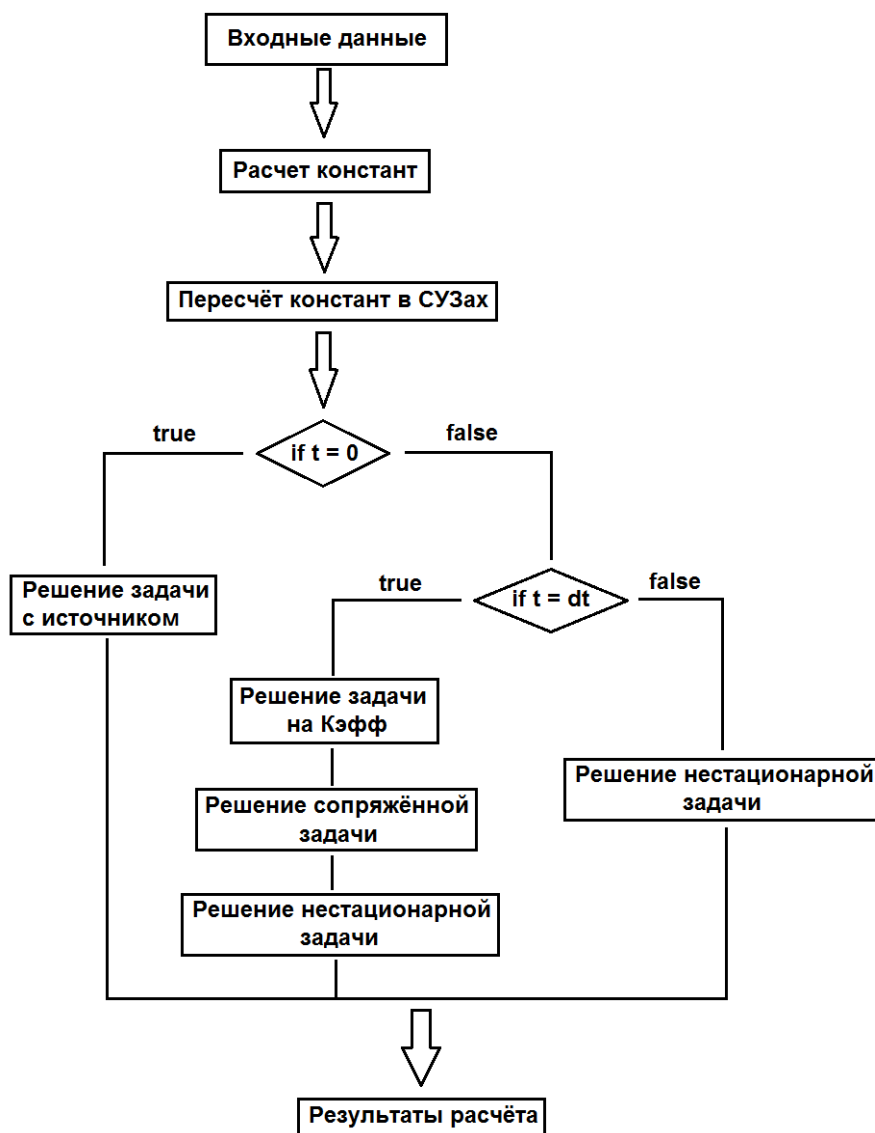


Рисунок 3.1 – Блок схема программного модуля DN3D

### 3.2.3 Система подготовки констант для нейтронно-физического расчёта

Библиотеки нейтронно-физических констант, используемые в расчёте по коду ЕВКЛИД/V1, формируются для конкретной расчётной модели с учётом её геометрических параметров и материальных составов. При подготовке констант для нейтронно-физического расчёта используется программа CONSYST. Поскольку код ЕВКЛИД/V1 использует интерполяцию сечений на заданной сетке теплогидравлических параметров, была реализована вспомогательная программа PrepareConst, которая в автоматическом режиме готовит библиотеки нейтронно-физических сечений для расчета по диффузионной и кинетической опции на сетке и представляет данные в виде стандартном для кода ЕВКЛИД/V1.

В качестве файла входных данных для программы PrepareConst используется входной файл для расчета по коду Евклид/V1. Программа считывает из файла все необходимые данные, такие как нуклидные составы материалов, параметры сетки для подготовки констант и др.

### 3.3 Твэльный модуль

В качестве твэльного модуля интегрального кода Евклид/V1 используется инженерная версия кода БЕРКУТ, предназначенного для моделирования процессов, протекающих в одиночном твэле РУ БР с нитридным, диоксидным или МОКС топливом и оболочкой из сталей ЧС-68 х.д., ЭК164-ИД х.д., ЭП-823 или ЭП-450. Инженерная версия кода БЕРКУТ позволяет моделировать следующие процессы:

- теплообмен твэла с теплоносителем;
- распределение температуры в топливных таблетках, газовом зазоре и оболочке твэла;
- напряжённо-деформированное состояние твэла в условиях открытого и закрытого зазора;
- выход ГПД под оболочку;
- изменение свойств топлива в зависимости от температуры, относительной плотности и выгорания;
- изменение свойств материала оболочки в зависимости от температуры и накопленных радиационных повреждений.

Используется следующая расчётная схема:

- объектом расчёта является одиночный твэл;
- предполагается цилиндрическая симметрия рассматриваемых структур и приложенных нагрузок, температур и т.д.;
- для описания геометрии твэла, начальной и изменённой, используется разбиение твэла на ячейки в осевом направлении (смотреть рисунок 3.2);
- каждая ячейка в общем случае состоит из центрального отверстия, топливной таблетки, газового зазора и оболочки, которые разбиваются на цилиндрические слои (смотреть рисунок 3.3), размеры и нагрузки (в обобщенном смысле) каждого слоя не меняются по высоте и толщине;
- поведение твэла моделируется на длине активной части с введением верхнего и нижнего торцевых экранов, верхнего и нижнего компенсационных объёмов;

– соседние осевые ячейки деформируются независимо друг от друга, взаимное влияние осевых ячеек осуществляется через общее газовое давление под оболочкой;

– ГПД, вышедшие под оболочку из топливных таблеток, однородно перемешиваются и подчиняются закону идеального газа.

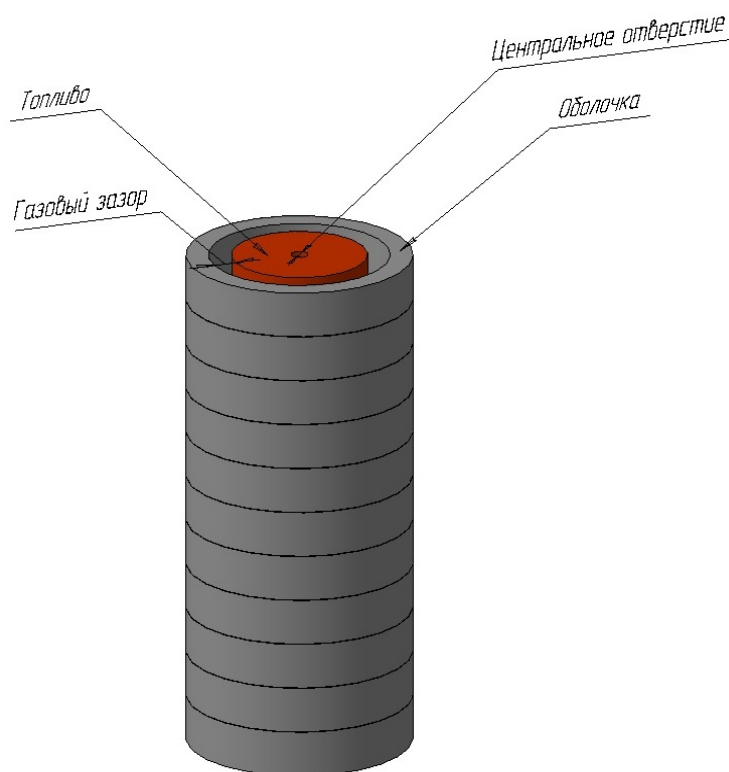


Рисунок 3.2 – Схема разбиения твэла на осевые ячейки

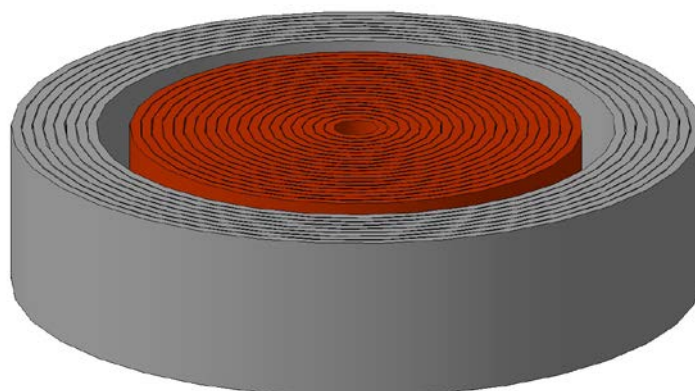


Рисунок 3.3 – Схема осевой ячейки твэла

### 3.3.1 Модель теплопроводности в твэле

Распределение температуры в твэле моделируется в приближении осевой симметрии граничных условий и температурного поля. Модель описывает теплопроводность в многослойной структуре с учётом различий в теплофизических свойствах слоёв, число слоёв в общем случае не ограничено, а их последовательность может быть произвольной. Тепловые свойства материалов слоёв зависят от температуры, выгорания и других параметров и изменяются скачком на границах слоёв.

Поля плотности энерговыделения в топливе задаются либо в виде табличной функции от времени и высоты твэла во входном файле, либо передаются из нейтронно-физического модуля. Граничные условия на оси твэла задаются из условия симметрии (граничное условие 2-го рода), на внешней границе оболочки задается граничное условие 3-го рода через температуру теплоносителя и коэффициент теплоотдачи.

Радиационный тепловой поток через зазор между таблеткой и оболочкой учитывается в виде дополнительных источников и стоков тепла во внутреннем слое оболочки и наружном слое топливной таблетки, соответственно, и вычисляется согласно закону Стефана-Больцмана.

В каждой осевой ячейке решается одномерное уравнение теплопроводности. Для численного решения одномерного уравнения теплопроводности в осевой ячейке вводится одномерная пространственная сетка, в общем случае неравномерная. Сетка строится таким образом, чтобы узлы располагались на внутренней и наружной границах твэла и на границах между материалами, составляющими твэл. В отдельном материале сетка по радиальной координате равномерная и может состоять из нескольких ячеек, число которых задается во входном файле. Пространственные разбиения осевой ячейки деформационного модуля и модуля выхода ГПД согласованы с сеткой, используемой при решении тепловой задачи.

Одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности преобразуется в систему разностных уравнений по времени и дифференциальных по пространству, путём введения вспомогательных функций тепловых смещений [10, 11]. По заданным значениям температуры  $T(r, t_n)$  и плотности энерговыделения  $Q(r, t_n)$  вычисляются значения тепловых смещений  $H^r(r)$  в момент времени  $t_n$ , предполагая, что  $H^r(0) = 0$ . Зная значения  $H^r(r)$ , методом прогонки [12] определяются значения тепловых смещений в момент времени  $t_{n+1}$   $\bar{H}^r(r)$ . Далее определяется поле температур в момент времени  $t_{n+1}$ .

### 3.3.2 Модель распухания топлива

Для расчёта свободного распухания смешанного уран-плутониевого нитридного топлива в зависимости от выгорания, относительной плотности, эффективной плотности топлива и температуры в инженерной версии кода БЕРКУТ используется следующая эмпирическая корреляция [13]:

$$\frac{\Delta V}{V} = 3,654 \times 10^{-7} \times T^{1,138} \times \beta^{0,6615} \times \gamma^{2,816} \times \gamma_{эфф}^{-1,115} \quad (3.1)$$

где  $\frac{\Delta V}{V}$  – объёмное распухание, %,  $T$  – температура, К,  $\beta$  – выгорание, % т.ат.,  $\gamma$  – начальная плотность топлива, % теор.,  $\gamma_{эфф}$  – эффективная плотность топлива, %. Область применения указанных соотношений:  $300 \leq T \leq 1800$  К;  $0 \leq \beta \leq 18$  % т. ат.;  $67 \leq \gamma \leq 95$ %;  $80 \leq \gamma_{эфф} \leq 98$ %.

Для расчёта распухания нитридного топлива после наступления контакта между топливом и оболочкой в инженерной версии кода БЕРКУТ используется следующая эмпирическая зависимость [14]:

$$\dot{S} = 0,008 \cdot C_3 + 0,01 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot \exp(-C_2 \cdot \beta), \quad (3.2)$$

где  $C_1 = 10 + \frac{24}{1 + \exp\left(\frac{1277 - T}{74}\right)}$ ,  $C_2 = 0,06 + 1000 \cdot \exp\left(-\frac{17620}{T}\right)$ ,  $C_3 = \exp(0,04 - p)$ ,

$C_4 = \exp(-0,1 \cdot P_K)$ ,  $\dot{S}$  – скорость объёмного распухания, отн.ед./% т.ат.,  $\beta$  – выгорание, % т. ат.,  $T$  – температура, К,  $p$  – пористость, отн.ед.,  $P_K$  – контактное давление (МПа), которое определяется из решения термомеханической задачи при наступлении МВТО.

### 3.3.3 Модель выхода ГПД под оболочку

Для смешанного уран-плутониевого нитридного топлива зависимость относительного выхода ГПД от температуры, относительной плотности и выгорания имеет следующий вид [13]:

$$FGR(\beta, \gamma, T) = \frac{100}{e^{0,0025 \times \left(90 \times \frac{\gamma^{0,77}}{\beta^{0,09}} - T\right)} + 1}. \quad (3.3)$$

где  $FGR$  – газовыделение, %,  $\beta$  – выгорание топлива, % т.ат.,  $T$  – температура топлива, К,  $\gamma$  – относительная плотность топлива, % теор.

Область применения корреляции (3.3):  $873 \leq T \leq 2000$  К,  $0 \leq \beta \leq 5\%$  т. ат.,  $80 \leq \gamma \leq 97,8\%$ . При выгораниях выше 5% т.ат. относительный выход ГПД предполагается равным 50%, при температурах выше 2000 К – 70%.

В текущей версии инженерного твэльного кода учитывается выход под оболочку двух БГ: Хе и Кг. Вначале определяются количества молей Хе и Кг, выделившиеся из каждого радиального слоя таблетки, которые затем суммируются по всем радиальным слоям, типам газов и осевым ячейкам, и находится общее количество ГПД, вышедшее под оболочку твэла. Давление под оболочкой твэла с учётом выхода ГПД определяется из уравнения состояния идеального газа.

### 3.3.4 Модель термомеханического состояния твэла

Основные соотношения для определения НДС твэла выводятся из рассмотрения уравнений равновесия, совместности деформаций и физических законов, связывающих напряжения и деформации [4].

Поле перемещений произвольной ячейки должно оставаться неразрывным в процессе деформирования, т.е. не должно появляться радиальных зазоров или перекрытий между соседними слоями. Сечения, перпендикулярные оси симметрии ячейки и параллельные друг другу до деформирования, должны оставаться таковыми и в процессе деформирования. Еще одним условием является равновесие ячейки, т.е. сумма проекций всех сил, приложенных к ячейке, на вертикальную ось должна быть равна нулю. Выразив деформированные размеры слоёв через начальные размеры и деформации, а деформации в свою очередь через напряжения, получим систему алгебраических уравнений нелинейную относительно неизвестных напряжений. Для её решения используется линеаризация и итерационная процедура по алгоритму Ньютона до достижения заданной точности решения. Решение ищется последовательно для каждой ячейки на локальном шаге по времени  $dt$ . Решение для заданного промежутка времени (глобального шага) ищется в виде последовательности локальных шагов.

Если в произвольной ячейке исчезает газовый зазор в результате распухания топливной таблетки, то к системе добавляется уравнение, соответствующее равенству внешнего радиуса топливной таблетки внутреннему радиусу оболочки. Дополнительным неизвестным в этом случае является контактное давление «топливо-оболочка». Процедура решения остается неизменной.



## 4 Общие сведения о входных и выходных файлах

### 4.1 Входные файлы

#### 4.1.1 Базы данных

Для расчётов интегральным кодом ЕВКЛИД/V1 используются несколько баз данных (смотреть таблицу 4.1):

- по свойствам теплоносителя (натрий, свинец, эвтектика свинец-висмут);
- по свойствам материалов;
- БД с нейтронными сечениями (готовится пользователем под конкретную задачу).

Таблица 4.1 – Базы данных интегрального кода ЕВКЛИД/V1

Имя файла (по умолчанию)	Описание	Путь (относительно головной директории)
NaProp_dat	Двоичный файл со свойствами натрия. Этот файл создаётся специальной программой-генератором.	..\etc\Hydra\
PbProp_dat	Двоичный файл со свойствами свинца. Этот файл создаётся специальной программой-генератором.	..\etc\Hydra\
PbBiProp_dat	Двоичный файл со свойствами эвтектики свинец-висмут. Этот файл создаётся специальной	..\etc\Hydra\

	программой-генератором.	
SmartDB.xml	База данных свойств материалов, теплоносителей, газов, химических элементов.	..\etc\ и ..\etc\Hydra\
UniLib_x64_Release.dll	Динамическая библиотека для работы с базой данных свойств материалов, теплоносителей, газов, химических элементов.	..\bin-win64\
f_Chi.bin, f_Chi_s.txt, f_dif.bin, f_dif_s.txt, f_Sad.bin, f_Sad_s.txt, f_Sc.bin, f_Sc_s.txt, ...	Файлы, содержащие коэффициенты полиномов, используемые в модуле восстановления констант RESEAU.	..\etc\DN3D\const_reseau\diffusion\ (для модуля на базе диффузионного приближения) или ..\etc\DN3D\const_reseau\CORNER\ (для модуля CORNER на базе метода дискретных ординат)
f_Chi, f_dif, f_Sad, ...	Файлы констант, рассчитанных по программе CONSYST.	..\etc\DN3D\const_interp\diffusion\ (для модуля на базе диффузионного приближения) или ..\etc\DN3D\const_interp\CORNER\ (для модуля CORNER на базе метода дискретных ординат)

#### 4.1.2 XML файлы

Для проведения расчётов интегральным кодом ЕВКЛИД/V1 необходимо подготовить входной файл в спецификации XML, который содержит значения всех

входных параметров, необходимых для проведения расчётов модулями. Его подробное описание приведено в разделе 5 настоящего руководства.

XML (eXtensible Markup Language) – расширяемый язык разметки. Каждый XML-документ начинается с пролога, содержащего в первой строке XML-объявление, в котором указываются версия языка и используемая кодировка (опционально), например, `<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>`, а также инструкции по обработке, если они нужны. Далее следует корневой элемент, внутри которого помещается весь текст XML-документа за исключением пролога. XML-документы состоят из элементов, начинающихся открывающим тегом `<...>` и заканчивающихся закрывающим тегом `</...>`. Тег – конструкция разметки, которая содержит имя элемента. В открывающем теге и теге пустого элемента (не содержащего внутри себя других элементов) могут использоваться атрибуты – пары «имя/значение» – для ввода необходимых данных. Комментарии в XML выделяются последовательностями символов `<!--Текст комментария-->`. Комментарии нельзя помещать перед XML-объявлением и внутри символов разметки. Также запрещено использовать в тексте комментария двойной дефис «--». Пример XML-документа представлен на рисунке 4.1.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<Document>
  <!--Ваш комментарий-->
  <Element1 Attribute1="1">
    ...
  </Element1>
  <Element2 Attribute2="2">
    ...
  </Element2>
  ...
</Document>
```

Рисунок 4.1 – Пример XML-документа

Входной файл на языке XML – текстовый и может редактироваться как стандартными текстовыми процессорами, так и специфическими XML-редакторами, обладающими дополнительными возможностями, такими, как синтаксический контроль, «скрытие», «сворачивание» содержимого отдельных подблоков, табличное представление однотипных узлов, использование схем для контроля обязательности, типов и многие другие возможности, кроме того, в нем обеспечена возможность ввода иерархических данных.

Таким образом, как всякий стандарт, XML язык является удобным средством обработки данных и имеет значительные сервисные возможности как для пользователей, так и для разработчиков программных продуктов.

Для составления входного файла рекомендуется использовать редактор Altova XMLSpy. Если работа ведется в другом редакторе, по завершении работы над входным файлом необходимо открыть его в Mozilla Firefox с целью диагностики ошибок формата XML-файла. Диагностика данных ошибок выполняется редакторами. Кодом Евклид/V1 она не выполняется. Запуск задачи на счет можно выполнять только после исправления всех ошибок, отображаемых программами Altova XMLSpy или Mozilla Firefox.

## 4.2 Выходные файлы

Все выходные файлы помещаются в директорию, в которой находится исходный входной файл для данного расчёта.

Список выходных файлов интегрального кода Евклид/V1 представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Список выходных файлов интегрального кода Евклид/V1

Имя файла	Описание выдачи данных в файле	Условие выдачи файла
*.plt	Двоичный плот-файл для возможности отображения результатов расчёта пост-процессором.	Выводится всегда
*.rst	Двоичный рестарт-файл для обеспечения возможности продолжения расчёта.	Выводится всегда
*.msg	Диагностический файл, в который выводится информация о результатах чтения входных данных и итерационном процессе.	Выводится всегда

Имя файла	Описание выдачи данных в файле	Условие выдачи файла
*.flag	Файл-признак защиты от затирания.	Выводится, если в команде запуска не указан параметр «-p» (смотреть подраздел 1.1)
*_Hydraulics.out	Текстовый файл, содержащий результаты расчётов теплогидравлических характеристик течения теплоносителя.	Выводится, если установлен соответствующий флаг во входном файле

\* означает имя входного файла интегрального кода ЕВКЛИД/V1.

## 5 Формат входных файлов

### 5.1 Общее описание входного файла интегрального кода ЕВКЛИД/V1

Ниже приведено описание входного файла в спецификации XML для интегрального кода ЕВКЛИД/V1. Файл назван Test.xml. Как всякий XML-файл, файл Test.xml начинается идентифицирующим XML-тегом (смотреть рисунок 5.1).

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
```

Рисунок 5.1 – Идентифицирующий XML-тег

Далее на верхнем уровне иерархии расположен корневой элемент задачи Task, начинающийся с открывающегося тега <Task> и заканчивающийся закрывающимся тегом </Task> (смотреть рисунок 5.2).

```
<Task Version="3.2">
```

...  
 </Task>

Рисунок 5.2 – Пример тега <Task>

Тег Task содержит один атрибут – Version, описанный в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Атрибуты тега Task

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Version	CHAR	Версия управляющей программы.  Обязательный атрибут.	3.1, 3.2, 3.4, 3.5	_____

Блок Task состоит из тегов-подблоков, порядок которых во входном файле произволен: <Main>, <Core>, <Hydraulics>, <Neutronics>, <BERKUT>. В подразделах 5.2 – 5.6.6 теги-подблоки будут описаны подробно.

## 5.2 Тег <Main> ... </Main>

В блоке Main задаются данные управляющей программы. Описание атрибутов и их значений для тега Main приведено в таблице 5.2. Тег является обязательным.

Таблица 5.2 – Атрибуты тега Main

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
PlotFileName	CHAR	Имя файла интегрированного вывода (плот-файла)  Необязательный атрибут.	_____	<Имя входного файла>.plt

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
RestartFileName	CHAR	Имя файла продолжения расчёта (рестарт-файла) Необязательный атрибут.	_____	<Имя входного файла>.rst

Тег Main содержит подтеги Description, ModuleList, TimeTable и PlotList в произвольном порядке. Все подтеги являются обязательными.

### 5.2.1 Тег <Description> ... </Description>

В теге Description задаётся текстовое описание задачи – произвольный комментарий пользователя. Пример задания тега Description показан на рисунке 5.3.

```
<Description>Test Example XML file for code EUCLID</Description>
```

Рисунок 5.3 – Пример тега <Description>

### 5.2.2 Тег <ModuleList> ... </ModuleList>

Тег ModuleList содержит описание схемы задачи. Атрибуты тега ModuleList описаны в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Атрибуты тега ModuleList

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
SchemeType	CHAR	Тип схемы расщепления по времени Необязательный атрибут.	Serial, Parallel	Serial
Linking	CHAR	Тип связывания модулей Необязательный атрибут.	Manual, Auto	Auto

Внутри тег `ModuleList` содержит подтеги `Module` для каждого модуля задачи в порядке, соответствующем порядку вызова этих модулей (модуль `CFunc` всегда указывается первым в списке модулей). Тег `Module` имеет только один атрибут – `Name` (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Атрибуты тега `Module`

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя модуля Обязательный атрибут.	CFunc, DN3D, BERKUT, Hydra	_____

Тег `Module` может содержать подтеги `Link`. Тег `Link` описывает связь текущего модуля с другими, может использоваться для разрешения неоднозначностей автоматического связывания. Атрибуты тега `Link` представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Атрибуты тега `Link`

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя клиентского порта текущего модуля Обязательный атрибут.	Neutr-Pb-Hydraulics (порт модуля DN3D), FuelRod-Pb-Hydraulics (порт модуля BERKUT)	_____
Target	CHAR	Имя модуля-сервера Обязательный атрибут.	Hydra	_____
TargetName	CHAR	Имя серверного порта Необязательный атрибут.	Neutr-Pb-Hydraulics (порт для связи Hydra и DN3D), FuelRod-Pb-Hydraulics (порт для связи Hydra и BERKUT)	Имя клиентского порта



### 5.2.3 Тег <TimeTable> ... </TimeTable>

Тег TimeTable содержит временные параметры задачи и таблицы скважностей вывода. Атрибуты тега TimeTable представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Атрибуты тега TimeTable

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
StartTime	REAL	Время начала расчёта, с Обязательный атрибут.	$[-\infty, +\infty]$	_____
DtStart	REAL	Начальный шаг синхронизации модулей, с Необязательный атрибут.	$[0, +\infty]$	$\infty$
EndTime	REAL	Время окончания расчёта, с Обязательный атрибут.	$[-\infty, +\infty]$	_____

Для задания временных шагов записи данных в выходные файлы, рестарт-файл и плот-файл, а также задания максимального и минимального шагов по времени используется тег TimeControl. При задании отрицательной скважности соответствующий вывод не производится, при задании нулевой — выдача производится каждый шаг. Атрибуты тега описаны в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Атрибуты тега TimeControl

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
--------------	--------------	------------------------------	------------------	-----------------------

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Start	REAL	Момент времени, начиная с которого действуют заданные параметры, с. Необязателен только в первом теге TimeControl	$[-\infty, +\infty]$	время начала расчёта
DtMax	REAL	Максимально допустимый шаг по времени на данном отрезке времени, с. Необязательный атрибут.	$[0, +\infty]$	$\infty$
DtMin	REAL	Минимально допустимый шаг по времени на данном отрезке времени, с. Необязательный атрибут.	$[0, +\infty]$	0.0
DtRestart	REAL	Шаг записи данных в рестарт-файл, с Обязательный атрибут.	$[0, +\infty]$	_____
DtPlot	REAL	Шаг записи переменных в плот-файл, с. Обязательный атрибут.	$[0, +\infty]$	_____
DtCF	REAL	Шаг записи значений контрольных функций в текстовые файлы, с. Обязательный атрибут.	$[0, +\infty]$	_____
DtOutput	REAL	Шаг записи данных в выходные текстовые файлы, с. Обязательный атрибут.	$[0, +\infty]$	_____

### 5.2.4 Тер <PlotList> ... </PlotList>

Тер PlotList содержит таблицу фильтров для файла интегрированного вывода в виде набора подтегов Plot. Тер Plot соответствует фильтру файла интегрированного вывода и имеет только один атрибут Filter (таблица 5.8), который должен начинаться либо с «+», либо с «-».

Таблица 5.8 – Атрибуты тега Plot

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Filter	CHAR	Фильтр плот-файла  Обязательный атрибут.	+Hydraulics +BERKUT +Neuntronics	_____

### 5.2.5 Пример тега <Main> ... </Main>

Пример ввода тега Main показан на рисунке 5.4. Данный пример соответствует решению связанной задачи тремя модулями, связь модулей автоматическая. В таблице скважностей от 0 с до 100 с заданы одни параметры управления расчётом, а после 100 с – другие параметры. Также представлен список фильтров для плот-переменных, которые необходимо вывести в файл отображения результатов расчёта.

```
<Main PlotFileName="BREST-4sfa.plt" RestartFileName="BREST-4sfa.rst">
  <Description>Test Example XML file for code Euclid</Description>
  <ModuleList SchemeType="Serial" Linking="Auto">
    <Module Name="CFunc"/>
    <Module Name="DN3D"/>
    <Module Name="BERKUT">
    <Module Name="Hydra"/>
  </ModuleList>
  <TimeTable StartTime="0.0" EndTime="200.0" DtStart="0.005">
    <TimeControl Start="0" DtMin="1.e-6" DtMax="0.1" DtRestart="0.1" DtPlot="0.005"
DtOutput="0.05" DtCF="-1"/>
    <TimeControl Start="101.0" DtMin="1.e-6" DtMax="1.0" DtRestart="1.0"
DtPlot="0.005" DtOutput="-1" DtCF="-1"/>
  </TimeTable>
  <PlotList>
    <Plot Filter="+Hydraulics"/>
    <Plot Filter="+BERKUT"/>
    <Plot Filter="+Neuntronics"/>
  </PlotList>
</Main>
```

Рисунок 5.4 – Пример тега <Main>

### 5.3 Тег <Core> ... </Core>

В блоке Core задаются данные для а.з. Данный блок позволяет в удобном виде ввести данные для моделирования а.з. и провести связанный расчёт тремя модулями.

В теге Core должны быть заданы подтеги, перечисленные в таблице 5.10. Для каждого из них указано обязательный он или нет. В случае отсутствия обязательных подтегов программа семантического контроля выдаст сообщение об ошибке.

Таблица 5.9 – Подтеги тега Core

Имя подтега	Описание
Section	Описание разбиения активной зоны на ячейки в аксиальном направлении. Необязательный.
LoadTHMAP	Картограмма активной зоны. Обязательный.
Zone	Выделенная часть активной зоны (соответствует одному гидравлическому каналу). Обязательный.
FuelAssembly	Тепловыделяющая сборка. Обязательный.
FuelRod	Тепловыделяющий стержень. Обязательный.
AbsorbingRod	Поглощающий стержень. Необязательный.
Canister	Чехол тепловыделяющей сборки. Необязательный.

Имя подтега	Описание
By_Pass	Канал межкассетного пространства. Необязательный.
InnerHS	Фиктивная тепловая структура между каналами межкассетного пространства. Необязательный.

В таблице 5.11 перечислены атрибуты тега Core.

Таблица 5.10 – Атрибуты тега Core

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя активной зоны Обязательный атрибут.	Любое (максимум 100 символов)	_____
FAPitch	REAL	Шаг ТВС (расстояние между центрами ТВС), м Обязательный атрибут.	[0., 10.]	_____
LengthHydra	REAL	Длина теплогидравлических каналов в а.з., м Обязательный атрибут.	[0., 100.]	_____
NCellHydra	CHAR	Количество аксиальных ячеек в теплогидравлических каналах Обязательный атрибут.	[0, 300]	_____

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
FRPitch	REAL	Шаг решётки твэлов (расстояние между центрами твэлов в ТВС), м Обязательный атрибут.	[0., 10.]	_____
ARPitch	REAL	Шаг решётки пэлов (расстояние между центрами пэлов в ТВС), м Обязательный атрибут, если в ТВС есть поглощающие элементы.	[0., 10.]	_____
Roughness	REAL	Шероховатость, м Шероховатость в каждой РЯ всех каналов активной зоны будет равна Roughness. Необязательный атрибут.	[0., 0.1]	5.e-5
ExtHS	BOOL	Признак наличия связи канала межкассетного пространства с тепловой структурой, моделирующей обечайку. Необязательный атрибут.	0, 1	0

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
XHeat	REAL	Координата, определяющая положение твэла, относительно начала активной зоны, м.  Необязательный атрибут.	[0., LengthHydra)	0.0
XHeat_AbsRod	REAL	Координата, определяющая положение пэла, относительно начала активной зоны, м.  Обязательный атрибут, если в активной зоне есть пэлы. В противном случае не используется.	[LengthHeat+ XHeat, LengthHydra)	_____
LengthHeat	REAL	Величина, определяющая длину твэла, м.  Необязательный атрибут.	(0, LengthHydra– XHeat]	LengthHydra
LengthHeat_AbsRod	REAL	Величина, определяющая длину пэла, м.  Обязательный, если в активной зоне есть пэлы. В противном случае – не используется.	(0, LengthHydra– XHeat_AbsRod]	_____

Разбиение активной зоны на ячейки в аксиальном направлении в случае неравномерной по высоте сетки задаётся в тегах Section, которых может быть несколько. Атрибуты тега Section перечислены в таблице 5.12. В этом случае сумма значений всех атрибутов LengthAxial должна быть равна величине LengthHydra тега Core, а сумма значений всех атрибутов CellNumber должна быть равна величине NCellHydra. В противном случае код выдаст ошибку.

Таблица 5.11 – Атрибуты тега Section

Имя атрибута	Тип	Описание и единицы измерения	Диапазон значения	Значение по умолчанию
LengthAxial	REAL	Длина аксиальной секции активной зоны, м Обязательный атрибут.	(0., LengthHydra]	_____
CellNumber	INT	Число расчётных ячеек в аксиальной секции активной зоны Обязательный атрибут.	[1, NCellHydra]	_____

В теге LoadТНМАР с помощью целых чисел заводится картограмма а.з. Каждое уникальное значение, помещённое в тег LoadТНМАР, соответствует теплогидравлическому каналу. Значения должны быть разделены пробелом. Перед картограммой приводится ее разметка – число строк и количество чисел в каждой строке картограммы. Картограмма должна быть представлена в виде правильного шестигранника, это связано с особенностями её последующей обработки в коде. Если картограмма загрузки изначально имеет неправильную форму, то она дополняется нулями до правильного шестигранника. Пример картограммы приведен на рисунке 5.6.

<LoadТНМАР>

```

29      15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 28 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15
      304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304
      304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304
      304 304 304 304 304 303 303 303 303 303 303 303 303 303 304 304 304 304 304 304
      304 304 304 304 303 303 302 302 302 302 302 302 302 302 303 303 304 304 304 304
      304 304 304 303 302 302 301 301 301 300 301 301 301 301 302 302 303 304 304 304
      304 304 304 303 302 301 301 300 295 296 297 298 299 300 301 301 302 303 304 304 304
      304 304 304 303 302 301 300 263 264 265 266 267 268 269 228 300 301 302 303 304 304 304
      304 304 304 303 302 301 294 262 222 223 224 225 226 227 192 229 270 301 302 303 304 304 304
      304 304 304 303 302 301 293 261 221 187 188 189 190 191 162 193 230 271 300 302 303 304 304 304
      304 304 304 303 302 300 292 260 220 186 158 159 160 161 138 163 194 231 272 301 302 303 304 304 304
      304 304 304 303 302 301 291 259 219 185 157 135 136 137 120 139 164 195 232 273 301 302 303 304 304 304
      304 304 304 303 302 301 290 258 218 184 156 134 118 119 108 121 140 165 196 233 274 301 302 303 304 304 304
      304 304 304 303 302 300 257 217 183 155 133 117 107 102 109 122 141 166 197 234 300 302 303 304 304 304

```



```

304 304 304 304 303 302 301 256 216 182 154 132 116 106 101 103 110 123 142 167 198 235 301 302 303 304 304 304 304
304 304 304 304 303 302 300 255 215 181 153 131 115 105 104 111 124 143 168 199 236 300 302 303 304 304 304 304
304 304 304 303 302 301 289 254 214 180 152 130 114 113 112 125 144 169 200 237 275 301 302 303 304 304 304
304 304 304 303 302 301 288 253 213 179 151 129 128 127 126 145 170 201 238 276 301 302 303 304 304 304
304 304 304 303 302 301 287 252 212 178 150 149 148 147 146 171 202 239 277 300 302 303 304 304 304
304 304 304 303 302 300 286 251 211 177 176 175 174 173 172 203 240 278 301 302 303 304 304 304
304 304 304 303 302 301 285 250 210 209 208 207 206 205 204 241 279 301 302 303 304 304 304
304 304 304 303 302 301 300 249 248 247 246 245 244 243 242 300 301 302 303 304 304 304
304 304 304 303 302 301 301 300 284 283 282 281 280 300 301 301 302 303 304 304 304
304 304 304 303 302 302 301 301 301 301 300 301 301 301 302 302 303 304 304 304
304 304 304 304 303 303 302 302 302 302 302 302 302 302 303 303 304 304 304 304
304 304 304 304 304 303 303 303 303 303 303 303 303 304 304 304 304 304 304
304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304
304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304
304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304 304

```

</LoadTHMAP>

Рисунок 5.5 – Пример тега <LoadTHMAP>

Картограмма, представленная на рисунке 5.6, соответствует 203 теплогидравлическим каналам с именами «101» ÷ «304».

Теплогидравлические каналы, входящие в а.з., должны быть заданы в тегах Zone. Теги Zone имеют атрибуты Name и Roughness, приведенные в таблице 5.13. На основе геометрических параметров, указанных в таблице 5.11, генерируются теплогидравлические каналы, соответствующие каждой зоне на картограмме.

Таблица 5.12 – Атрибуты тега Zone

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	INT	Имя зоны. Обязательный атрибут.	[0, 10 <sup>10</sup> ]	_____
Roughness	REAL	Шероховатость, м Шероховатость в каждой РЯ для данного канала активной зоны будет равна Roughness. Необязательный атрибут.	[0, 0.1]	Roughness из тега Core. Если он не задан, то значением по умолчанию будет величина, равная 5.e-5

Геометрические параметры каналов а.з. рассчитываются автоматически, но при необходимости можно переопределить площадь сечения, периметр и гидравлический диаметр каналов. Для этого внутри тегов Zone нужно использовать теги Section (смотреть таблицу 5.14), в которых помимо геометрических параметров можно задать необходимое термодинамическое состояние теплоносителя в канале. Задать диапазон действия тега

Section можно двумя способами: определить CellNumber (и StartIdx при необходимости) или определить X и Length. Если не будет определено ни то, ни другое, то код выдаст ошибку.

Если суммарное количество ячеек, на которое распространяется переопределение параметров, окажется больше величины общего числа аксиальных ячеек в а.з., то код выдаст ошибку и прекратит работу. В случае, если пользователь решит переопределить геометрические размеры в тех ячейках канала, где есть твэлы или пэлы, то код выдаст предупреждение, но работа кода продолжится.

Таблица 5.13 – Атрибуты тега Section

Имя атрибута	Тип	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
StartIdx	INT	Номер ячейки, с которой начинается секция.  Необязательный атрибут. Если заданы атрибуты X и Length, то не используется.	[1, NCellHydra]	1 – для первой Section  n+1 – для следующих, где n – номер последней ячейки предыдущей Section
CellNumber	INT	Количество ячеек, на которые распространяются заданные параметры Section.  Обязательный атрибут, если не заданы атрибуты X и Length. Если же они заданы, то не используется.	(0, NCellHydra]	_____

Имя атрибута	Тип	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
X	REAL	Координата расположения начала секции относительно начала а.з., м.  Обязательный атрибут, если не задан CellNumber. Если есть CellNumber, то не используется.	[0., LengthHydra]	_____
Length	REAL	Длина секции, м.  Обязательный атрибут, если не задан CellNumber. Если есть CellNumber, то не используется.	(0., LengthHydra]	_____
Deqv	REAL	Гидравлический диаметр, м  Гидравлический диаметр каждой РЯ, входящей в состав секции, будет равен Deqv.  Обязательный атрибут, кроме случая (игнорируется), если заданы атрибуты Area и Perimeter.	[1.e-7, 1.e2]	_____

Имя атрибута	Тип	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Area	REAL	<p>Площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup></p> <p>Площадь поперечного сечения каждой РЯ, входящей в состав секции, будет равна Area.</p> <p>Обязательный атрибут, кроме случая (игнорируется), если заданы атрибуты Deqv и Perimeter.</p>	[1.e-10, 2.5e3]	_____
Perimeter	REAL	<p>Смоченный периметр, м</p> <p>Смоченный периметр каждой РЯ, входящей в состав секции, будет равен Perimeter.</p> <p>Обязательный атрибут кроме случая (игнорируется), если заданы атрибуты Deqv и Area.</p>	[1.e-7, 1.e6]	_____

Параметры термодинамического состояния задаются аналогично простому каналу (смотреть Руководство пользователя ПК HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 [3]), включая тег NCG.

Если теплогидравлический канал имеет в своем составе ТВС, то внутри тега Zone задаются подтеги FuelAssemblyList в соответствии с типами ТВС, входящими в состав

данной теплогидравлической зоны. Атрибуты тега FuelAssemblyList представлены в таблице 5.15.

Таблица 5.14 – Атрибуты тега FuelAssemblyList

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя типа ТВС, соответствующего данной теплогидравлической зоне.  Обязательный атрибут.	Любое (до 64-х символов)	_____

В любом канале, моделирующем часть а.з. и заданном на картограмме, могут быть определены объекты «Местное сопротивление», характеристики которых задаются в тегах LocalResistance, которые в свою очередь входят в тег Zone. Атрибуты тега LocalResistance представлены в таблице 5.16.

Таблица 5.15 – Атрибуты тега LocalResistance

Имя атрибута	Тип	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя объекта. Обязательный атрибут.	Любое	_____
X	REAL	Расстояние от начала зоны (нижнего гидравлического объёма), м.  Обязательный атрибут.	[1.e-5, 1.e2]	_____
TypeDirect Resistance	CHAR	Ключ, определяющий, в каком виде пользователь задаёт	[CF, TF,	Const

Имя атрибута	Тип	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
		коэффициент местного сопротивления в положительном направлении: CF – функциональная зависимость; TF – функция от времени; Const– константа. Необязательный атрибут.	Const]	
Ввод следующих атрибутов зависит от значения ключа TypeDirectResistance Если TypeDirectResistance = «CF»				
DirectResistance	CHAR	Имя функции, определяющей значение коэффициента местного сопротивления в положительном направлении. Обязательный атрибут.	Любое (максимум 100 символов)	_____
Если TypeDirectResistance =»TF»				
DirectResistance	CHAR	Имя таблицы, определяющей значения коэффициента местного сопротивления в положительном направлении. Обязательный атрибут.	Любое (максимум 100 символов)	_____
Если TypeDirectResistance =»Const»				
DirectResistance	REAL	Коэффициент местного сопротивления в положительном направлении. Обязательный атрибут.	$\geq 0$	_____
TypeInverse Resistance	CHAR	Ключ, определяющий, в каком виде пользователь задаёт коэффициент местного сопротивления в	[CF, TF, Const]	Const

Имя атрибута	Тип	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
		отрицательном направлении: CF – функциональная зависимость; TF – функция от времени; Const– константа. Необязательный атрибут.		
Ввод следующих атрибутов зависит от значения ключа TypeInverseResistance Если TypeInverseResistance =”CF”				
InverseResistance	CHAR	Имя функции, определяющей значение коэффициента местного сопротивления в отрицательном направлении. Обязательный атрибут.	Любое (максимум 100 символов)	_____
Если TypeInverseResistance =”TF”				
Inverse Resistance	CHAR	Имя таблицы, определяющей значения коэффициента местного сопротивления в отрицательном направлении. Обязательный атрибут.	Любое (максимум 100 символов)	_____
Если TypeInverseResistance =”Const”				
InverseResistance	REAL	Коэффициент местного сопротивления в отрицательном направлении. Необязательный атрибут.	$\geq 0$	DirectResistance
Примечание – Значение атрибута X не может превышать значения общей высоты				

Имя атрибута	Тип	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
активной зоны, в противном случае программа семантического контроля выдаст предупреждение.				

Тег FuelAssembly имеет атрибуты, описанные в таблице 5.17.

Таблица 5.16 – Атрибуты тега FuelAssembly

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя тепловыделяющей сборки Обязательный атрибут.	Любое (максимум 100 символа)	_____
NumberRod	INT	Общее количество твэлов и регулирующих стержней в ТВС Обязательный атрибут.	[0, 10 <sup>5</sup> ]	_____
FRPitch	REAL	Шаг решётки твэлов (расстояние между центрами твэлов в ТВС), м Необязательный атрибут.	[0., 10.]	FRPitch из тега Core
ARPitch	REAL	Шаг решётки пэлов (расстояние между центрами пэлов в ТВС), м Необязательный атрибут.	[0., 10.]	ARPitch из тега Core



Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
XHeat	REAL	<p>Переопределяет координату положения твэла относительно начала активной зоны, для конкретной ТВС, м.</p> <p>Необязательный атрибут.</p>	[0., LengthHydra)	Атрибут XHeat тега Core
XHeat_Abs Rod	REAL	<p>Переопределяет координату положения пэла относительно начала активной зоны, для конкретной ТВС, м.</p> <p>Необязательный атрибут.</p> <p>Не используется, если в а.з. нет тега AbsorbingRod</p>	[LengthHeat +XHeat, LengthHydra)	Атрибут XHeat_AbsRod тега Core
LengthHeat	REAL	<p>Переопределяет длину твэла для конкретной ТВС, м.</p> <p>Необязательный.</p>	(0., LengthHydra]	Атрибут LengthHeat тега Core

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
LengthHeat_AbsRod	REAL	Переопределяет длину пэла, м. Необязательный. Не используется, если в а.з. нет тега AbsorbingRod	(0., LengthHydra-XHeat_AbsRod]	Атрибут LengthHeat_AbsRod тега Core

Тепловыделяющие сборки состоят из твэлов. Имена и количество твэлов, входящих в данную тепловыделяющую сборку, задаются в подтегах FuelRodList (таблица 5.18) тега FuelAssembly. Подтег FuelRodList является обязательным в случае натриевого теплоносителя и необязательным, если в качестве теплоносителя задан свинец. Кроме того, при необходимости можно моделировать сборки, в которых помимо твэлов присутствуют пэлы – поглощающие элементы, которые располагаются над твэлами в одной и той же сборке. Для их описания нужно воспользоваться тегом AbsorbingRodList, который задаётся полностью аналогично тегу FuelRodList с единственным отличием – тег AbsorbingRodList является необязательным всегда.

Таблица 5.17 – Атрибуты тега FuelRodList

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя типа ТВС Обязательный атрибут.	Любое (до 64-х символов)	_____
Number	INT	Число твэлов данного типа в ТВС Обязательный атрибут.	[0, 10 <sup>10</sup> ]	_____

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
KPower	REAL	Коэффициент, на который домножается функция энерговыделения в твэле данного типа. Необязательный атрибут.	[0., 10 <sup>10</sup> ]	1.0

Тег FuelRod содержит основные геометрические параметры твэлов. Атрибуты тега FuelRod представлены в таблице 5.19. Атрибуты тегов AbsorbingRod полностью аналогичны атрибутам тегов FuelRod.

Таблица 5.18 – Атрибуты тега FuelRod

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя типа твэла Обязательный атрибут.	Любое (до 64-х символов)	_____
Diameter	REAL	Внешний диаметр твэла, м Обязательный атрибут.	[0., 10.]	_____
DiameterIn	REAL	Диаметр топливного сердечника, м Необязательный атрибут.	[0., 10.]	0.0
LengthHeat	REAL	Длина твэла, м Обязательный атрибут.	[0., 100.]	_____
NumWire	INT	Число проволок навивки Необязательный атрибут.	[0, 10 <sup>10</sup> ]	0
WireDiam	REAL	Диаметр навивки, м Необязательный атрибут.	[0., 10 <sup>10</sup> ]	0.
HelixPitch	REAL	Шаг навивки, м Необязательный атрибут.	[0., 10 <sup>10</sup> ]	0.

Также у тепловыделяющей сборки может быть чехол. В этом случае должен быть задан тег Canister – его атрибуты представлены в таблице 5.20. Чехол по описанным в этом теге параметрам будет сгенерирован для каждой зоны. При этом для всех типов ТВС он будет одинаков с точки зрения геометрии и материалов. В случае использования чехла все межчехловое пространство моделируется отдельным каналом Vy\_Pass, также сгенерированным автоматически, который соединяется с внешними поверхностями чехлов всех ТВС в активной зоне. При необходимости межкассетное пространство чехловыхборок может быть разбито на несколько каналов. Для этого необходимо использовать тег <Vy\_Pass>, атрибуты которого представлены в таблице 5.21.

Таблица 5.19 – Атрибуты тега Canister

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя объекта Каждому объекту должно быть присвоено уникальное имя. Обязательный атрибут.	Любое (максимум 100 символов)	_____
WrenchSize	REAL	Размер чехла «под ключ». Обязательный атрибут.	[1.e-7, 1.e2]	_____
deltaWrenchSize	REAL	Толщина чехла. Обязательный атрибут.	[1.e-7, 1.e2]	_____

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
MatCanister	CHAR	Материал чехла. Может быть задано любое имя из набора материалов, описанных в подтегах MatProp тега Hydraulics. Обязательный атрибут, если в тегах Region не заданы атрибуты MaterialCan. Если же они заданы, то использовать текущий атрибут нельзя.	Любое (максимум 100 символов)	_____
TempCanister	REAL	Начальная температура чехла Необязательный атрибут.	[273.25, 2273.15]	300.
EmissivityInCanister	REAL	Степень серости внутренней поверхности чехла Необязательный атрибут.	[0.01, 0.99]	0.99
EmissivityExCanister	REAL	Степень серости внешней поверхности чехла Необязательный атрибут.	[0.01, 0.99]	0.99

Таблица 5.20 – Атрибуты тега Bu\_Pass

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя канала. Обязательный атрибут.	Любое (максимум 100 символа)	_____
ListZones	CHAR	Диапазон каналов Core, которые будет охватывать данный канал межкассетного пространства. Должен быть задан в следующем формате: нач. номер зоны : конечный номер зоны, следующий номер зоны и т.п. При этом используются следующие умолчания:  : – все зоны;  : 5 – с первой до пятой зоны;  8 : – с восьмой до последней зоны.  Обязательный атрибут.	Любой из номеров зон, заданных в объекте Core	_____

Для каналов `By_Pass` можно задать локальное сопротивление аналогично объектам `Zone` (смотреть таблицу 5.16). Для этого нужно использовать тег `<By_Pass> ... </By_Pass>`, внутри которого должен находиться подтег `LocalResistance` со всеми соответствующими атрибутами. При этом, тип локального сопротивления может принимать значения только `TF`, `CF` и `Const`.

Если есть необходимость моделирования теплообмена между каналами межкассетного пространства, нужно использовать тег InnerHS, атрибуты которого представлены в таблице 5.22. Этот тег задаёт фиктивную тепловую структуру, состоящую из материала теплоносителя (жидкометаллического), с помощью которого происходит теплообмен между соседними каналами межкассетного пространства.

Таблица 5.21 – Атрибуты тега InnerHS

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя теплопроводящей структуры. Обязательный атрибут.	Любое (максимум 100 символа)	_____
NameFirst	CHAR	Имя канала межкассетного пространства, который будет соединён с внутренней поверхностью теплопроводящей структуры. Обязательный атрибут.	Любое из имён каналов межкассетного пространства (максимум 100 символа)	_____
NameSecond	CHAR	Имя канала межкассетного пространства, который будет соединён с внешней поверхностью теплопроводящей структуры. Обязательный атрибут.	Любое из имён каналов межкассетного пространства (максимум 100 символа)	_____

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Area	REAL	Площадь внутренней поверхности теплопроводящей структуры, м <sup>2</sup> . Обязательный атрибут.	[0; 1000]	_____
Thinkness	REAL	Толщина теплопроводящей структуры, м. Обязательный атрибут.	[0; 0.1]	_____

В чехле есть возможность задать различное число ячеек в каждой секции по радиусу в подтеге RadialSection тега Canister. Атрибуты тега RadialSection приведены в таблице 5.23.

Таблица 5.22 – Атрибуты тега RadialSection

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
R0	REAL	Координата левой границы радиальной секции чехла, м Обязательный атрибут в первой секции, в остальных – необязательный атрибут. Если отсутствует, то значение равно R0+DR предыдущей секции.	[1.e-10, 1.e10]	_____



Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
DR	REAL	Толщина радиальной секции чехла, м Обязательный атрибут.	[1.e-10, 1.e10]	_____
NR	INT	Количество расчётных узлов по радиусу (толщине) секции толщиной DR Необязательный атрибут.	[1, 10 <sup>4</sup> ]	1

При необходимости задания различных материалов по высоте и радиусу чехла, необходимо его разбить на секции в радиальном и аксиальном направлениях в теге Region, входящем в тег Canister. Таким образом, каждая секция высотой DZ в свою очередь разбивается на секции по радиусу протяженностью DR, в которых задаётся свой материал. Атрибуты тега Region представлены в таблице 5.24.

Таблица 5.23 – Атрибуты тега Region

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Z0	REAL	Координата нижней границы аксиальной секции чехла, м Обязательный атрибут в первой секции, в остальных – необязательный атрибут. Если отсутствует, то значение равно Z0+DZ предыдущей секции.	[1.e-10, 1.e10]	_____

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
DZ	REAL	Толщина аксиальной секции чехла, м Обязательный атрибут.	[1.e-10, 1.e10]	_____
R0	REAL	Координата левой границы радиальной секции чехла, м Обязательный атрибут в первой секции, в остальных – необязательный атрибут. Если отсутствует, то значение равно $R0+DR$ предыдущей секции.	[1.e-10, 1.e10]	_____
DR	REAL	Толщина радиальной секции чехла, м Обязательный атрибут.	[1.e-10, 1.e10]	_____
NR	INT	Количество расчётных узлов по радиусу (толщине) секции толщиной DR Необязательный атрибут.	[1, 10000]	1

MaterialCan	CHAR	<p>Материал ячеек, входящих в состав радиальной секции</p> <p>Обязательный атрибут, если в теге Canister не задан атрибут MatCanister. Если он задан, то текущий атрибут использовать нельзя.</p> <p>Может быть задано любое имя из набора материалов, описанных в подтегах MatProp тега Hydraulics.</p>	Любое (максимум 100 символов)	_____
TempCan	REAL	<p>Начальная температура в расчётных ячейках, входящих в состав радиальной секции, К</p> <p>Необязательный атрибут.</p>	[273.25, 2273.15]	300.

Если нет необходимости задавать профиль начальной температуры у чехла, или известно, что чехол весь состоит из одного материала, то достаточно задать атрибуты MatCanister и TempCanister в теге Canister. При этом возможно задать сетку узлов, не указывая температуры и материалы по каждой области. Если же пользователь одновременно будет использовать вышеупомянутые атрибуты и также укажет материалы и температуры в областях, на которые будет разбит чехол, то код будет использовать значения, указанные в атрибутах MatCanister и TempCanister тега Canister. В случае, если пользователь не укажет разбиения для чехла, то по умолчанию будет построено разбиение на 8 ячеек в радиальном направлении.

#### 5.4 Тег <BERKUT>...</BERKUT>

Тег BERKUT является обязательным при использовании твэльного модуля для моделирования поведения твэлов/пэлов в а.з. Тег BERKUT в общем случае состоит из тегов-подблоков: <MainBERKUT>, <FuelRod>, <AbsorbingRod> и <FuncBERKUT>. В зависимости от конкретной задачи некоторые из указанных тегов могут отсутствовать. Далее опишем каждый из тегов более подробно.

#### 5.4.1 Теg MainBERKUT

В теge MainBERKUT определяются следующие общие параметры для твэлов и пэлов: начальная температура и температура, соответствующая разгруженным параметрам твэла/пэла, начальное давление газа под оболочкой, имена функций мощности энерговыделения в твэле/пэле, температуры поверхности оболочки, скорости накопления оболочкой радиационных повреждений, внешнего давления, а также материалы топлива, оболочки и газового зазора. Атрибуты тега MainBERKUT приведены в таблице 5.25.

Таблица 5.24 – Атрибуты тега MainBERKUT

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
TRREF0	REAL	Температура, соответствующая разгруженным параметрам твэла, К Обязательный атрибут.	(0., +∞]	_____
TRSTART	REAL	Начальная температура, К Обязательный атрибут.	(0., +∞]	_____
PGAP0	REAL	Начальное давление газа под оболочкой, Па Обязательный атрибут.	(0., +∞]	_____
HeatPower	CHAR	Имя тега функции мощности энерговыделения Обязательный атрибут при отключённом нейтронно-физическом модуле.	≤ 256 символов	_____
CoolTemp	CHAR	Имя тега функции температуры поверхности оболочки Обязательный атрибут при отключённом теплогидравлическом модуле.	≤ 256 символов	_____

DPARate	CHAR	Имя тега функции скорости накопления оболочкой радиационных повреждений Необязательный атрибут (при отсутствии данного параметра скорость накопления оболочкой радиационных повреждений равна нулю).	≤ 256 символов	_____
PCOOL	CHAR	Имя тега функции давления теплоносителя Необязательный атрибут (при отсутствии данного параметра и отключённом теплогидравлическом модуле давление теплоносителя равно 0,1 МПа, при включённом теплогидравлическом модуле давление теплоносителя приходит из обменной структуры).	≤ 256 символов	_____
IFUEL	CHAR	Материал топлива Обязательный атрибут.	UO2, MOX, UN, UPN, M_UPN <sup>1</sup>	_____
ICLAD	CHAR	Материал оболочки Обязательный атрибут.	CHS68, EK164, EP450, EP823, M_CHS68, M_EP823, M_EK164	_____
IGAS	CHAR	Газ закачки (возможность расчёта с Ar, Kr, Xe в процессе разработки) Обязательный атрибут.	He, Ar, Kr, Xe	_____

<sup>1</sup> Идентификаторы материалов с префиксом «М» соответствуют свойствам из Временных руководящих материалов и доступны для расчётов только через внутреннюю базу данных, написанную на языке FORTRAN-2003, т.е. когда во входном файле не задан атрибут DBSVer.

PUPART	REAL	Содержание плутония в топливе, отн. ед. Обязательный атрибут.	[0., 1.0]	_____
RELDENS	REAL	Плотность топлива относительно теоретической, отн. ед. Обязательный атрибут.	(0., 1.0]	_____
DBSVer	CHAR	Используемая база данных: INTDBS – внутренняя база данных, написанная на языке C++, SMARTDBS – внешняя база данных SmartDB (по умолчанию, если данный атрибут не указан, используется внутренняя база данных, написанная на языке FORTRAN-2003, однако пользователю рекомендуется использовать в расчётах БД SmartDB) Необязательный атрибут.	INTDBS, SMARTDBS	_____

Далее в теге MainBERKUT задаётся тег Modules, а внутри него – подтеги mdlHeat, mdlMechanica, mdlGFR, mdlMFPR, в которых определяются радиальные сетки для модулей, решающих задачи распространения тепла в твэле, деформирования твэла, выхода ГПД под оболочку, механистического моделирования поведения топлива: в атрибутах cntHole, cntPellet, cntGap, cntCladding тега RadLayCount задаётся число слоёв, на которые разбиваются центральное отверстие, таблетка, зазор и оболочка (таблица 5.26).

Таблица 5.25 – Атрибуты тега RadLayCount

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
cntHole	INT	Число радиальных ячеек в центральном отверстии Обязательный атрибут.	[0, +∞]	_____

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
cntPell	INT	Число радиальных ячеек в топливной таблетке Обязательный атрибут.	[0, +∞]	_____
cntGap	INT	Число радиальных ячеек в газовом зазоре Обязательный атрибут.	[1, +∞]	_____
cntClad	INT	Число радиальных ячеек в оболочке Обязательный атрибут.	[1, +∞]	_____

Теги `mdlHeat`, `mdlMechanica`, `mdlGFR`, `mdlMFPR` имеют одностипные необязательные атрибуты `Use` (0 – модуль не используется в расчёте, 1 – модуль используется в расчёте) и `GridType` – тип сетки, используемой в соответствующем модуле (возможные значения: `GRD_DIST` – равномерная по радиусу сетка (в пределах одного материала), `GRD_VOL` – сетка, равномерная по объёму радиальных слоёв (в пределах одного материала)).<sup>2</sup> Если атрибут `Use` не указан, то по умолчанию модуль используется в расчёте, однако пользователю следует помнить, что одновременное использование модулей `GFR` и `MFPR` не предусмотрено, т.к. они отвечают за решение пересекающихся задач.

Модуль `mdlHeat` имеет дополнительный обязательный целочисленный атрибут `iGapGasMix`, принимающий значения 0 и 1. В случае `iGapGasMix = 1` учитывается влияние ГПД на теплопроводность газового зазора, в случае `iGapGasMix = 0` – нет.

Тег `mdlMechanica` также содержит дополнительные атрибуты: `Version`, принимающий целочисленные значения -1, 0, 1, 2, 3, соответствующие версиям механического модуля, а также `EpsGrd` и ключи `iPelSolid`, `iHardPCMI`, `iPelEpsTh`,

---

<sup>2</sup> В настоящий момент в разных модулях твёрдого кода (за исключением модуля `MFPR`) используется одинаковая радиальная сетка – сетка теплового модуля `mdlHeat`.

iPelEpsSw, iPelEpsEl, iCladEpsTh, iCladEpsSw, iCladEpsEl. Подробное описание атрибутов тега mdlMechanica представлено в таблице 5.27.

Таблица 5.26 – Атрибуты тега mdlMechanica

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Use	INT	Ключ, указывающий используется модуль в расчёте или нет: 0 – модуль не используется, 1 – модуль используется Необязательный атрибут.	0, 1	1
GridType	CHAR	Тип сетки: GRD_DIST – равномерная по радиусу (в пределах данного материала), GRD_VOL – равномерная по объёму слоёв (в пределах данного материала) Необязательный атрибут.	GRD_DIST, GRD_VOL	GRD_DIST
Version	INT	Версия механического модуля: 0 – термические деформации и деформации распухания топлива и оболочки, растрескивание таблетки, 1 – то же, что и в версии 0, и НДС тонкостенной однослойной оболочки, 2 – версия механики, моделирующая НДС многослойной оболочки, МВТО, растрескивание таблетки, 3 – версия механики, моделирующая НДС многослойных таблетки и оболочки, МВТО Обязательный атрибут.	0, 1, 2, 3	_____
EpsGrd	REAL	Точность решения механической задачи Необязательный атрибут.	(0., 0.1]	0.1



Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
iPelSolid	INT	Состояние таблетки: 0 – растрескавшаяся, 1 – монолитная Необязательный атрибут.	0, 1	1
iHardPCMI	INT	Вариант расчёта МВТО: 0 – с проскальзыванием, 1 – без проскальзывания Необязательный атрибут.	0, 1	1
iPelEpsTh	INT	Ключ, указывающий учитываются термические деформации слоёв таблетки или нет: 0 – нет, 1 – да Необязательный атрибут.	0, 1	1
iPelEpsSw	INT	Ключ, указывающий учитываются деформации набухания слоёв таблетки или нет: 0 – нет, 1 – да Необязательный атрибут.	0, 1	1
iPelEpsEl	INT	Ключ, указывающий учитываются упругие деформации слоёв таблетки или нет: 0 – нет, 1 – да Необязательный атрибут.	0, 1	0
iCladEpsTh	INT	Ключ, указывающий учитываются термические деформации слоёв оболочки или нет: 0 – нет, 1 – да Необязательный атрибут.	0, 1	1
iCladEpsSw	INT	Ключ, указывающий учитываются деформации набухания слоёв оболочки или нет: 0 – нет, 1 – да Необязательный атрибут.	0, 1	1

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
iCladEpsEl	INT	Ключ, указывающий учитываются упругие деформации слоёв оболочки или нет: 0 – нет, 1 – да Необязательный атрибут.	0, 1	0

Пример ввода тега MainBERKUT показан на рисунке 5.7.

```
<MainBERKUT TRREF0="293.0" PGAP0="0.1d+06" TRSTART="646.0"
HeatPower="RODHeater" CoolTemp="RODCooler" DPARate="DPARate"
IFUEL="MOX" ICLAD="CHS68" IGAS="He"
PUPART="0.25" RELDENS="0.95" DBSVer="SMARTDBS">
<Modules>
<mdlHeat Use="1" GridType="GRD_DIST" iGapGasMix="0">
<RadLayCount cntHole="2" cntPell="20" cntGap="4" cntClad="8"/>
</mdlHeat>

<mdlMechanica Version="2" Use="1"
GridType="GRD_DIST" EpsGrd="0.1" iPelSolid="1" iHardPCMI="0"
iPelEpsTh="1" iPelEpsSw="1" iPelEpsEl="1" iCladEpsTh="1"
iCladEpsSw="1" iCladEpsEl="1">
<RadLayCount cntHole="2" cntPell="10" cntGap="1" cntClad="4"/>
</mdlMechanica>

<mdlMFPR Use="0" GridType="GRD_VOL">
<RadLayCount cntHole="2" cntPell="4" cntGap="1" cntClad="1"/>
</mdlMFPR>

<mdlGFR Use="1">
<RadLayCount cntHole="0" cntPell="10" cntGap="1" cntClad="0"/>
</mdlGFR>
</Modules>
</MainBERKUT>
```

Рисунок 5.6 – Пример тега MainBERKUT

#### 5.4.2 Тег FuelRod

Теги FuelRod имеют атрибуты, представленные в таблице 5.28. Значение атрибута Name, если производится расчёт связанной задачи, должно обязательно совпадать с одним из имен твэлов, указанных в подтегах FuelRod тега Core, описывающего а.з. реактора. Все твэлы заведённые в теге Core, должны быть описаны в подтегах FuelRod тега BERKUT, т.е. число подтегов FuelRod тега BERKUT равно числу подтегов FuelRod тега Core.

Таблица 5.27 – Атрибуты тега FuelRod

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя твэла. Обязательный атрибут.	≤ 256 символов	_____
HeatPower	CHAR	Имя тега функции мощности энерговыделения Необязательный атрибут.	≤ 256 символов	Значение из тега MainBERKUT
CoolTemp	CHAR	Имя тега функции температуры поверхности оболочки Необязательный атрибут.	≤ 256 символов	Значение из тега MainBERKUT
DPARate	CHAR	Имя тега функции скорости накопления радиационных повреждений оболочкой Необязательный атрибут.	≤ 256 символов	Значение из тега MainBERKUT
PCOOL	CHAR	Имя тега функции давления теплоносителя Необязательный атрибут.	≤ 256 символов	Значение из тега MainBERKUT

Как отмечалось ранее, в коде БЕРКУТ твэл делится вдоль оси симметрии на ячейки произвольной высоты. В конструкции твэла выделяются зоны, содержащие группы близких по своему устройству ячеек: верхний и нижний компенсационные объёмы (не содержат топливных таблеток и заполнены только газом), верхний и нижний торцевые экраны (содержат таблетки с пониженным энерговыделением), ячейки а.з. (в таблетках ячеек а.з. протекает реакция деления и происходит основное энерговыделение). В тегах MeshSet, расположенных внутри тега FuelRod, задаются параметры указанных зон. Тег MeshSet имеет следующие атрибуты: Name – имя структурной единицы твэла (TopVol, TopFuel, ActFuel, BtmFuel, BtmVol), Count – число осевых ячеек, на которое разбивается данная область твэла, Title – название структурной единицы твэла. Все структурные элементы, кроме TopVol и BtmVol, являются обязательными. Описание атрибутов тега MeshSet приведено в таблице 5.29. Пример ввода тега MeshSet для а.з. показан на рисунке 5.8. Также пользователю дана возможность в тегах MeshSet переопределять материалы топлива и оболочки из тега MainBERKUT, что может быть актуально для торцевых зон

воспроизводства (TopFuel и BtmFuel), в которых используется другой тип топлива по сравнению с активной частью твэла.

Таблица 5.28 – Атрибуты тега MeshSet

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя структурной единицы твэла: TopVol – верхний компенсационный объём (необязательный элемент), TopFuel – верхний торцевой экран (обязательный элемент), ActFuel – активная часть (обязательный элемент), BtmFuel – нижний торцевой экран (обязательный элемент), BtmVol – нижний компенсационный объём (необязательный элемент) Обязательный атрибут.	TopVol, TopFuel, ActFuel, BtmFuel, BtmVol	_____
Count	INT	Число осевых ячеек Обязательный атрибут.	[1, +∞]	_____
Title	CHAR	Название структурной единицы твэла (произвольное) Необязательный атрибут.	≤ 256 символов	_____
IFUEL	CHAR	Материал топлива Необязательный атрибут.	UO2, MOX, UN, UPN, M_UPN	Значение из тега MainBERKUT

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
ICLAD	CHAR	Материал оболочки Необязательный атрибут.	CHS68, EK164, EP450, EP823, M_CHS68, M_EP823, M_EK164	Значение из тега MainBERKUT

```
<MeshSet Name = "ActFuel" Count="7" Title="Активная зона (АЗ)">
...
</MeshSet>
```

Рисунок 5.7 – Пример тега MeshSet

Внутри тегов MeshSet располагаются подтеги <Mesh>...</Mesh> и <Matter>...</Matter> (Matter является подтегом Mesh), в которых определяются название осевой ячейки, число одинаковых осевых ячеек с заданными параметрами, материалы топливных таблеток, материалы оболочек (если они отличаются от заданных в тегах MainBERKUT и/или MeshSet), высоты осевых ячеек, внешние диаметры центрального отверстия, таблетки, зазора и оболочки. В таблице 5.30 приведено описание используемых атрибутов для блока Mesh.

Таблица 5.29 – Описание атрибутов тега Mesh

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Title	CHAR	Название осевой ячейки (произвольное) Необязательный атрибут.	$\leq 256$ символов	_____
Repeat	INT	Число одинаковых осевых ячеек Необязательный атрибут.	$[1, +\infty]$	1

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
IFUEL	CHAR	Материал топлива Необязательный атрибут.	UO2, MOX, UN, UPN, M_UPN	Значение из тега MeshSet
ICLAD	CHAR	Материал оболочки Необязательный атрибут.	CHS68, EK164, EP450, EP823, M_CHS68, M_EP823, M_EK164	Значение из тега MeshSet

В таблице 5.31 приведено описание используемых атрибутов для блока Matter.

Таблица 5.30 – Описание атрибутов тега Matter

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Height	REAL	Высота осевой ячейки, м Обязательный атрибут.	(0., +∞]	_____
dmHole	REAL	Диаметр центрального отверстия, м Обязательный атрибут.	[0., +∞]	_____
dmPellet	REAL	Внешний диаметр таблетки, м Обязательный атрибут.	[0., +∞]	_____
dmGap	REAL	Внешний диаметр зазора, м Обязательный атрибут.	(0., +∞]	_____
dmCladding	REAL	Внешний диаметр оболочки, м Обязательный атрибут.	(0., +∞]	_____

Также при необходимости пользователь может задать индивидуальную радиальную сетку для каждого блока осевых ячеек, для этого внутри тега MeshSet необходимо завести подтеги <mdlHeat> <RadLayCount>... </RadLayCount> </mdlHeat> с указанием количества радиальных ячеек в центральном отверстии, таблетке, газовом зазоре и оболочке (смотреть рисунок 5.7).

Пример тега <Mesh> для а.з. приведен на рисунке 5.9.

```
<Mesh Title = "(2-6) of (7)" Repeat="5" IFUEL="UO2" ICLAD ="CHS68">  
  <Matter Height = "0.1"  
    dmHole ="1.8d-03" dmPellet ="5.95d-03" dmGap ="6.1d-03" dmCladding ="6.9d-03"/>  
</Mesh>
```

Рисунок 5.8 – Пример тега Mesh

В данном случае использован атрибут Repeat для задания 5 одинаковых осевых ячеек. Замечание: суммарное число ячеек, заведённых в тегах Mesh, должно быть равно количеству осевых ячеек, указанному в атрибуте Count тега MeshSet.

#### 5.4.3 Тег AbsorbingRod

Теги AbsorbingRod имеют атрибуты и подтеги, идентичные тегам FuelRod, которые представлены в п. 5.5.2. Значения атрибутов Name тегов AbsorbingRod, если производится расчёт связанной задачи, должны обязательно совпадать с одним из имен пэлов, указанных в подтегах AbsorbingRod тега Core, описывающего а.з. реактора. Все пэлы, заведённые в теге Core, должны быть описаны в подтегах AbsorbingRod тега BERKUT. Для пэлов в качестве материала сердечника необходимо использовать карбид бора (IFUEL = B4C), который доступен для моделирования только при использовании базы данных SmartDB (DBSVer = SMARTDBS).

#### 5.4.4 Тег FuncBERKUT

В теге FuncBERKUT задаются зависимости мощности энерговыделения, температуры поверхности оболочки, скорости накопления оболочкой радиационных повреждений и внешнего давления от высоты а.з. и времени (теги RODHeater, RODCooler, DPARate и RODPress). Функции по координате и времени определяются отдельно. Итоговые значения мощности энерговыделения, температуры поверхности оболочки, скорости накопления оболочкой радиационных повреждений и внешнего давления

вычисляются как произведение  $F(z,t) = G(z) \times U(t)$ , где  $G(z)$  – функция координаты,  $U(t)$  – функция времени, заданные во входном файле. Теги RODHeater, RODCooler, DPARate и RODPress имеют одинаковые атрибуты, которые представлены в таблице 5.32.

Рассмотрим пример тега RODHeater (теги DPARate, RODPress и RODCooler заводятся аналогично), используемого в тестовой задаче, для которой функции распределения мощности энерговыделения по высоте а.з. и во времени имеют вид, представленный на рисунке 5.10. Пространственная и временная составляющие функции энерговыделения определяются в тегах <Space> и <Time>. Атрибуты тегов <Space> и <Time> представлены в таблицах 5.33 и 5.34. Пример тега RODHeater представлен на рисунке 5.11.

Таблица 5.31 – Атрибуты тегов DPARate, RODHeater, RODCooler, RODPress

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя функции Обязательный атрибут.	≤ 256 символов	_____
Time	CHAR	Имя тега временной составляющей Обязательный атрибут.	≤ 256 символов	_____
Space	CHAR	Имя тега пространственной составляющей Обязательный атрибут.	≤ 256 символов	_____
Class	CHAR	Класс функции: TFun2D – функция, зависящая от координаты и времени, с постоянным пространственным профилем; TFun2DZLin – функция, зависящая от координаты и времени, с меняющимся профилем Обязательный атрибут.	TFun2D, TFun2DZLin	_____

Таблица 5.32 – Атрибуты тега Space

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию



Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
NPoint	INT	Число заданных точек: значение -1 соответствует автоматическому определению числа заданных точек Обязательный атрибут.	-1, [1, +∞]	_____
Coord	CHAR	Имя таблицы, в которой указаны координаты Необязательный атрибут.	≤ 256 символов	Coord
Value	CHAR	Имя таблицы, в которой указаны значения функции Необязательный атрибут.	≤ 256 символов	Value
Class	CHAR	Класс функции: TFunOfX – функция одной переменной, значения координат и функции задаются в разных тегах; TXYRow – функция одной переменной, значения координат и функции задаются в одном теге Value в виде столбца Обязательный атрибут	TFunOfX, TXYRow	_____

Таблица 5.33 – Атрибуты тега Time

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
--------------	--------------	------------------------------	------------------	-----------------------

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
NPoint	INT	Число заданных точек: значение -1 соответствует автоматическому определению числа заданных точек Обязательный атрибут.	-1, [1, +∞]	_____
Coord	CHAR	Имя таблицы, в которой указаны координаты Необязательный атрибут.	≤ 256 символов	Coord
Value	CHAR	Имя таблицы, в которой указаны значения функции Необязательный атрибут.	≤ 256 символов	Value
Class	CHAR	Класс функции: TFunOfX – функция одной переменной, значения координат и функции задаются в разных тегах; TXYRow – функция одной переменной, значения координат и функции задаются в одном теге Value в виде столбца Обязательный атрибут.	TFunOfX, TXYRow	_____

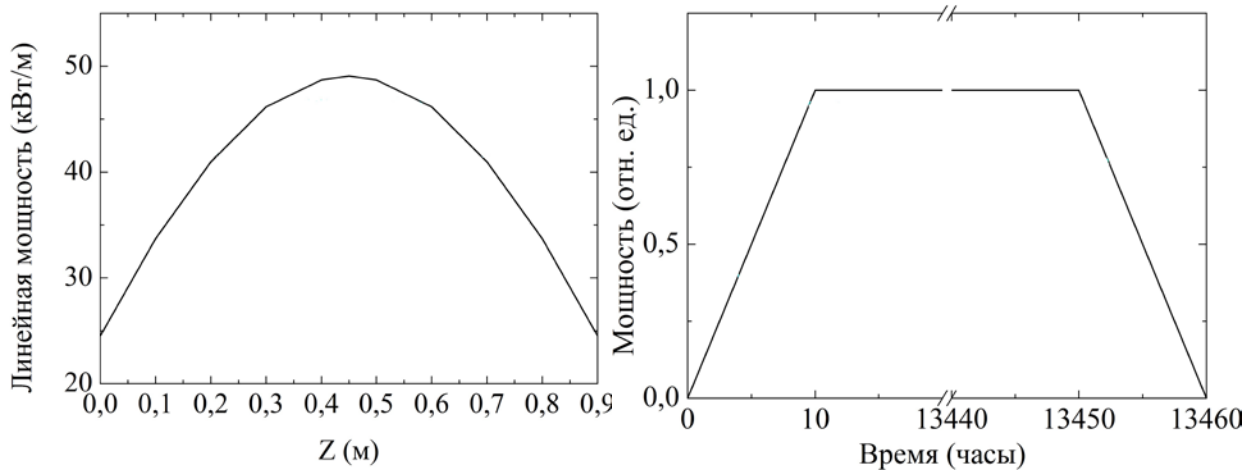


Рисунок 5.9 – Распределения мощности энерговыделения по высоте а.з. (слева) и во времени (справа)

```

<FuncBERKUT>
  <RODHeater Class="TFunc2D" Name="RODHeater" Time="Time" Space="Space">
    <Space NPoint="11" Class="TFunOfX" Coord="Coord" Value="Value">
      <Coord Value="0.0" Base="0.0" Unit="1.0">
        0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.45 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9
      </Coord>
      <Value Value="0.0" Base="0.0" Unit="1000.0">
        24.53 33.70 40.96 46.15 48.71 49.09 48.71 46.15 40.96 33.70 24.53
      </Value>
    </Space>
    <Time NPoint="4" Class="TFunOfX" Coord="Coord" Value="Value">
      <Coord Value="0.0" Base="0.0" Unit="3600">
        0.0 10 13450 13460
      </Coord>
      <Value Value="0.0" Base="0.0" Unit="1.0">
        0.0 1.0 1.0 0.0
      </Value>
    </Time>
  </RODHeater>
</FuncBERKUT>

```

Рисунок 5.10 – Пример тегов FuncBERKUT и RODHeater

В представленном на рисунке 5.11 примере значения функции от координаты задаются в 11 точках, значения функции от времени – в 4 точках. Значения пространственных и временных координат заводятся в тегах Coord, значения функций, соответствующие заданным координатам, – в тегах Value. Между заданными точками производится линейная интерполяция. В данном случае временная и пространственная составляющие являются функциями класса TFunOfX, а параметр NPoint задаётся пользователем. В случае, если атрибут NPoint задать равным -1, то число точек будет определяться автоматически. При этом учитываются только парные точки.

Теги Coord и Value имеют атрибуты Value, Base и Unit. Атрибут Value представляет собой значение переменной по умолчанию. Значение атрибута Base

прибавляется к заданным значениям координат и функций, значение атрибута Unit умножается, то есть итоговое значение вычисляется как  $Unit \times (Coord[i] + Base)$  или  $Unit \times (Value[i] + Base)$  (таблицы 5.35 и 5.36). Все значения функций и координат задаются в системе СИ: высота в [м], время в [с], линейная мощность энерговыделения в [Вт/м], температура в [К], скорость накопления повреждающей дозы в [сна/с].

Таблица 5.34 – Атрибуты тега Coord

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Value	REAL	Значение, используемое по умолчанию, если данные внутри тега Coord не удалось корректно зачитать Необязательный атрибут.	[0., +∞]	0.0
Base	REAL	Коэффициент, прибавляемый к значению координаты Необязательный атрибут.	[0., +∞]	0.0
Unit	REAL	Коэффициент, на который умножается значение координаты Необязательный атрибут.	[0., +∞]	1.0

Таблица 5.35 – Атрибуты тега Value

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Value	REAL	Значение, используемое по умолчанию, если данные внутри тега Value не удалось корректно зачитать Необязательный атрибут.	[0., +∞]	0.0
Base	REAL	Коэффициент, прибавляемый к значению функции Необязательный атрибут.	[0., +∞]	0.0
Unit	REAL	Коэффициент, на который умножается значение функции Необязательный атрибут.	[0., +∞]	1.0

Возможен вариант задания временной и пространственной составляющих через класс функций TXYRow. В этом случае в теге Coord определяются только атрибуты Value, Base и Unit, сами же значения координат заводятся в теге Value вместе со значениями соответствующих функций в виде столбца из пар точек «координата–значение функции». Пример такого ввода данных представлен на рисунке 5.12.

```

<RODHeater Class="TFun2D" Name="RODHeater" Time="Time" Space="Space">
  <Time NPoint ="-1" Class="TXYRow" Coord="Coord" Value="Value">
    <Coord Value="0.0" Base="0.0" Unit="3600"/>
    <Value Value="0.0" Base="0.0" Unit="48000">
      0.0;      0.0;
      4.0;      0.66;
      8.0;      0.66;
      24.0;     1.0;
      10938.0;  1.0;
      10944.0;  0.0;
      10948.0;  0.66;
      10952.0;  0.66;
      10968.0;  1.0;
      14202.0;  1.0;
      14208.0;  0.0;
    </Value>
  </Time>
  <Space NPoint ="-1" Class="TXYRow" Coord="mmCoord" Value="Value">
    <mmCoord Value="0.0" Base="0.0" Unit="1.0e-3"/>
    <Value Value="0.0" Base="0.0" Unit="1.0">
      856.9,  0.54319
      787.03, 0.65854
      716.65, 0.76118
      650.82, 0.84451
      595.13, 0.90244
      556.65, 0.93445
      510.57, 0.96646
      460.949, 0.9873
      420.949, 0.99695
      377.911, 1
      331.329, 0.99543
      289.81, 0.9873
      248.29, 0.96799
      202.22, 0.93598
      159.18, 0.89888
      117.66, 0.85417
      91.84, 0.81758
      65, 0.78354
      36.14, 0.74035
      12.34, 0.70528
      -3.86, 0.67785
      -6.9, 0.24695
      -40.82, 0.22256
      -101.08, 0.17124
      -158.8, 0.12144
      -204.87, 0.083333
    </Value>
  </Space>

```

Рисунок 5.11 – Пример тега RODHeater

Если необходимо задать различные функции  $G(z)$  и  $U(t)$  в различные промежутки времени, то необходимо использовать класс функций – TFun2DSet. В этом случае тег верхнего уровня, например, RODCooler будет иметь атрибуты, представленные в таблице 5.37. Внутри тега RODCooler будет располагаться набор подтегов с именем, соответствующим значению атрибута Element. Каждый из этих подтегов представляет собой функции  $F(z,t)$ , заданные на ограниченном временном интервале  $[t_1, t_2]$ . Для этого внутри них задаются подтеги TimeStart и TimeStop, имеющие атрибуты представленные в таблице 5.38. В остальном алгоритм задания функции  $F(z,t)$  остаётся неизменным.

Таблица 5.36 – Атрибуты тегов DPARate, RODHeater, RODCooler, RODPress в случае использования класса функций TFun2DSet

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Class	CHAR	Класс функции Обязательный атрибут.	TFun2DSet	_____
Name	CHAR	Имя функции Обязательный атрибут.	$\leq 256$ символов	_____
Element	CHAR	Имя элементов, составляющих набор функций Обязательный атрибут.	$\leq 256$ символов	_____

Таблица 5.37 – Атрибуты тегов TimeStart и TimeStop

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Value	REAL	Значение временной границы Обязательный атрибут.	$[0., +\infty]$	_____
Base	REAL	Коэффициент, прибавляемый к значению временной границы Необязательный атрибут.	$[0., +\infty]$	0.0

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Unit	REAL	Коэффициент, на который умножается значение временной границы Необязательный атрибут.	[0., +∞]	1.0
Name	CHAR	Имя временного интервала Необязательный атрибут.	≤ 256 символов	0

В задачах автономного расчёта поведения твэлов РУ имеется необходимость задания функции постепенного снижения температуры оболочки до заданного значения, например, температуры теплоносителя на входе в канал ТВС или комнатной температуры. Для такого рода задач реализован класс функций TFun2DZLin, имеющий те же атрибуты и алгоритм задания, что и класс TFun2D, описанный выше. При использовании класса TFun2DZLin задаются пространственные составляющие функции  $F(z,t)$  в моменты времени TimeStart и TimeStop, а затем производится линейная интерполяция по времени между соответствующими пространственными точками.

Пример ввода функций классов TFun2DSet и TFun2DZLin представлен на рисунках 5.13 и 5.14.

```
<RODCooler Class="TFun2DSet" Name="CoolingFun" Element="RODCooler">
  <!--Nominal regime-->
  <RODCooler Class="TFun2D" Name="RODCooler" Time="Time" Space="Space">

    <TimeStart Base="0.0" Value="0.0" Unit="86400.0" Name="OnPower"/>
    <TimeStop Base="0.0" Value="558.9" Unit="86400.0" Name="OnPower"/>

    <Space NPoint ="23" Class="TFunOfX" Coord="Coord" Value="Value">
      <Coord Value="0.0" Base="0.0" Unit="1.0">
        0.115 0.345 0.6 0.725 0.795 0.865 0.935 1.005 1.065 1.14
        1.24 1.34 1.44 1.54 1.64 1.74 1.84 1.94 2.025 2.095
        2.165 2.235 2.305
      </Coord>
      <Value Value="0.0" Base="0.0" Unit="1.0">
646.0 646.0 646.0 655.08813 660.17523 666.80585 675.12695
686.50702 698.34656 714.89471 739.95605 766.71826 793.67071 819.25903
842.25159 861.82501 877.10498 888.0802 894.36084 897.74976 898.71283
899.02582 899.31476
      </Value>
    </Space>
    <Time NPoint="2" Class="TFunOfX" Coord="Coord" Value="Value">
      <Coord Value="0.0" Base="0.0" Unit="86400">
        0.0 558.9
```

```

    </Coord>
    <Value Value="0.0" Base="0.0" Unit="1.0">
      1.0 1.0
    </Value>
  </Time>
</RODCooler>
<!--Cooling-->
<RODCooler Class="TFun2DZLin" Name="RODCooler" Space="SpaceAtStart"
Time="SpaceAtStop">

  <TimeStart Base="0.0" Value="558.9" Unit="86400.0" Name="Cooling"/>
  <TimeStop Base="0.0" Value="559.3" Unit="86400.0" Name="Cooling"/>

```

Рисунок 5.12 – Пример тега RODCooler. Часть 1

```

<SpaceAtStart NPoint="23" Class="TFunOfX" Coord="Coord" Value="Value">
  <Coord Value="0.0" Base="0.0" Unit="1.0">
    0.115 0.345 0.6 0.725 0.795 0.865 0.935 1.005 1.065 1.14
    1.24 1.34 1.44 1.54 1.64 1.74 1.84 1.94 2.025 2.095
    2.165 2.235 2.305
  </Coord>
  <Value Value="0.0" Base="0.0" Unit="1.0">
646.0 646.0 646.0 655.08813 660.17523 666.80585 675.12695
686.50702 698.34656 714.89471 739.95605 766.71826 793.67071 819.25903
842.25159 861.82501 877.10498 888.0802 894.36084 897.74976 898.71283
899.02582 899.31476
  </Value>
</SpaceAtStart>
<SpaceAtStop NPoint="2" Class="TFunOfX" Coord="Coord" Value="Value">
  <Coord Value="0.0" Base="0.0" Unit="86400">
    0.0 2.305
  </Coord>
  <Value Value="0.0" Base="0.0" Unit="1.0">
    646.0 646.0
  </Value>
</SpaceAtStop>
</RODCooler>
</RODCooler>

```

Рисунок 5.13 – Пример тега RODCooler. Часть 2

## 5.5 Тег <Neutronics>...</Neutronics>

Тег Neutronics состоит из тегов-подблоков: <Geometry>, <CommonInformation>, <Autonomous work>, <SN\_method>, <Interpolation> и <PrepareConst>.

### 5.5.1 Тег <Geometry>

В теге <Geometry> описаны такие параметры, как расчётная сетка по высоте а.з., описание СУЗ, их геометрические размеры, скорость ввода и т.д. Тег <Geometry> имеет как отдельные атрибуты, так и подтеги. В таблице (Таблица 5.39) приведены список атрибутов тега <Geometry> и их описание.



Таблица 5.38 – Атрибуты тега Geometry

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
XYDimension	REAL	Размер ТВС под ключ, см. Обязательный атрибут.	[1.0,20.0]	_____
Bucking_construction_Below	INT	Число нижних слоёв с опорными конструкциями а.з. Обязательный атрибут. Указанное значение не может превышать количества элементов в теге LayersThickness.	[0,N], где N – число элементов в теге LayersThickness	_____
Bucking_construction_Up	INT	Число верхних слоёв с опорными конструкциями а.з. Обязательный атрибут. Указанное значение не может превышать количества элементов в теге LayersThickness.	[0,N], где N – число элементов в теге LayersThickness	_____
TVSNames_for_boundary_conditions	INT	Число, обозначающее тип фиктивных ТВС, которые на картограмме в теге LoadMap используются для постановки граничного условия. Обязательный атрибут.	Любое значение из тега LoadMap	_____

В таблице (5.40) приведён список подтегов тега <Geometry>.

Таблица 5.39 – Список подтегов тега <Geometry>

Имя блока	Описание
LoadMap	<p>Картограмма загрузки (задаётся в виде правильного шестигранника). Пример картограммы приведён на рисунке (Рисунок 5.15).</p> <p>Обязательный тег.</p>
ListTVSNames	<p>Одномерный массив типа INTEGER, размера N, где N – число типов ТВС. В массив записываются все номера типов ТВС, представленные в картограмме LoadMap (кроме «0» и указанного в теге TVSNames_for_boundary_conditions).</p> <p>Пример блока приведён на рисунке (Рисунок 5.16).</p> <p>Обязательный тег.</p>
TVSNames	<p>Одномерный массив типа CHARACTER размера N, где N – число типов ТВС. В массиве записаны имена типов ТВС. Пример блока приведён на рисунке (Рисунок 5.17).</p> <p>Обязательный тег.</p>
ListSUZNames	<p>Одномерный массив типа INTEGER, где записаны типы ТВС с РО СУЗ. Пример блока приведён на рисунке (Рисунок 5.18). Обязательный тег, если в расчётной модели присутствуют РО СУЗ.</p>

Имя блока	Описание
TVSCalculationScheme	<p>Одномерный массив типа INTEGER, задающий представление каждого типа ТВС в расчете с применением диффузионной опции. “1” соответствует гомогенному представлению, “7” – гетерогенному.</p> <p>Необязательный тег. По умолчанию для всех ТВС используется гомогенное представление.</p>
WidthAcrossFlatsTVS	<p>Размер центральной ячейки при использовании гетерогенного представления. Необязательный тег.</p> <p>По умолчанию рассчитывается как <math>H/\sqrt{7}</math> (условие равенства объемов семи ячеек между собой). При расчете размера центральной ячейки для ТВС с РО СУЗ приоритет отдается значению, указанному в атрибуте WidthAcrossFlats тега ControlRods.</p>
ListTVSNames_not_in_THstructure	<p>Одномерный массив типа INTEGER, где записаны типы ТВС, не входящих в теплогидравлическую структуру, т.е. не моделирующихся в коде HYDRA, т.к. в них не протекает теплоноситель. В массиве записаны номера типов таких ТВС. Пример блока приведен на рисунке (Рисунок 5.19).</p> <p>Обязательный тег, если есть ячейки, которые не участвуют в теплогидравлическом расчете.</p>

Имя блока	Описание
ListTVSNames_not_in_BERKUTstructure	<p>Одномерный массив типа INTEGER, где записаны типы ТВС, не входящих в топливную структуру, т.е. не моделирующихся в модуле BERKUT, т.к. в них нет топлива. В массиве записаны номера типов таких ТВС. Пример блока приведён на рисунке (Рисунок 5.20).</p> <p>Обязательный тег, если есть каналы без твэлов.</p>
LayersThickness	<p>Толщины каждого слоя по высоте (в см). Массив положительных рациональных чисел размером не более 100 элементов. Каждый элемент задает толщину соответствующего слоя. Число элементов NTZ определяется автоматически, при чтении данного массива. Пример блока приведён на рисунке (Рисунок 5.21).</p> <p>Обязательный тег.</p>
LoadCore_Height	<p>Массив типа INTEGER размерности (NTZ,N), где NTZ – число слоёв по высоте, N – число типов ТВС. По столбцам типы перечислены строго в том же порядке, что и в массиве TVSNames. В данном блоке записывается картограмма по высоте, где для каждого типа ТВС представлено высотное распределение типов материалов. Нижняя строка соответствует первому (то есть самому нижнему) слою по высоте, а верхняя - последнему (то есть верхнему слою). Пример блока приведён на рисунке (Рисунок 5.22). Список материалов</p>

Имя блока	Описание
	<p>начинается с 1 и нумеруется с шагом единица до последнего материала. Под «материалом» подразумевается, например: топливо, конструкционные материалы, теплоноситель и т. д.</p> <p>Обязательный тег.</p>
Material	<p>Используется для задания гетерогенного представления материалов. Необязательный тег.</p> <p>Пример блока приведён на рисунке (Рисунок 5.24).</p>
ControlRods	<p>Этот блок встречается столько раз, сколько типов ТВС с РО СУЗ выделено в а.з. Список атрибутов этого блока представлен в таблице (Таблица 5.43).</p> <p>Пример блока приведён на рисунке (Рисунок 5.25).</p> <p>Обязательный тег, если есть РО СУЗ.</p>

<LoadMap>

```

77 77 77 77 77 77 77 77 77 77 77 77 77 77 77
77 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 77
77 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 77
77 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 56 77
77 56 56 56 56 56 73 73 73 73 73 73 73 73 56 56 56 56 77
77 56 56 56 56 73 73 72 72 72 72 72 72 72 73 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 72 71 71 71 9 71 71 71 71 72 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 71 9 12 12 12 12 12 12 9 71 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 9 12 12 12 12 12 12 12 9 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 12 12 12 12 11 8 11 12 12 12 12 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 12 12 12 8 11 11 11 11 8 12 12 12 9 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 9 12 12 11 11 11 11 8 11 11 11 12 12 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 12 12 8 11 11 5 11 11 5 11 11 8 12 12 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 12 12 11 11 8 11 11 4 11 11 8 11 11 12 12 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 9 12 12 11 11 11 4 11 11 5 11 11 8 12 12 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 12 12 8 11 5 11 11 5 11 11 5 11 8 12 12 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 9 12 12 11 11 11 4 11 11 4 11 11 11 12 12 9 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 12 12 11 11 8 11 11 4 11 11 8 11 11 12 12 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 12 12 8 11 11 5 11 11 5 11 11 8 12 12 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 12 12 11 11 11 11 8 11 11 11 12 12 9 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 9 12 12 12 8 11 11 11 11 8 12 12 12 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 12 12 12 11 8 11 12 12 12 12 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 9 12 12 12 12 12 12 9 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 71 71 9 12 12 12 12 12 9 71 71 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 72 72 71 71 71 71 9 71 71 71 72 72 73 56 56 56 77
77 56 56 56 73 73 72 72 72 72 72 72 73 73 56 56 56 56 77
77 56 56 56 73 73 73 73 73 73 73 73 56 56 56 56 56 77
77 56 56 56 73 73 73 73 73 73 73 73 56 56 56 56 56 77
77 56 56 56 73 73 73 73 73 73 73 73 56 56 56 56 56 77
77 56 56 56 73 73 73 73 73 73 73 73 56 56 56 56 56 77
77 56 56 56 73 73 73 73 73 73 73 73 56 56 56 56 56 77
77 56 56 56 73 73 73 73 73 73 73 73 56 56 56 56 56 77
77 77 77 77 77 77 77 77 77 77 77 77 77 77 77

```

```
</LoadMap>
```

Рисунок 5.14 – Пример подтега LoadMap тега <Geometry>

```
<ListTVSNames>  
  56 73 72 71 11 12 8 4 5 9  
</ListTVSNames>
```

Рисунок 5.15 – Пример подтега ListTVSNames тега <Geometry>

```
<TVSNames>  
  BO BVO_1 BVO_2 BVO_3 HS_CB HS_PB HS_ROKR HS_ROAR HS_ROAZ PFR  
</TVSNames>
```

Рисунок 5.16 – Пример подтега TVSNames тега <Geometry>

```
<ListSUZNames>  
4 5 8  
</ListSUZNames>
```

Рисунок 5.17 – Пример подтега ListSUZNames тега <Geometry>

```
<ListTVSNames_not_in_THstructure>  
56  
</ListTVSNames_not_in_THstructure>
```

Рисунок 5.18 – Пример подтега ListTVSNames\_not\_in\_THstructure тега <Geometry>

```
<ListTVSNames_not_in_BERKUTstructure>  
  73 72 71 9  
</ListTVSNames_not_in_BERKUTstructure>
```

Рисунок 5.19 – Пример подтега ListTVSNames\_not\_in\_BERKUTstructure тега <Geometry>

```
<LayersThickness>  
  10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10.  
  10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10.  
  10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10.  
</LayersThickness>
```

Рисунок 5.20 – Пример подтега LayersThickness тега <Geometry>

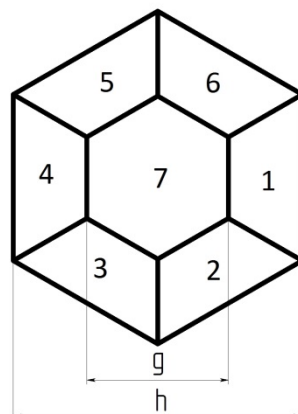
```

<LoadCore_Height>
29 28 28 28 30 30 30 30 30 30
29 28 28 28 30 30 30 30 30 30
29 28 28 28 30 30 30 30 30 30
29 28 28 28 30 30 30 30 30 30
29 28 28 28 12 14 24 27 18 28
29 28 28 28 12 14 24 27 18 28
29 28 28 28 12 14 24 27 18 28
29 28 28 28 1 2 7 10 4 28
29 28 28 28 1 2 7 10 4 28
29 28 28 28 1 2 7 10 4 28
29 28 28 28 1 2 7 10 4 28
29 28 28 28 1 2 7 10 4 28
29 28 28 28 1 2 7 10 4 28
29 28 28 28 1 2 7 10 4 28
29 28 28 28 1 2 7 10 4 28
29 28 28 28 1 2 7 10 4 11
29 28 28 28 1 2 7 10 4 11
29 28 28 28 1 2 7 10 4 11
29 28 28 28 11 13 20 25 16 11
29 28 28 28 11 13 20 25 16 11
29 28 28 28 11 13 20 25 16 11
29 28 28 28 11 13 20 25 16 11
29 28 28 28 11 13 20 25 16 11
29 28 28 28 11 13 20 25 16 11
29 28 28 28 11 13 20 25 16 11
29 28 28 28 11 13 20 25 16 11
29 28 28 28 30 30 30 30 30 30
29 28 28 28 30 30 30 30 30 30
29 28 28 28 30 30 30 30 30 30
29 28 28 28 30 30 30 30 30
</LoadCore_Height>

```

Рисунок 5.21 – Пример подтега LoadCore\_Height тега <Geometry>

Атрибут Name тега Material (Таблица 5.41) принимает значение номера нуклидного состава, для которого требуется задать гетерогенное представление. Тег Material содержит семь подтегов MaterialList. Атрибут Name тега MaterialList принимает значение номера нуклидного состава (Таблица 5.42), порядок ввода значений в соответствии с расположением ячеек представлен на рисунке 5.23.



h – размер «под ключ» сборки, g – размер «под ключ» центральной ячейки

Рисунок 5.22 – Порядок ввода номеров нуклидных составов для определённого высотного слоя сборки

```
<LoadCore_Height>
  28 12 20 25 16 28
  28 2  7 10 4  28
  28 2  7 10 4  28
  28 2  7 10 4  28
  28 14 24 27 19 28
</LoadCore_Height>
<Material Name = "7">
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "37"/>
</Material>
<Material Name = "10">
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "37"/>
</Material>
<Material Name = "4">
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "37"/>
</Material>
```

Рисунок 5.23 – Пример подтега Material тега <Geometry>

```
<ControlRods
Name = "AZ"
WidthAcrossFlats = "8.7"
MinDepth = "80.0"
MaxDepth = "190."
FLAG_position = "DOWN">
<Composition>
  33 38
</Composition>
<HomogeneousComposition>
  103 103 103 76 25 25 25 25 76 76 91
  103 103 103 76 26 26 26 26 76 76 91
</HomogeneousComposition>
<HeightComposition>
```



```

20. 19. 1. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10.
</HeightComposition>
<NumberTVSwithSYZ>
35 20 32 1 23 29 26
</NumberTVSwithSYZ>
<DepthOfImersion>
80. 80. 80. 80. 80. 80. 80.
</DepthOfImersion>
</ControlRods>

```

Рисунок 5.24 – Пример задания тега ControlRods

Таблица 5.40 – Атрибуты тега Material

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	INT	Номер нуклидного состава. Необязательный атрибут.	[0,N], где N-общее число материалов, заданное в теге MaterialTypesNumber	_____

Таблица 5.41 – Атрибуты подтега MaterialList тега Material

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	INT	Номера нуклидных составов. Обязательный тег, если присутствует тег Material.	[0,N], где N-общее число материалов, заданное в теге MaterialTypesNumber	_____

Таблица 5.42 – Список атрибутов подтега ControlRods тега <Geometry>

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Тип СУЗ. Обязательный	64 символа. Имена задаются	_____

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
		атрибут.	пользователем	
MinDepth	REAL	Минимальная глубина погружения, см. Обязательный атрибут.	[0,S], где S – сумма значений, заданных в теге LayersThickness	_____
MaxDepth	REAL	Максимальная глубина погружения, см. Обязательный атрибут.	[0,S], где S – сумма значений, заданных в теге LayersThickness	_____
FLAG_position	CHAR	Флаг, который показывает откуда вводится СУЗ – сверху или снизу а.з.. Обязательный атрибут.	UP, DOWN	_____
ConceptOfCells	CHAR	Гетерогенное либо гомогенное представление стержня СУЗ. В первом случае стержень СУЗ представляется центральной ячейкой, а во втором – семью ячейками.  Необязательный атрибут.	heterogeneous, homogeneous	heterogeneous
DepthImersion	REAL	Глубина погружения группы СУЗ, см. Необязательный атрибут.	[0,S], где S – сумма значений, заданных в теге LayersThickness	0.0

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
WidthAcrossFlats	REAL	<p>«Размер под ключ» (в см) центральной ячейки для каждой изборок с РО СУЗ. Данное значение распространяется на все сборки, которые включены в подтег NumberTVSwithSYZ. Рациональное число, лежащее в интервале (0, Н), где Н – «размер под ключ» сборки.</p> <p>Необязательный атрибут.</p>	[0.1,Н-0.1]	Н/sqrt(7.) (условие равенства объемов семи ячеек между собой)

Список подтегов тега ControlRods описан в таблице (Таблица 5.44).

Таблица 5.43 – Подтеги тега ControlRods

Имя блока	Описание
Composition	<p>Одномерный массив типа INTEGER, где записаны номера нуклидных составов для гетерогенного представления органов СУЗ. Количество элементов не превышает 100. Элементы массива лежат в диапазоне [1,N], где N-общее число материалов, заданное в теге MaterialTypesNumber. Каждый элемент соответствует аксиальному слою органов СУЗ.</p> <p>Обязательный тег, если используется гетерогенное представление для данной ТВС или для РО СУЗ задано значение homogeneous.</p>

HomogeneousComposition	<p>Двумерный массив типа INTEGER, где записаны номера нуклидных составов для гомогенного представления органов СУЗ. Число столбцов равно числу аксиальных слоев, заданных в теге LayersThickness. Элементы массива лежат в диапазоне [1,N], где N-общее число материалов, заданное в теге MaterialTypesNumber. С использованием данного массива осуществляется пересчет гомогенизированных концентраций с учетом движения органов СУЗ. Каждая строка соответствует аксиальному слою органов СУЗ. Число строк не превышает 100. Каждый столбец соответствует аксиальному слою расчетной модели. Обязательный тег, если используется гомогенное представление для данной ТВС и в теге ConceptOfCells для РО СУЗ не задано значение homogeneous..</p>
HeightComposition	<p>Одномерный массив с положительными элементами типа REAL, где указана толщина (в см) каждого слоя, описанного в теге Composition/HomogeneousComposition в аналогичном порядке. Элементы массива лежат в диапазоне [1,200]. Количество элементов в данном теге равно количеству элементов в теге Composition. Сумма значений в массиве не должна превышать S, где S – сумма значений, заданных в теге LayersThickness.</p> <p>Обязательный тег.</p>
NumberTVSwithSYZ	<p>Одномерный массив типа INTEGER, длина не превышает общего числа ТВС. В массиве задаются номера сборок в спиральной нумерации (смотреть рисунок 5.26), в которых расположены органы СУЗ. Значения в диапазоне [1,N], где N – количество элементов, заданных в теге LoadMap.</p> <p>Обязательный тег.</p>
DepthOfImersion	<p>Глубина (в см) погружения каждого из заданных в теге NumberTVSwithSYZ органов СУЗ. Значение из диапазона [0,S], где S – сумма значений, заданных в теге LayersThickness.</p> <p>Обязательный тег.</p>

После обработки тега LoadMap происходит автоматическая нумерация сборок, пример которой представлен на рисунке (Рисунок 5.26). Исходя из логики нумерации, пользователь должен перед началом расчёта определить номера сборок со стержнем СУЗ.

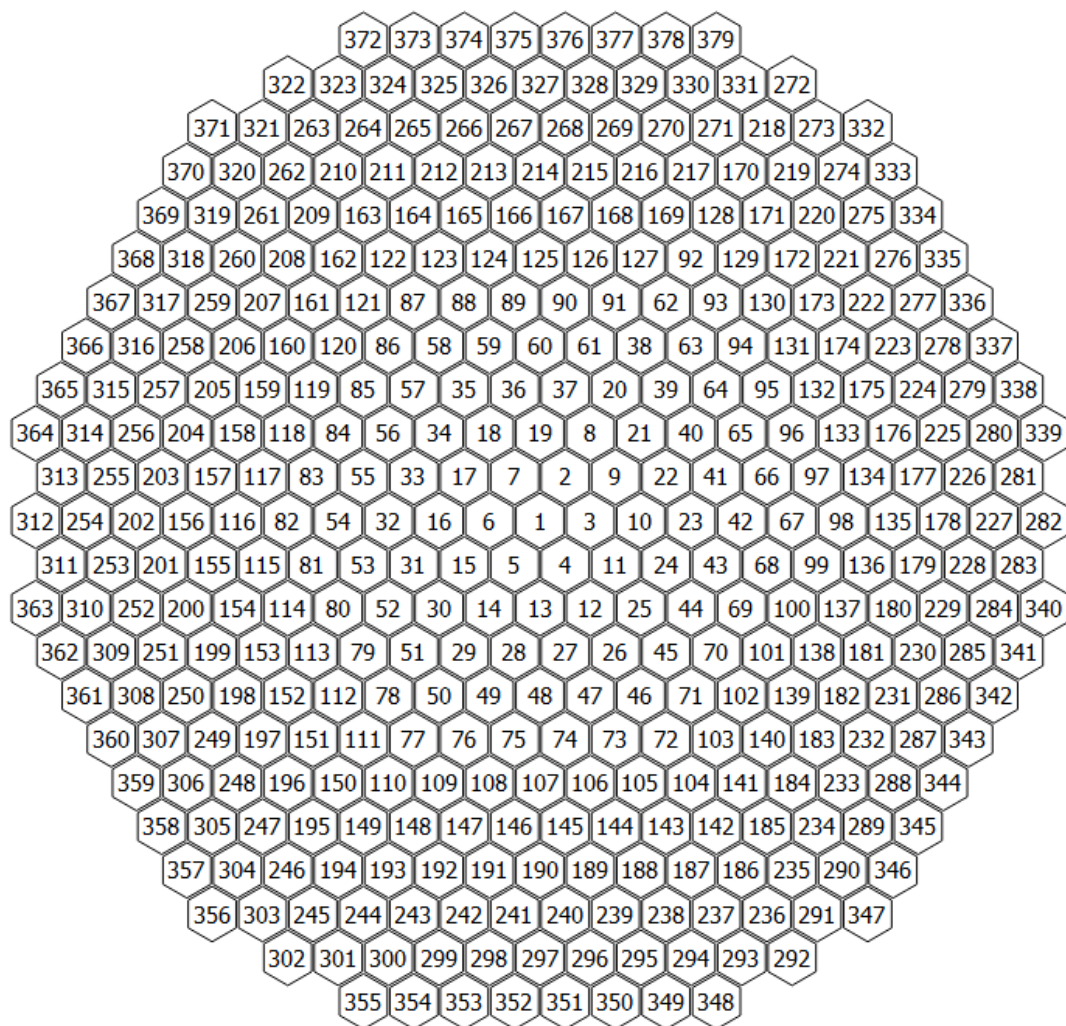


Рисунок 5.25 – Спиральная нумерация картограммы

### 5.5.2 Тег <CommonInformation>

В теге <CommonInformation> описаны некоторые общие параметры, такие как число групп нейтронов, точность расчёта, шаг по времени, полная мощность реактора и др. (Таблица 5.45 и Таблица 5.46).

Таблица 5.44 – Атрибуты тега CommonInformation

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
TotalPower	REAL	Полная тепловая мощность, МВт. Обязательный атрибут.	[0,2800]	_____
NumberEnergetic Groups	INT	Число энергетических групп. Необязательный атрибут	26,28	26
TimeStep	REAL	Шаг по времени для переходного процесса, с. Обязательный атрибут.	[10 <sup>-3</sup> , 10 <sup>-1</sup> ]	_____
TimeStepBase	REAL	Шаг по времени нейтроники на время установления, с. Обязательный атрибут.	[10 <sup>-3</sup> , 10]	_____
NumberElements	INT	Число элементов в массиве ядерных концентраций. Обязательный атрибут.	[1,127]	_____
MaterialTypesNumber	INT	Число материалов в картограмме по высоте. Также число строк в массиве ядерных концентраций. Обязательный атрибут.	[1,20000]	_____
FLAG_RESEAU	INT	Флаг, указывающий на то, следует ли воспользоваться программой RESEAU для подготовки констант. Необязательный атрибут.	0,1	0
MinNumIter	INT	Минимальное число интераций для режима установления. (Задание этого атрибута связано с некоторой немонотонностью процесса,	[1,10 <sup>5</sup> ]	_____

		т.е. условие по погрешностям может случайно выполняться раньше реального окончания процесса установления). Обязательный атрибут.		
W_nominal	REAL	С какой мощности начинается процесс управляемого снижения/повышения мощности (в долях от номинальной). Обязательный атрибут.	[0,10]	_____
ConstantsName	CHAR	Название папки, в которой помещаются библиотеки ядерно-физических данных, необходимые для расчёта. Необязательный атрибут.	_____	etc\DN3D\...
Gamma_end	REAL	Константа граничного условия для потока снизу и сверху. Необязательный атрибут.	[0,0.9999]	0.9999
Gamma_side	REAL	Константа граничного условия для потока сбоку. Необязательный атрибут.	[0,0.9999]	0.9999
Ro_base	REAL	Плотность теплоносителя ( $\text{кг/м}^3$ ), для которой задаются концентрации материалов. Необязательный атрибут.	$[10^{-5}, 10686]$	Первое значение из массива Grid_RoPb (таблица 5.49)
InverseDif	INT	Флаг использования обратного коэффициента	0, 1	0

		диффузии (1 – использовать, 0 – не использовать) Необязательный атрибут.		
EPS_Temp	REAL	Относительная точность установления стационарного состояния по максимальным температурам топлива и теплоносителя. Необязательный атрибут.	[10 <sup>-4</sup> ,10]	1.0
DeltaTInitial	REAL	Значение разницы по температурам для первого шага по времени, К. Необязательный атрибут.	[10 <sup>-5</sup> ,100]	100
FLAG_H2O	INT	Флаг учета транспорта водяного пара в а.з. в нейтронно-физическом расчете (1 – учитывается, 0 – не учитывается). Необязательный атрибут.	0,1	0
ResidualHeat	INT	Флаг вычисления остаточного энерговыделения. Необязательный атрибут.	0,1	1
OSTBTab	INT	Флаг использования встроенных табличных данных для расчета остаточного энерговыделения. Необязательный атрибут.	0,1	0

Таблица 5.45 – Список подтегов тега CommonInformation

Имя тега	Описание тега
Concentration_Nuclids	Двумерный массив концентраций нуклидов типа real.



Имя тега	Описание тега
	Число строк – число нуклидов, число столбцов – число типов материалов. Элементы массива задают концентрации размерности $10^{24}/\text{см}^3$ в диапазоне [0,1]. Обязательный тег.
Element_List	Список нуклидов, использующихся для задания концентраций в теге Concentration_Nuclids. Массив строк, размером NumberElements, каждый элемент задаёт имя нуклида в базе CONSYST. Обязательный тег.
Element_Types	Тип материала, к которому относится данный нуклид. Массив целочисленных значений, размером NumberElements. Элементы массива могут принимать значения: 1 – топливо, 2 – конструкционные материалы, 3 – теплоноситель. Обязательный тег.

### 5.5.3 Тег <Autonomous\_work>

В теге <Autonomous\_work> описаны параметры, необходимые для автономной работы НФ модуля под оболочкой SMART\_LM. В таблице (Таблица 5.47) приведён список атрибутов тега <Autonomous\_work> и их описание. Тег не является обязательным, используется только для автономного расчёта нейтронно-физическим модулем.

Таблица 5.46 – Атрибуты тега Autonomous\_work

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
T_Pb	REAL	Температура теплоносителя, К. Обязательный атрибут.	[300,1000]	_____
T_Fuel	REAL	Температура топлива, К. Обязательный атрибут.	[300,3000]	_____
T_mat	REAL	Температура конструкционных материалов, К. Обязательный атрибут.	[300,3000]	_____
Ro_Pb	REAL	Плотность теплоносителя, $\text{кг}/\text{м}^3$ . Обязательный атрибут.	[300,1068 6]	_____

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Ro_H2O	REAL	Плотность водяного пара, кг/м <sup>3</sup> . Для режимов в которых значение FLAG_H2O равно 1. Необязательный атрибут.	[0,1000]	_____
Void	REAL	Объемная доля водяного пара. Для режимов в которых значение FLAG_H2O равно 1. Необязательный атрибут.	[0,1]	_____

#### 5.5.4 Тег <SN\_method>

В теге <SN\_method> задаются параметры расчёта с кинетической опции нейтронно-физического модуля (CORNER). В таблице (Таблица 5.48) приведён список атрибутов тега <SN\_method> и их описание. Тег не является обязательным, используется только при расчёте с применением кинетической опции.

Таблица 5.47 – Атрибуты тега SN\_method

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
TypeOfCalculation	INT	Флаг, указывающий на то, в каком режиме используется модуль: 0 – не используется, 1 – используется в стационарном расчёте для решения прямой задачи на критичность, 2 – используется в стационарном расчёте для решения прямой и сопряженной задачи на критичность, 3 – используется нестационарная опция.  Необязательный атрибут.	0, 1, 2, 3	0

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Use299Groups	INT	Флаг, использующийся для включения опции решения прямой и сопряженной задачи с использованием кинетической опции в 299-групповом представлении (0 – 299-групповое представление не используется, 1 - используется). Необязательный атрибут.	0,1	0
OrderOfMethod	INT	Порядок $S_N$ метода (рекомендуемые: 4-8 – для расчёта активной зоны, >8 – для расчёта защиты). Обязательный атрибут.	2n, n=2, ..., 8	_____
Quadrature Type	INT	Тип угловой квадратуры: 1 – LQn, 2 – PnTn. Обязательный атрибут.	1, 2	_____
MomentsNumber	INT	Порядок разложения сечения рассеяния в ряд по полиномам Лежандра. Обязательный атрибут.	0,1,2,3,4,5	_____
EpsExternal	REAL	Точность сходимости внешних итераций (рекомендуемые: $10^{-5}$ – для стационарных задач, $10^{-8}$ – для нестационарных задач). Обязательный атрибут.	$[10^{-12}, 10^{-3}]$	_____
EpsInternal	REAL	Точность сходимости внутренних итераций (рекомендуемые: $10^{-4}$ – для стационарных задач, $10^{-8}$ – для нестационарных задач). Обязательный атрибут.	$[10^{-12}, 10^{-3}]$	_____
IterationExternal	INT	Максимальное число внешних итераций (рекомендуемое: 100). Необязательный атрибут.	[1, 1000]	100

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
IterationInternal	INT	Максимальное число внутренних итераций (рекомендуемое: 200). Необязательный атрибут.	[1, 1000]	200
ReadFlux	INT	Флаг, определяющий считывается ли начальное приближение для решения задачи на $K_{эф}$ из файла: 1 – считывается, 0 – не считывается. Необязательный атрибут.	0, 1	0
SaveFlux	INT	Флаг, определяющий записывается ли начальное приближение для решения задачи на $K_{эф}$ в файл: 1 – записывается, 0 – не записывается. Необязательный атрибут.	0, 1	0
ReadAdjFlux	INT	Флаг, определяющий считывается ли начальное приближение для решения сопряженной задачи из файла: 1 – считывается, 0 – не считывается. Необязательный атрибут.	0, 1	0
SaveAdjFlux	INT	Флаг, определяющий записывается ли начальное приближение для решения сопряженной задачи в файл: 1 – записывается, 0 – не записывается. Необязательный атрибут.	0, 1	0
SaveFluxStep	INT	Количество внешних итераций, после которого записывается начальное приближение для решения задачи на $K_{эф}$ и для сопряженной задачи. Необязательный атрибут.	[1,1000]	IterationExternal

Параметр «TypeOfCalculation» определяет, в каком режиме используется модуль. При значении параметра, равном 1, модуль вызывается один раз для уточнения распределения потока нейтронов перед стартом нестационарного расчёта, при значении

параметра, равном 2, выполняется полноценный нестационарный расчёт с применением модуля на базе метода дискретных ординат.

Пример задания исходных данных для расчёта с применением кинетической опции представлен на рисунке (Рисунок 5.27).

```
<SN_method
  TypeOfCalculation="1 "
  OrderOfMethod="4 "
  QuadratureType="1 "
  MomentsNumber="0 "
  EpsExternal="1E-9"
  EpsInternal="1E-9"
  IterationExternal="100"
  IterationInternal="20"
  ReadFlux="1 "
  SaveFlux="1 "
  ReadAdjFlux="1 "
  SaveAdjFlux="1 ">
</SN_method>
```

Рисунок 5.26 – Пример задания исходных данных для расчёта с применением кинетической опции

#### 5.5.5 Тег <Interpolation>

В теге <Interpolation> заданы сетки параметров для расчёта констант. Тег является обязательным. В таблице (Таблица 5.49) приведён список подтегов тега <Interpolation> и их описание.

Таблица 5.48 – Подтеги тега Interpolation

Имя атрибута	Описание тега
Grid_RoPb	Упорядоченный массив элементов типа REAL. Количество элементов в массиве не превышает 10. Каждый элемент задает узел расчетной сетки по плотности теплоносителя (кг/м <sup>3</sup> ). Элементы массива лежат в диапазоне [0,10696]. Обязательный тег.

Имя атрибута	Описание тега
Grid_RoH2O	Упорядоченный массив элементов типа REAL. Количество элементов в массиве не превышает 10. Каждый элемент задает узел расчетной сетки по плотности водяного пара (кг/м <sup>3</sup> ). Элементы массива лежат в диапазоне [0,1000]. Обязательный тег, если FLAG_H2O равен 1.
Grid_Void	Упорядоченный массив элементов типа REAL. Количество элементов в массиве не превышает 10. Каждый элемент задает узел расчетной сетки по объемной доле водяного пара. Элементы массива лежат в диапазоне [0,1]. Обязательный тег, если FLAG_H2O равен 1.
Grid_TempPb	Упорядоченный массив элементов типа REAL. Количество элементов в массиве не превышает 10. Каждый элемент задает узел расчетной сетки по температуре (К) теплоносителя. Элементы массива лежат в диапазоне [300,1000]. Обязательный тег.
Grid_TempMat	Упорядоченный массив элементов типа REAL. Количество элементов в массиве не превышает 10. Каждый элемент задает узел расчетной сетки по температуре (К) конструкционных материалов. Элементы массива лежат в диапазоне [300,3000]. Обязательный тег.
Grid_TempFuel	Упорядоченный массив элементов типа REAL. Количество элементов в массиве не превышает 10. Каждый элемент задает узел расчетной сетки по температуре (К) топлива. Элементы массива лежат в диапазоне [300,3000]. Обязательный тег.

#### 5.5.6 Тег <PrepareConst>

Программа PrepareConst позволяет пользователю использовать имеющуюся у него версию CONSYST для подготовки констант. Для этого используется тег PrepareConst, внутри которого задаются, следующие атрибуты (таблица 5.50).

Таблица 5.49 – Атрибуты тега PrepareConst

Атрибут	Тип	Назначение	Значение по умолчанию
FLAG_RF	0,1	Флаг использования CONSYST-RF. (1 – используется CONSYST-RF, 0 – используется другая версия). Необязательный атрибут.	0
BNABBIN	STRING	Путь к малогрупповым библиотекам CONSYST. Необязательный атрибут.	CI/CONSYST_INTEL/abbn93gint.01a
BNABMLTBIN	STRING	Путь к мультигрупповым библиотекам CONSYST. Необязательный атрибут.	CI/CONSYST_INTEL/abbn93mint.01a
EXE	STRING	Путь к исполняемому файлу CONSYST. Необязательный атрибут.	csrf64.exe

Пример задания тега PrepareConst для использования версии CONSYST-RF представлен на рисунке 5.28.

```
<PrepareConst
FLAG_RF="1"
BNABMLTBIN="CONSYST-RF\bin\AbbnRF95b.01A"
EXE = "CONSYST-RF\bin\Cs170164.exe"/>
```

Рисунок 5.27 – Пример задания тега PrepareConst

## 5.6 Тег <Hydraulics>...</Hydraulics>

В тегах Hydraulics заводятся элементы ТГС, а также параметры теплоносителя, свойства материалов, используемые в теплогидравлическом модуле, и значения необходимых констант. Подробное описание моделируемых элементов ТГС и правила их задания во входном файле представлены в Руководстве пользователя ПК HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 [3].

## 5.7 ControlFunc – контрольные функции

Элемент ControlFunc (контрольная функция) предназначен для ввода формульных выражений в текстовом виде с использованием рассчитываемых в программе изменяющихся со временем переменных. Формулы обрабатываются последовательно на каждом временном шаге и могут быть использованы в различных объектах (например, FuelRod, BoundCell т.д.). Формульное выражение можно использовать для вывода в текстовый файл (файлы).

### 5.7.1 Свойства элемента

Основные параметры контрольных функций задаются в тегах ControlFunc, находящихся внутри тегов Hydraulics, Neutronics и BERKUT (таблица 5.51).

Таблица 5.50 – Атрибуты тега ControlFunc

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя объекта Каждой контрольной функции должно быть присвоено уникальное имя. Обязательный атрибут.	Любое (максимум 100 символов)	_____
Formula	CHAR	Формульное выражение для вычисления значения контрольной функции Обязательный атрибут.	Любое	_____



Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Func	REAL	Начальное значение результата формулы в случаях, когда формула не может обработаться корректно, например, аргументы формулы еще не определены.  Необязательный атрибут.	Любое	0.0
OutFile	CHAR	Имя файла с относительным (или абсолютным) путём. Относительный путь – относительно рабочего каталога. Задаётся при использовании объекта ControlFunc для вывода в текстовый файл.  Необязательный атрибут.	Любое	_____

Каждый аргумент в формульном выражении контрольной функции должен быть описан в своем подтеге с названием Arg и атрибутами, представленными в таблице 5.52.

Аргумент LongName представляет собой текстовую строку в двойных кавычках и должен состоять из трёх частей:

- тип объекта – Channel, ControlFunc, FuelRod и т.п.;
- имя переменной;
- индексы.

После указания типа объекта в круглых скобках прописывается уникальное имя объекта (из файла ввода). Кавычки (одинарные, поскольку двойные уже задействованы) обязательны, если в имени объекта есть скобки (), если нет скобок – можно без кавычек. Одинарные и двойные кавычки можно поменять местами. Уникальное имя твэла в твэльном модуле формируется из имени зоны, имени ТВС и имени твэла, написанные через "/" (<Zone Name>/<FuelAssembly Name>/<FuelRod Name>).

После указания типа объекта и его имени ставится точка, после точки – имя переменной и индексы. Имена переменных контрольных функций соответствуют именам

плот-переменных соответствующих модулей (смотри раздел 6). Индекс определяет номер расчётной ячейки (нумерация ячеек начинается с единицы) или фазу, которая также может задаваться целым числом или текстовым значением (как и плот-переменные). Если задано неправильное число индексов, то диагностируется ошибка.

Таблица 5.51 – Атрибуты тега Arg

Имя атрибута	Тип значения	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
ShortName	CHAR	Краткое обозначение аргумента для использования в формуле  Обязательный атрибут.	Последовательность разрешённых символов:  0123456789_abcdefghijklmnop qrstuvwxyz  ABCDEFGHIJKLMNQRST UVWXYZ  Любая последовательность символов из перечисленных выше.	_____
Module	CHAR	Имя модуля, из которого берётся значение аргумента  Обязательный атрибут.	Значения из тега ModuleList	_____
LongName	CHAR	Текстовой адрес (путь) переменной  Обязательный атрибут.	Смотри раздел 6, рисунки 5.27 и 5.28	_____

Пример задания контрольных функций приведён на рисунке 5.32.

```

<ControlFunc Name="PumpMassFlow" OutFile="PumpMassFlow.dat" Func="0.0"
Formula="interp([0,2,1000],[0.0,MFluxSum,MFluxSum],t)">
  <Arg ShortName="t" LongName="Time" Module="Hydra"/>
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="ThDeform" Func="0.0" Formula="ThEps"
OutFile="ThEps.txt">
  <Arg ShortName="ThEps" Module="BERKUT" LongName="FuelRod(299/PB/FR-
PB).ThermalRadStrain(11,1)"/>
</ControlFunc>

```

Рисунок 5.28 – Пример задания контрольных функций

### 5.7.2 Использование контрольных функций для вывода в файл

При использовании объектов ControlFunc для вывода в текстовый файл необходимо добавить атрибут OutFile = <имя файла>. Пример показан на рисунке 5.33.

```

<ControlFunc Name="CF2-very long english name"
  Formula="a+b" OutFile="MyFile.txt">
  <Arg ShortName="a" Module="Hydra" LongName="Channel('CH1').Temp(Fluid,5)"/>
  <Arg ShortName="b" Module="Hydra" LongName="ControlFunc(CF1).Func"/>
</ControlFunc>

```

Рисунок 5.29 – Пример задания контрольной функции при выводе значений в файл

В атрибуте OutFile задаётся имя файла с относительным (или абсолютным) путём. Относительный путь – относительно рабочего каталога.

Если в нескольких контрольных функциях указан один и тот же файл, то все эти функции собираются для вывода в один файл.

В файле вывода сначала выводятся имена функции, текст формулы и аргументы. В процессе расчёта по времени выводятся по столбцам время в формате % 13.6e и значения функций, направляемых в этот файл, в формате % 11.4e.

### 5.7.3 Вывод элементов 1D массива в файл

Для удобства и сокращения задания выдачи разрешается использовать диапазон индексов Ind1:Ind2, например Channel('CH1').Temp(1,5:15).

Частота вывода по времени задается в блоке Main в атрибуте DtOutput.

#### 5.7.4 Вывод элементов 2D массива в файл

Реализовано также сокращенное задание выдачи данных двумерного массива в файл, то есть разрешается использовать диапазон индексов.

В случае задания пользователем выдачи двумерного массива в текстовый файл аргумент контрольной функции должен быть единственным (Рисунок 5.31).

```
<ControlFunc Name="AllT" OutFile="AllTemp.txt" Func="0."
Formula="v1">
  <Arg ShortName="v1" Module="Hydra"
LongName="HeatStruct('TWEL').TempWall(1:16,1:2)"/>
</ControlFunc>
```

Рисунок 5.30 – Пример контрольной функции для выдачи значений двумерного массива в файл

В этом случае после обработки ввода программа сформирует необходимое число контрольных функций и запишет их по столбцам во внешний текстовый файл.

Список переменных, доступных для использования в формулах контрольных функций, описан в разделе 6.

#### 5.7.5 Список элементарных функций

В таблицах 5.53–5.57 приведён полный список элементарных функций, которые могут быть использованы в контрольных функциях.

Таблица 5.52 – Основные функции для действительных чисел

Функция	Аргументы и результат	Описание
floor	$a = \text{floor}(b)$	отбрасывание дробной части
min	$c = \text{min}(a,b)$	вычисление минимального значения
max	$c = \text{max}(a,b)$	вычисление максимального значения
sin	$a = \text{sin}(b)$	синус действительного числа

cos	$a = \cos(b)$	косинус действительного числа
tan	$a = \tan(b)$	тангенс действительного числа
cot	$a = \cot(b)$	котангенс действительного числа
atan	$a = \text{atan}(b)$	арктангенс действительного числа
asin	$a = \text{asin}(b)$	арксинус действительного числа
acos	$a = \text{acos}(b)$	арккосинус действительного числа
exp	$a = \exp(b)$	экспонента действительного числа
ln	$a = \ln(b)$	логарифм натуральный действительного числа
Log	$a = \log(b)$	десятичный логарифм действительного числа
sinh	$a = \sinh(b)$	гиперболический синус действительного числа
cosh	$a = \cosh(b)$	гиперболический косинус действительного числа
tanh	$a = \tanh(b)$	гиперболический тангенс действительного числа
coth	$a = \text{coth}(b)$	гиперболический котангенс действительного числа
asinh	$a = \text{asinh}(b)$	гиперболический арксинус действительного числа
acosh	$a = \text{acosh}(b)$	гиперболический арккосинус действительного числа
atanh	$a = \text{atanh}(b)$	гиперболический арктангенс действительного числа
sqrt	$a = \text{sqrt}(b)$	корень квадратный, действительный результат
abs	$a = \text{abs}(b)$	абсолютное значение
sign	$a = \text{sign}(b)$	определение знака действительного числа
root	$c = \text{root}(a,b)$	корень b-й степени от числа a
proportion	$Y = \text{proportion}(X, \text{MinimumX}, \text{MaximumX}, \text{MinimumY}, \text{MaximumY})$	простая линейная интерполяция

Таблица 5.53 – if функции

Функция	Аргументы и результат	Описание
?:	a = condition ? res_true : res_false	Здесь condition - логическое выражение. Если condition = true, то a = res_true, иначе a = res_false

Замечание: В логическом выражении condition можно использовать операции “not”, “and”, “or”.

Таблица 5.54 – Функции interpol

Функция	Аргументы и результат	Описание
interpol	a = interpol([Xarg1,Xarg2,...], [Yarg1,Yarg2,...], x)	Аналог таблицы

Таблица 5.55 – Функции minArray и maxArray (рассчитывают минимальное и максимальное значение массива аргументов)

Функция	Аргументы и результат	Описание
minArray	a = minArray(V1), V1 – одномерный или двумерный массив <m> малый оставил по аналогии с функцией min	a равно минимальному значению массива V1
maxArray	a = maxArray(V1), V1 – одномерный или двумерный массив	a равно максимальному значению массива V1

Замечание: Если в именах используется символ “&”, то его необходимо заменить на “&amp;”. При необходимости использования вложенных кавычек можно использовать разные типы кавычек (двойные” или одинарные’). Также внутри выражений в кавычках можно использовать символ &quote;

Таблица 5.56 – Специальные функции

Функция	Аргументы и результат	Описание
in	$a = in(n,x)$	функция Бесселя I n-го порядка
i0	$a = i0(x)$	функция Бесселя I нулевого порядка
i1	$a = i1(x)$	функция Бесселя I первого порядка
jn	$a = jn(n,x)$	функция Бесселя J n-го порядка
j0	$a = j0(x)$	функция Бесселя J нулевого порядка
j1	$a = j1(x)$	функция Бесселя J первого порядка
kn	$a = kn(n,x)$	функция Бесселя K n-го порядка
k0	$a = k0(x)$	функция Бесселя K нулевого порядка
k1	$a = k1(x)$	функция Бесселя K первого порядка
yn	$a = yn(n,x)$	функция Бесселя Y n-го порядка
y0	$a = y0(x)$	функция Бесселя Y нулевого порядка
y1	$a = y1(x)$	функция Бесселя Y первого порядка
DerivC(a <sub>1</sub> ,a <sub>2</sub> )	$f^n = \frac{1}{2} \left( \frac{a_1^n - a_1^{n-1}}{a_2^n - a_2^{n-1}} + \frac{a_1^{n-1} - a_1^{n-2}}{a_2^{n-1} - a_2^{n-2}} \right)$	Производная (центральная разность), n – номер слоя по времени
DerivF(a <sub>1</sub> ,a <sub>2</sub> )	$f^n = \left( \frac{a_1^n - a_1^{n-1}}{a_2^n - a_2^{n-1}} \right)$	Производная
IntegralF(a <sub>1</sub> ,a <sub>2</sub> )	$f^n = f^{n-1} + \frac{1}{2} (a_1^n + a_1^{n-1})(a_2^n - a_2^{n-1})$	Интеграл

Hysteresis (a <sub>1</sub> ,fL,fU)	$f^n = \begin{cases} \max [f^{n-1}, f_{LOAD}(a_1^n)], & a_1^n \geq a_1^{n-1} \\ \min [f^{n-1}, f_{UNLOAD}(a_1^n)], & a_1^n < a_1^{n-1} \end{cases}$	Гистерезис
crash('сообщение')	Сообщение – строка, ограниченная с двух сторон одинарными кавычками	Остановка с печатью сообщения в файл log_errors.txt и на экран
print('сообщение')	Сообщение – строка, ограниченная с двух сторон одинарными кавычками	Печать сообщения в файл log_events.txt. В арифметическом выражении возвращает значение ноль

### 5.7.6 Список элементарных операций

Список элементарных операций представлен в таблицах 5.58–5.60.

Таблица 5.57 – Операторы для целых чисел

Оператор	Действие и результат	Описание
not	b = not a	оператор логического отрицания
and	c = a and b	оператор И
or	c = a or b	оператор ИЛИ
xor	c = a xor b	оператор ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ
shl	c = a shl b	сдвиг на b битов влево
shr	c = a shr b	сдвиг на b битов вправо
div	c = a div b	целочисленное деление
mod	c = a mod b	вычисление остатка от целочисленного деления

Таблица 5.58 – Арифметические операторы для вещественных чисел

Оператор	Действие и результат	Описание
-	c = - a	Обратный знак для действительных чисел
+	c = a + b	Сложение действительных чисел



-	$c = a - b$	Вычитание действительных чисел
*	$c = a * b$	Умножение действительных чисел
/	$c = a / b$	Деление действительных чисел
^	$c = a^b$	Возведение в степень действительных чисел

Таблица 5.59 – Операторы сравнения действительных чисел. Результат логической операции – целый: 0 – ложь, 1 – истина

Оператор	Действие и результат	Описание
==	$a == b$	Равенство
>	$a > b$	Больше
<	$a < b$	Меньше
>=	$a >= b$	Больше или равно
<=	$a <= b$	Меньше или равно
!=	$A != b$	Неравенство

### 5.7.7 Свойства неконденсируемых газов

Пользователю предоставляется возможность использовать функции, позволяющие рассчитывать значения теплоёмкости и теплопроводности семи неконденсируемых газов ("H2", "He", "N2", "O2", "Ar", "Kr", "Xe") от температуры, а также зависимость вязкости от температуры в закритичной области от давления (таблица 5.61). Значения свойств определяются в соответствии с соотношениями, описанными Руководстве по моделям РК HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 [3].

Таблица 5.60 – Свойства неконденсируемых газов

Функция	Аргументы и результат	Описание
$C_{pH2vsT}$ , $C_{pHevsT}$ , $C_{pN2vsT}$ , $C_{pO2vsT}$ ,	$a = C_{pH2vsT}$ (Temperature)	Зависимость теплоёмкости неконденсируемого газа от температуры: Temperature – температура, К. Тип газа определяется буквами после

CpArvsT, CpKrvsT, CpXevsT		наименования свойства Cp, например, CpH2vsT – это теплоёмкость водорода и т.д.
LamH2vsT, LamHevsT, LamN2vsT, LamO2vsT, LamArvsT, LamKrvsT, LamXevsT	a = LamH2vsT (Temperature)	Зависимость теплопроводности неконденсируемого газа от температуры: Temperature – температура, К. Тип газа определяется буквами после наименования свойства Lam, например, LamH2vsT – это теплопроводность водорода и т.д.
VisH2vsT, VisHevsT, VisN2vsT, VisO2vsT, VisArvsT, VisKrvsT, VisXevsT	a = VisH2vsPT (Pressure, Temperature)	Зависимость вязкости неконденсируемого газа от давления (в закритичной области) и температуры: Pressure – давление, Па; Temperature – температура, К. Тип газа определяется буквами после наименования свойства Vis, например, VisH2vsT – это вязкость водорода и т.д.

### 5.7.8 Использование констант

В формулах можно использовать встроенные константные значения, указанные в таблице 5.62, а также заданные пользователем.

Таблица 5.61 – Встроенные константы

Наименование	Значение	Описание
pi	3.141592653589793238462643	Число $\pi$
_e	2.718281828459045235360287	Основание натурального логарифма

При необходимости использовании констант, равных значениям, заданным пользователем (например, для определения константы, равной длине обогреваемой части твэла или высоте активной зоны), пользователь должен задать тег Constant с двумя атрибутами, описанными в таблице 5.63.

Таблица 5.62 – Атрибуты тега Constant

Имя атрибута	Тип	Описание и единицы измерения	Диапазон задания	Значение по умолчанию
Name	CHAR	Имя константы Обязательный атрибут.	Последовательность разрешенных символов: 0123456789_abcdefghijklmnopqrstuvwxyz ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ Любая последовательность символа из перечисленных выше (максимум 100 символов)	_____
Value	REAL	Значение константы Обязательный атрибут.	[-1.8E308,1.8E308]	_____

В атрибуте Value значение может быть задано формульным выражением, использующим другие константы, определённые выше в том же файле. В обработке файла пользовательского ввода константы считываются в первую очередь, поэтому пользовательские константы могут использоваться в формульных выражениях в рамках входного файла, в котором они заданы.

Задание констант, определяющих, например, геометрические размеры реакторной установки, и их использование при задании параметров, определяющихся через геометрические размеры, позволяет в случае изменения любого из размеров не переопределять значения в нескольких местах входного файла.

Пример ввода константы с именем Qext показан на рисунке 5.35.

<Constant Name="Qext" Value="5.e5" />

Рисунок 5.31 – Пример ввода константы Qext

## 6 Список плот-переменных

Для контроля процесса расчёта и графического отображения результатов с интегральным кодом ЕВКЛИД/V1 используется пост-процессор оболочки SMART\_LM – smart-client.exe. С инструкцией по работе с пост-процессором можно ознакомиться в разделе «Помощь», либо нажав клавишу F1. Полный список плот-переменных каждого модуля описан ниже.

### 6.1 Теплогидравлический модуль

В теплогидравлическом модуле HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 в качестве плот-переменных и аргументов контрольных функций используются одни и те же переменные. Полный список переменных теплогидравлического модуля описан в Руководстве пользователя ПК HYDRA-IBRAE/LM/V1.1 [3].

### 6.2 Нейтронно-физический модуль

В текущей версии нейтронно-физического модуля в плот-файл выводятся следующие переменные:

- ControlRodsPositionG7 – положение стержней СУЗ (размерность = см);
- AssemblyPower – тепловыделение в каждой ТВС (размерность = кВт);
- FG – поток нейтронов в каждой ячейке (размерность = отн. ед.);
- FGA – сопряжённая функция в каждой ячейке (размерность = отн. ед.);
- Kr – радиальный коэффициент неравномерности (безразмерная величина);
- Kv – максимальное тепловыделение в расчётной ячейке/среднее тепловыделение в расчётной ячейке (безразмерная величина);
- Kz – коэффициент неравномерности по высоте (безразмерная величина);
- Reactivity – реактивность (размерность = %);
- RelativePower – относительная мощность энерговыделения (безразмерная величина);
- TotalPower – полная мощность энерговыделения (размерность = МВт).

### 6.3 Твэльный модуль

В твэльном модуле интегрального кода Евклид/V1 в плот-файл записываются следующие параметры:

- Height (NFR) – аксиальная геометрическая сетка для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = м);
- Параметры выхода ГПД (GFR):
  - 1) FG Part (NFR) – доля ГПД в общем количестве газа под оболочкой для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
  - 2) FG Release (NFR) – суммарный абсолютный выход ксенона и криптона из топлива для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = моль);
  - 3) Kr Release (NFR) – абсолютный выход криптона из топлива для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = моль);
  - 4) Rel Kr Release (NFR) – выход криптона из топлива относительно наработанного количества для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = %);
  - 5) Rel Xe Release (NFR) – выход ксенона из топлива относительно наработанного количества для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = %);
  - 6) Xe Release (NFR) – абсолютный выход ксенона из топлива для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = моль);
- Геометрические параметры (Geom):
  - 1) Cladding Diameter (NFR) – распределение внешнего диаметра оболочки выбранного твэла по высоте а.з., где NFR – номер твэла (размерность = м);
  - 2) Fuel Swelling (NFR) – объёмное распухание топлива для выбранного твэла по высоте а.з., где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
  - 3) Gap Size (NFR) – величина зазора топливо-оболочка для выбранного твэла по высоте а.з., где NFR – номер твэла (размерность = м);
  - 4) Pellet Diameter (NFR) – распределение внешнего диаметра таблетки выбранного твэла по высоте а.з., где NFR – номер твэла (размерность = м);
  - 5) SwellRate (NFR) – скорость объёмного распухания топлива для выбранного твэла по высоте а.з., где NFR – номер твэла (размерность = % / % т. ат.);
- Нагрузки на твэл (Loads):
  - 1) BurnUp (NFR) – выгорание топлива для выбранного твэла по высоте а.з., где NFR – номер твэла (размерность = % т. ат.);

2) CoolPress (NFR) – давление теплоносителя на оболочку выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = Па);

3) Dose (NFR) – повреждающая доза накопленная оболочкой выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = сна);

4) Gas Pressure (NFR) – давление газа под оболочкой для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = МПа);

– Характеристики напряжённно-деформированного состояния (SSS):

1) CladHeight2D (NFR) – аксиальная геометрическая сетка параметров НДС оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = м);

2) CladRadius1D (NFR) – радиальная геометрическая сетка параметров НДС оболочки в центральной осевой ячейке активной части выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = м);

3) CladRadius2D (NFR) – радиальная геометрическая сетка параметров НДС оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = м);

4) RadialDisplacement (NFR) – поле радиальных перемещений в оболочке для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = м);

5) RadialDisplacement1D (NFR) – распределение радиальных перемещений по радиусу оболочки в центральной осевой ячейке активной части выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = м);

б) Деформации (Strains):

а) ElasticAxialStrain (NFR) – поле упругих аксиальных деформаций оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);

б) ElasticHoopStrain (NFR) – поле упругих окружных деформаций оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);

в) ElasticRadStrain (NFR) – поле упругих радиальных деформаций оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);

г) IrCreepAxialStrain (NFR) – поле аксиальных деформаций радиационной ползучести оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);

д) IrCreepHoopStrain (NFR) – поле окружных деформаций радиационной ползучести оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);

- е) IrCreepRadStrain (NFR) – поле радиальных деформаций радиационной ползучести оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- ж) SwellingAxialStrain (NFR) – поле аксиальных деформаций радиационного распухания оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- з) SwellingHoopStrain (NFR) – поле окружных деформаций радиационного распухания оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- и) SwellingRadStrain (NFR) – поле радиальных деформаций радиационного распухания оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- к) ThCreepAxialStrain (NFR) – поле аксиальных деформаций термической ползучести оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- л) ThCreepHoopStrain (NFR) – поле окружных деформаций термической ползучести оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- м) ThCreepRadStrain (NFR) – поле радиальных деформаций термической ползучести оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- н) ThermalAxialStrain (NFR) – поле термических аксиальных деформаций оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- о) ThermalHoopStrain (NFR) – поле термических окружных деформаций оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- п) ThermalRadStrain (NFR) – поле термических радиальных деформаций оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- р) TotalAxialStrain (NFR) – поле суммарных аксиальных деформаций оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);
- с) TotalAxialStrain1D (NFR) – распределение суммарных аксиальных деформаций по радиусу оболочки в центральной осевой ячейке активной части выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);

т) TotalHoopStrain (NFR) – поле суммарных окружных деформаций оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);

у) TotalHoopStrain1D (NFR) – распределение суммарных окружных деформаций по радиусу оболочки в центральной осевой ячейке активной части выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);

ф) TotalRadStrain (NFR) – поле суммарных радиальных деформаций оболочки для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);

х) TotalRadStrain1D (NFR) – распределение суммарных радиальных деформаций по радиусу оболочки в центральной осевой ячейке активной части выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = отн. ед.);

7) Напряжения (Stresses):

а) AxialStress (NFR) – поле аксиальных напряжений в оболочке для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = Па);

б) AxialStress1D (NFR) – распределение аксиальных напряжений по радиусу оболочки в центральной осевой ячейке активной части выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = Па);

в) HoopStress (NFR) – поле окружных напряжений в оболочке для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = Па);

г) HoopStress1D (NFR) – распределение окружных напряжений по радиусу оболочки в центральной осевой ячейке активной части выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = Па);

д) RadialStress (NFR) – поле радиальных напряжений в оболочке для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = Па);

е) RadialStress1D (NFR) – распределение радиальных напряжений по радиусу оболочки в центральной осевой ячейке активной части выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = Па);

– Параметры тепловой задачи (Thermal):

1) Central Temperature (NFR) – распределение средней температуры в центральной части выбранного твэла по высоте, где NFR – номер твэла (размерность = К);

2) Cladding Surface Temperature (NFR) – распределение температуры наружной поверхности оболочки по высоте выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = К);



- 3) Cladding Temperature (NFR) – распределение средней по толщине температуры оболочки по высоте выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = K);
- 4) CoolTemp (NFR) – распределение температуры теплоносителя по высоте выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = K);
- 5) HeatFlux (NFR) – распределение потока тепла в теплоноситель по высоте выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = Вт/м<sup>2</sup>);
- 6) HeatTrans (NFR) – распределение коэффициента теплоотдачи по высоте выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = Вт/К/м<sup>2</sup>);
- 7) Height2D (NFR) – аксиальная геометрическая сетка двумерного распределения температуры для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = м);
- 8) LinearPower (NFR) – линейная мощность энерговыделения в выбранном твэле, где NFR – номер твэла (размерность = Вт/м);
- 9) Radius1D (NFR) – радиальная геометрическая сетка распределения температуры в центральной осевой ячейке активной части выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = м);
- 10) Radius2D (NFR) – радиальная геометрическая сетка двумерного распределения температуры для выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = м);
- 11) Temperature1D (NFR) – распределение температуры по радиусу в центральной осевой ячейке активной части выбранного твэла, где NFR – номер твэла (размерность = K);
- 12) Temperature2D (NFR) – двумерное распределение (по аксиальной и радиальной координатам) температуры в выбранном твэле, где NFR – номер твэла (размерность = K).
- 13) AveFuelTemperature – средняя по объёму температура топлива (размерность = K).
- 14) MaxCladTempZoneName – имя зоны, которой соответствует максимальная температура оболочки (размерность = б/р).
- 15) MaxCladTemperature – максимальная температура оболочки (размерность = K).
- 16) MaxFuelTempZoneName – имя зоны, которой соответствует максимальная температура топлива (размерность = б/р).

17) MaxFuelTemperature – максимальная температура топлива (размерность = К).

## 7 Примеры расчётов

В данном разделе приводятся примеры расчёта экспериментов и прикладных задач кодом ЕВКЛИД/V1. Каждый пример сопровождается детальным описанием постановки задачи, построения расчётной схемы и входного файла, результатов расчётов.

### 7.1 Моделирование эксперимента NIMRHE-2 по облучению твэлов со смешанным нитридным топливом в натриевом реакторе ФЕНИКС

В данном подразделе представлен пример моделирования кодом ЕВКЛИД/V1 эксперимента NIMRHE-2, проведённого во Франции, по испытаниям твэлов со смешанным нитридным топливом в быстром натриевом реакторе ФЕНИКС [15].

#### 7.1.1 Постановка задачи

В эксперименте NIMRHE-2 в реакторе ФЕНИКС облучалось 5 твэлов с топливом  $U_{0,8}Pu_{0,2}N$  и геометрией, характерной для твэлов реактора СУПЕР-ФЕНИКС. Материал оболочки твэлов – сталь 316 сw Ti. Характеристики экспериментальных твэлов и смешанного нитридного топлива, использованных в эксперименте, приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Параметры твэлов с топливом  $U_{0,8}Pu_{0,2}N$ , облученных в реакторе ФЕНИКС

плотность таблетки, %	82,2
эффективная плотность, %	76,8
диаметр таблетки, мм	7,122
внутренний диаметр оболочки, мм	7,36
внешний диаметр оболочки, мм	8,5
доля Pu, %	20,8
изотопный состав Pu, %	
Pu-238	0,153
Pu-239	74,692
Pu-240	21,871
Pu-241	2,573
Pu-2242	0,711
Am-241	4360 ppm
высота топливного столба, мм	849,5
высота газовой полости (верхняя/нижняя), см <sup>3</sup>	100/442

высота торцевого экрана из UN (верхнего/нижнего), мм	310/300
---	---------

В таблице 7.2 представлены условия облучения экспериментальных ТВЭЛОВ в реакторе ФЕНИКС.

Таблица 7.2 – Условия облучения ТВЭЛОВ с топливом  $U_{0,8}Pu_{0,2}N$  в реакторе ФЕНИКС

Длительность облучения, эфф.сут	362
Макс. выгорание, % т. ат.	5,8
Макс. линейная мощность, кВт/м	73 (начало кампании) 66 (через 260 эфф. сут.) 55 (через 362 эфф. сут.)
Макс. температура оболочки, °С	700

В таблицах 7.3 и 7.4 представлены результаты послереакторных исследований одного из облучённых в эксперименте NIMRHE-2 ТВЭЛОВ.

Таблица 7.3 – Результаты измерения распухания нитридного топлива в эксперименте NIMRHE-2

Расстояние от низа ТВЭЛА, мм	Локальное выгорание, % т.ат.	Объёмное распухание, %	Скорость распухания, %/ %т.ат
828,0	4,133	7,22	1,75
1059,5	5,675	9,36	1,89

Таблица 7.4 – Выход ГПД под оболочку в эксперименте NIMRHE-2

Выход Хе и Кг, $\times 10^{-3}$ моль	Выход Хе и Кг, %
2,091	10,6

### 7.1.2 Построение расчётной схемы

Для моделирования эксперимента NIMRHE-2 интегральным кодом ЕВКЛИД/V1 использованы следующие исходные данные. В твэле выделены структурные элементы: активная часть, нижний и верхний торцевые экраны, нижний и верхний компенсационные объёмы. Активная часть твэла разбита на 17 осевых ячеек. На нижний и верхний торцевые экраны, нижний и верхний компенсационные объёмы выделено по одной осевой ячейке соответственно. В радиальном направлении твэл разбит на 32 слоя: топливная таблетка – 20 слоёв, газовый зазор – 4 слоя, оболочка – 8 слоёв. Число расчётных ячеек определяется пользователем, исходя из условий задачи, требуемой точности и скорости счёта.

Поскольку свойства стали 316 сw Ti недоступны, в расчётах использовались свойства аустенитной стали ЧС-68 х.д. Мощность энерговыделения в твэле задана в виде функции класса TFun2D (смотри п.п. 5.5.4) в объекте RODHeater. Распределение мощности энерговыделения по высоте твэла представлено на рисунке 7.1. Согласно данным таблицы 7.2 максимальная линейная мощность энерговыделения в эксперименте NIMRHE-2 менялась во времени: с 73 кВт/м в начале облучения до 66 кВт/м в течение следующих 260 эфф. сут. и с 66 кВт/м до 55 кВт/м в течение последних 102 эфф. сут. (рисунок 7.2).

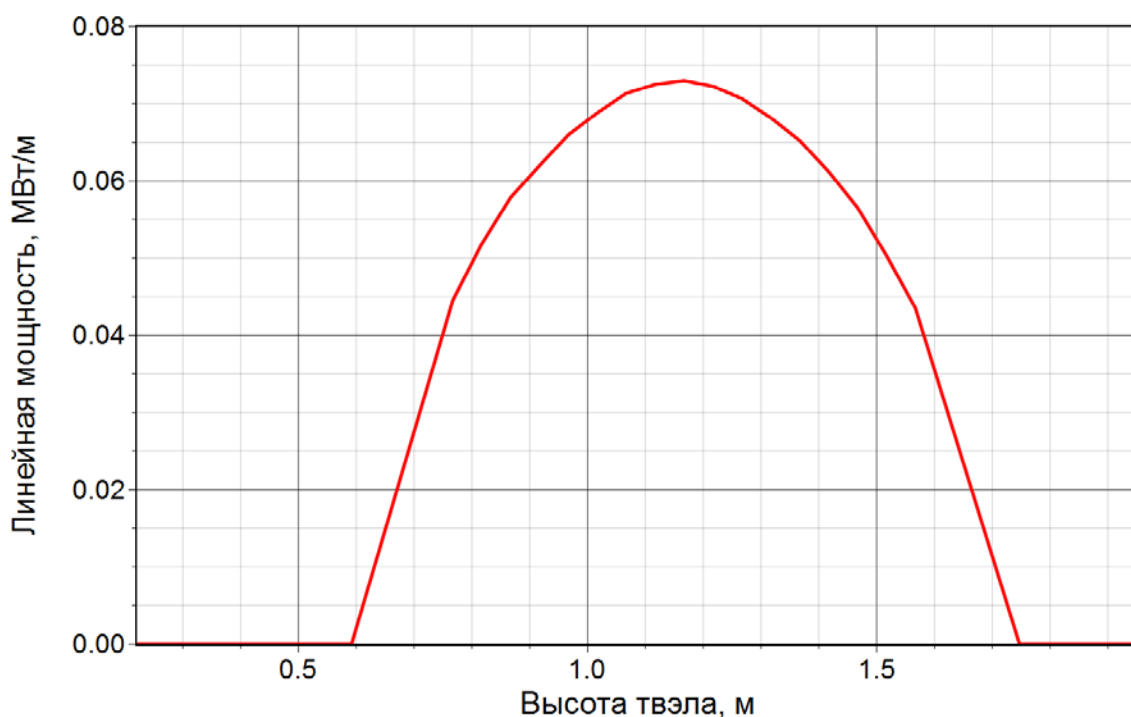


Рисунок 7.1 – Распределение линейной мощности энерговыделения по высоте твэла

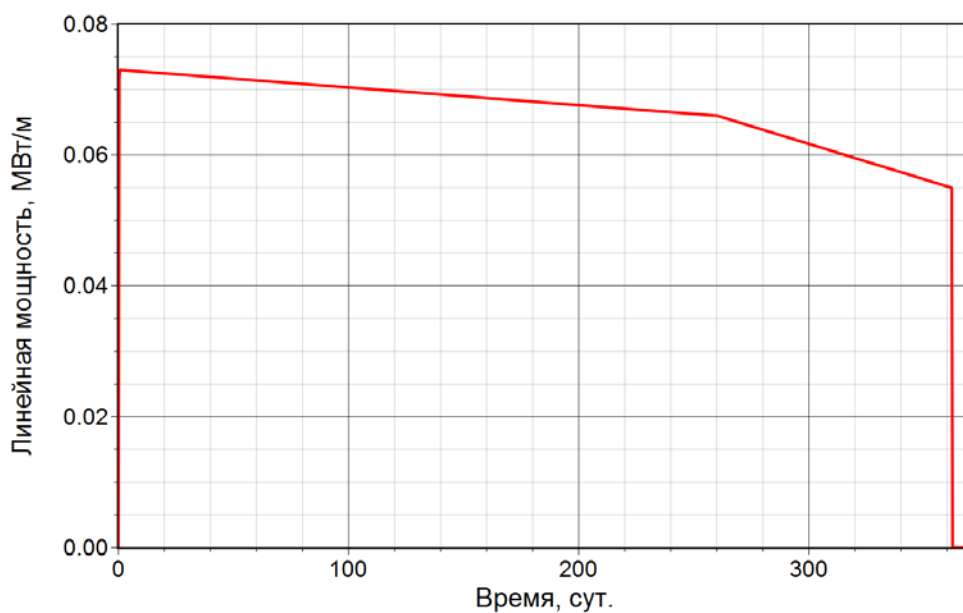


Рисунок 7.2 – Распределение максимальной линейной мощности энерговыделения во времени

Температура поверхности оболочки твэла задана через объект RODCooler. Класс функции – TFun2DSet (смотри п.п. 5.5.4) – позволяет задать периоды нагрева и охлаждения твэла во входном файле. Распределение температуры поверхности оболочки твэла по высоте в номинальном режиме показано на рисунке 7.3. Распределение скорости набора повреждающей дозы по высоте твэла выбрано аналогичным распределению мощности энерговыделения (рисунок 7.1) и задано в объекте DPARate. Максимальная повреждающая доза принята равной 30 сна.

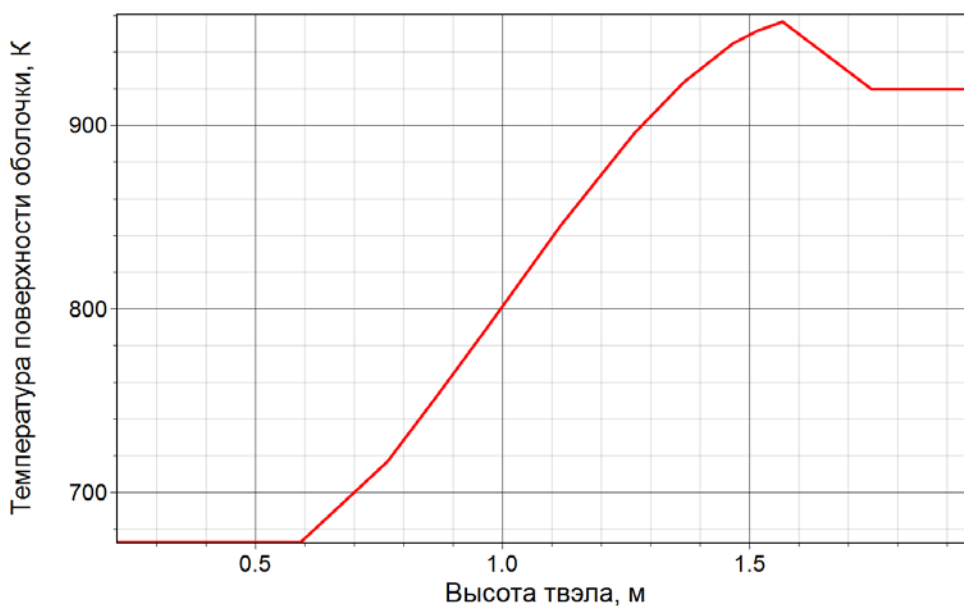


Рисунок 7.3 – Распределение температуры поверхности оболочки по высоте твэла

### 7.1.3 Файл входных данных

В блоке Main заданы основные управляющие параметры расчёта. Он содержит тег Description, в котором приводятся название и краткое описание теста. В теге ModuleList указано, что в расчёте участвуют модуль контрольных функций CFunc и твэльный модуль BERKUT. В блоке TimeTable задаются параметры, управляющие расчётом – значения максимального и минимального шагов по времени, начального шага, частота записи информации в выходные файлы, время расчёта. Продолжительность расчёта теста выбрана исходя из времени облучения твэлов и составляет  $EndTime = 3,2 \times 10^7$  с, максимальный и минимальный шаги по времени для режимов нагрева и охлаждения –  $DtMax = DtMin = 600$  с, для номинального режима –  $DtMax = DtMin = 18000$  с, начальный шаг  $DtStart = 600$  с. При таких значениях достигаются необходимые скорость счёта и точность. Запись рестарт-файла отключена (атрибут DtRestart равен -1). Частота записи параметров в текстовые файлы задаётся атрибутом DtCF. В данном случае она составляет  $3,6 \times 10^4$  с для номинального режима и  $3,6 \times 10^3$  с для режимов нагрева и охлаждения. В теге PlotList блока Main можно регулировать число параметров, выводимых в plot-файл для отображения результатов расчёта. В данном примере производится вывод в plot-файл всех параметров твэльного модуля со скважностью, аналогичной DtCF.

В таблице 7.5 представлено описание основных атрибутов расчётной модели твэла в эксперименте NIMPHЕ-2.

Таблица 7.5 – Основные атрибуты твэла в целом

Атрибут	Значение	Описание
TRREF0	293.0	Температура, при которой рассчитываются разгруженные размеры твэла
PGAP0	0.1e6	Начальное давление газа закачки
TRSTART	673.0	Начальная температура
DPARate	DPARate	Имя функции, определяющей скорость набора повреждающей дозы оболочкой
HeatPower	RODHeater	Имя функции, определяющей линейное энерговыделение в твэле
CoolTemp	RODCooler	Имя функции, определяющей температуру поверхности оболочки
IFUEL	UPN	Материал топливной таблетки
ICLAD	CHS68	Материал оболочки
IGAS	He	Газ закачки
PUPART	0.208	Относительное содержание плутония в топливе
RELDENS	0.82	Плотность топлива относительно теоретической
DBSVer	SMARTDBS	В расчёте используется база данных свойств материалов SmartDB

В таблицах 7.6–7.11 представлены параметры модулей, задействованных в расчёте.

Таблица 7.6 – Атрибуты теплового модуля

Атрибут	Значение	Описание
Use	1	Тепловой модуль участвует в расчёте
GridType	GRD_DIST	В каждом типе материалов (таблетка, газовый зазор, оболочка) строится равномерная по радиусу сетка
iGapGasMix	0	Ухудшение теплопроводности газа при выходе ГПД не учитывается

Таблица 7.7 – Радиальная сетка теплового модуля

Атрибут	Значение	Описание
cntHole	0	Центральное отверстие отсутствует
cntPell	20	В таблетке задано 20 радиальных слоёв
cntGap	4	В зазоре задано 4 радиальных слоя
cntClad	8	В оболочке задано 8 радиальных слоёв

Таблица 7.8 – Атрибуты механического модуля

Атрибут	Значение	Описание
Use	1	Механический модуль участвует в расчёте
Version	2	Используется вторая версия механического модуля, рассчитывающая НДС оболочки и распухание топлива
GridType	GRD_DIST	В каждом типе материалов (таблетка, оболочка) строится равномерная по радиусу сетка
iPelSolid	1	Моделируется таблетка без трещин
iHardPCMI	0	Моделируется МВТО с проскальзыванием
iPelEpsTh	1	Учитываются термические деформации таблетки
iPelEpsSw	1	Учитываются деформации распухания таблетки
iPelEpsEl	1	Учитываются упругие деформации таблетки
iCladEpsTh	1	Учитываются термические деформации оболочки
iCladEpsSw	1	Учитываются деформации распухания оболочки
iCladEpsEl	1	Учитываются упругие деформации оболочки

Таблица 7.9 – Радиальная сетка механического модуля

Атрибут	Значение	Описание
cntHole	0	Центральное отверстие отсутствует
cntPell	10	В таблетке задано 10 радиальных слоёв
cntGap	1	В зазоре задан 1 радиальный слой
cntClad	4	В оболочке задано 4 радиальных слоя

Таблица 7.10 – Атрибуты модуля расчёта выхода ГПД

Атрибут	Значение	Описание
Use	1	Модуль расчёта выхода ГПД участвует в расчёте

Таблица 7.11 – Радиальная сетка модуля расчёта выхода ГПД

Атрибут	Значение	Описание
cntHole	0	Рассматривается только таблетка
cntPell	10	В таблетке задано 10 радиальных слоёв
cntGap	0	Рассматривается только таблетка
cntClad	0	Рассматривается только таблетка

В таблицах 7.12–7.28 приведены значения атрибутов, описывающих разбиение твэла по высоте и геометрические параметры твэла. Кроме того, в верхнем и нижнем компенсационных объёмах из-за отсутствия в них топливных таблеток введена своя локальная радиальная сетка.

Таблица 7.12 – Атрибуты верхнего компенсационного объёма твэла

Атрибут	Значение	Описание
Name	TopVol	Идентификатор верхнего компенсационного объёма
Count	1	Общее число осевых ячеек в верхнем компенсационном объёме равно 1
Title	Top compensating volume	Произвольное текстовое название элемента

Таблица 7.13 – Радиальная сетка тепловой задачи в верхнем компенсационном объёме

Атрибут	Значение	Описание
cntHole	0	Центральное отверстие отсутствует
cntPell	0	Таблетка отсутствует
cntGap	24	В зазоре задано 24 радиальных слоя
cntClad	8	В оболочке задано 8 радиальных слоёв

Таблица 7.14 – Атрибуты осевой ячейки верхнего компенсационного объёма твэла

Атрибут	Значение	Описание
Title	Cell N 22	Произвольное текстовое название осевой ячейки
Repeat	1	Число осевых ячеек данного типа равно 1



Таблица 7.15 – Геометрические параметры осевой ячейки верхнего компенсационного объёма твэла

Атрибут	Значение	Описание
Height	0.1	Высота осевой ячейки
dmHole	0.0	Центральное отверстие отсутствует
dmPellet	0.0	Таблетка отсутствует
dmGap	0.00736	Внутренний диаметр оболочки
dmCladding	0.0085	Внешний диаметр оболочки

Таблица 7.16 – Атрибуты верхнего торцевого экрана твэла

Атрибут	Значение	Описание
Name	TopFuel	Идентификатор верхнего торцевого экрана
Count	1	Общее число осевых ячеек в верхнем торцевом экране равно 1
Title	Top fuel shield	Произвольное текстовое название элемента
IFUEL	UN	Материал топливной таблетки отличается от заданного в теге MainBERKUT
ICLAD	CHS68	Материал оболочки

Таблица 7.17 – Атрибуты осевой ячейки верхнего торцевого экрана твэла

Атрибут	Значение	Описание
Title	Cell N 21	Произвольное текстовое название осевой ячейки
Repeat	1	Число осевых ячеек данного типа равно 1

Таблица 7.18 – Геометрические параметры осевой ячейки верхнего торцевого экрана твэла

Атрибут	Значение	Описание
Height	0.31	Высота осевой ячейки
dmHole	0.0	Центральное отверстие отсутствует
dmPellet	0.007122	Внешний диаметр таблетки
dmGap	0.00736	Внутренний диаметр оболочки
dmCladding	0.0085	Внешний диаметр оболочки

Таблица 7.19 – Атрибуты активной части твэла

Атрибут	Значение	Описание
Name	ActFuel	Идентификатор активной части твэла
Count	17	Общее число осевых ячеек в активной части твэла равно 17
Title	Reactor Core	Произвольное текстовое название элемента

Таблица 7.20 – Атрибуты осевых ячеек активной части твэла

Атрибут	Значение	Описание
Title	Cell N 3-20	Произвольное текстовое название осевой ячейки
Repeat	17	Число осевых ячеек данного типа равно 17

Таблица 7.21 – Геометрические параметры осевых ячеек активной части твэла

Атрибут	Значение	Описание
Height	0.05	Высота осевой ячейки
dmHole	0.0	Центральное отверстие отсутствует
dmPellet	0.007122	Внешний диаметр таблетки
dmGap	0.00736	Внутренний диаметр оболочки
dmCladding	0.0085	Внешний диаметр оболочки

Таблица 7.22 – Атрибуты нижнего торцевого экрана твэла

Атрибут	Значение	Описание
Name	BtmFuel	Идентификатор нижнего торцевого экрана
Count	1	Общее число осевых ячеек в нижнем торцевом экране равно 1
Title	Bottom fuel shield	Произвольное текстовое название элемента
IFUEL	UN	Материал топливной таблетки отличается от заданного в теге MainBERKUT
ICLAD	CHS68	Материал оболочки

Таблица 7.23 – Атрибуты осевой ячейки нижнего торцевого экрана твэла

Атрибут	Значение	Описание
Title	Cell N 2	Произвольное текстовое название осевой ячейки
Repeat	1	Число осевых ячеек данного типа равно 1

Таблица 7.24 – Геометрические параметры осевой ячейки нижнего торцевого экрана твэла

Атрибут	Значение	Описание
Height	0.3	Высота осевой ячейки
dmHole	0.0	Центральное отверстие отсутствует
dmPellet	0.007122	Внешний диаметр таблетки
dmGap	0.00736	Внутренний диаметр оболочки
dmCladding	0.0085	Внешний диаметр оболочки

Таблица 7.25 – Атрибуты нижнего компенсационного объёма твэла

Атрибут	Значение	Описание
Name	BtmVol	Идентификатор нижнего компенсационного объёма
Count	1	Общее число осевых ячеек в нижнем

		компенсационном объеме равно 1
Title	Bottom compensating volume	Произвольное текстовое название элемента

Таблица 7.26 – Радиальная сетка тепловой задачи в нижнем компенсационном объеме

Атрибут	Значение	Описание
cntHole	0	Центральное отверстие отсутствует
cntPell	0	Таблетка отсутствует
cntGap	24	В зазоре задано 24 радиальных слоя
cntClad	8	В оболочке задано 8 радиальных слоёв

Таблица 7.27 – Атрибуты осевой ячейки нижнего компенсационного объема твэла

Атрибут	Значение	Описание
Title	Cell N 1	Произвольное текстовое название осевой ячейки
Repeat	1	Число осевых ячеек данного типа равно 1

Таблица 7.28 – Геометрические параметры осевой ячейки нижнего компенсационного объема твэла

Атрибут	Значение	Описание
Height	0.442	Высота осевой ячейки
dmHole	0.0	Центральное отверстие отсутствует
dmPellet	0.0	Таблетка отсутствует
dmGap	0.00736	Внутренний диаметр оболочки
dmCladding	0.0085	Внешний диаметр оболочки

В таблицах 7.29–7.37 даны значения и описание атрибутов функции энерговыделения в твэле. Функция зависит от высоты твэла и времени.

Таблица 7.29 – Общие атрибуты функции энерговыделения в твэле

Атрибут	Значение	Описание
Class	TFun2D	Функция от $z$ и $t$
Name	RODHeater	Название функции
Time	Time	Имя временной составляющей
Space	Space	Имя пространственной составляющей

Таблица 7.30 – Атрибуты пространственной составляющей функции энерговыделения

Атрибут	Значение	Описание
---------	----------	----------

NPoint	15	Задано 15 точек по $z$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $z$

Таблица 7.31 – Атрибуты оси абсцисс пространственной составляющей функции энерговыделения

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.32 – Атрибуты оси ординат пространственной составляющей функции энерговыделения

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию
Unit	73000	Максимальное линейное энерговыделение

Таблица 7.33 – Значения абсцисс и ординат пространственной составляющей функции энерговыделения

$z$ , м	$f(z)$ , отн. ед.
0.4	0.0
0.742	0.0
0.742	0.56
0.847	0.77
0.962	0.9
1.052	0.97
1.092	0.99
1.167	1.0
1.242	0.985
1.352	0.91
1.452	0.8
1.552	0.63
1.592	0.54
1.592	0.0
2.0	0.0

Таблица 7.34 – Атрибуты временной составляющей функции энерговыделения

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	5	Задано 5 точек по $t$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $t$

Таблица 7.35 – Атрибуты оси абсцисс временной составляющей функции энерговыделения

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию
Unit	3600.0	Коэффициент перевода времени из часов в с

Таблица 7.36 – Атрибуты оси ординат временной составляющей функции энерговыделения

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.37 – Значения абсцисс и ординат временной составляющей функции энерговыделения

$t$ , ч.	$f(t)$ , отн. ед.
0.0	0.0
10.0	1.0
6240	0.904
8688	0.753
8698	0.0

В таблицах 7.38–7.93 даны значения и описание атрибутов функции температуры поверхности оболочки твэла. Функция имеет различные профили во времени, в том числе, участки нагрева и охлаждения. Поэтому данная функция определена через класс TFun2DSet, позволяющий задавать различные профили по высоте твэла в различные интервалы времени.

Таблица 7.38 – Общие атрибуты функции температуры поверхности оболочки твэла

Атрибут	Значение	Описание
Class	TFun2DSet	Задан набор двумерных функций, различных на разных временных отрезках
Name	CoolingFun	Название функции
Element	RODCooler	Имя элементов в наборе двумерных функций

Таблица 7.39 – Атрибуты функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 0 до 10 часов

Атрибут	Значение	Описание
Class	TFun2DZLin	Функция линейной интерполяции по времени

		между двумя профилями по $z$ .
Name	RODCooler	Название функции
Space	SpaceAtStart	Профиль в момент времени $t = 0$
Time	SpaceAtStop	Профиль в момент времени $t = 10$ ч.

Таблица 7.40 – Атрибуты начального момента времени TimeStart

Атрибут	Значение	Описание
Base	0.0	Величина, прибавляемая к Value
Value	0.0	Значение
Unit	3600.0	Коэффициент перевода часов в с
Name	Heating	Произвольное имя

Таблица 7.41 – Атрибуты конечного момента времени TimeStop

Атрибут	Значение	Описание
Base	0.0	Величина, прибавляемая к Value
Value	10.0	Значение
Unit	3600.0	Коэффициент перевода часов в с
Name	Heating	Произвольное имя

Таблица 7.42 – Атрибуты профиля SpaceAtStart, соответствующего начальному моменту времени

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	2	Задано 2 точки по $z$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $z$

Таблица 7.43 – Атрибуты оси абсцисс профиля SpaceAtStart

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.44 – Атрибуты оси ординат профиля SpaceAtStart

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.45 – Заданные значения абсцисс и ординат профиля SpaceAtStart

$z$ , м	$f(z)$ , К
0.0	673.0
2.0	673.0

Таблица 7.46 – Атрибуты профиля SpaceAtStop, соответствующего конечному моменту времени

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	14	Задано 14 точек по $z$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $z$

Таблица 7.47 – Атрибуты оси абсцисс профиля SpaceAtStop

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию
Base	-0.008	Из значения абсцисс вычитается 0,008 м

Таблица 7.48 – Атрибуты оси ординат профиля SpaceAtStop

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.49 – Заданные значения абсцисс и ординат профиля SpaceAtStop

$z$ , м	$f(z)$ , К
0.4	673.0
0.75	673.0
0.775	716.8
0.875	752.5
0.975	789.1
1.025	807.8
1.125	845.2
1.275	895.8
1.375	923.6
1.475	944.8
1.525	951.7
1.575	956.5
1.625	919.8
2.0	919.8

Таблица 7.50 – Атрибуты функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 10 до 8688 часов

Атрибут	Значение	Описание
Class	TFun2D	Функция от $z$ и $t$
Name	RODCooler	Название функции
Space	Space	Имя временной составляющей
Time	Time	Имя пространственной составляющей

Таблица 7.51 – Атрибуты начального момента времени TimeStart

Атрибут	Значение	Описание
Base	0.0	Величина, прибавляемая к Value
Value	10.0	Значение
Unit	3600.0	Коэффициент перевода часов в с
Name	OnPower	Произвольное имя

Таблица 7.52 – Атрибуты конечного момента времени TimeStop

Атрибут	Значение	Описание
Base	0.0	Величина, прибавляемая к Value
Value	8688.0	Значение
Unit	3600.0	Коэффициент перевода часов в с
Name	OnPower	Произвольное имя

Таблица 7.53 – Атрибуты пространственной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 10 до 8688 часов

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	14	Задано 14 точек по $z$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $z$
Base	-0.008	Из значения абсцисс вычитается 0,008 м

Таблица 7.54 – Атрибуты оси абсцисс пространственной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 10 до 8688 часов

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.55 – Атрибуты оси ординат пространственной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 10 до 8688 часов

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.56 – Значения абсцисс и ординат пространственной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 10 до 8688 часов

$z$ , м	$f(z)$ , К
0.4	673.0
0.75	673.0
0.775	716.8
0.875	752.5
0.975	789.1
1.025	807.8
1.125	845.2
1.275	895.8



1.375	923.6
1.475	944.8
1.525	951.7
1.575	956.5
1.625	919.8
2.0	919.8

Таблица 7.57 – Атрибуты временной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 10 до 8688 часов

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	2	Задано 2 точки по $t$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $t$

Таблица 7.58 – Атрибуты оси абсцисс временной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 10 до 8688 часов

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию
Unit	3600.0	Коэффициент перевода времени из часов в с

Таблица 7.59 – Атрибуты оси ординат временной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 10 до 8688 часов

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.60 – Значения абсцисс и ординат временной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 10 до 8688 часов

$t$ , ч.	$f(t)$ , отн. ед.
10	1.0
8688	1.0

Таблица 7.61 – Атрибуты функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8688 до 8698 часов

Атрибут	Значение	Описание
Class	TFun2DZLin	Функция линейной интерполяции по времени между двумя профилями по $z$ .
Name	RODCooler	Название функции
Space	SpaceAtStart	Профиль в момент времени $t = 8688$ ч.
Time	SpaceAtStop	Профиль в момент времени $t = 8698$ ч.

Таблица 7.62 – Атрибуты начального момента времени TimeStart

Атрибут	Значение	Описание
Base	0.0	Величина, прибавляемая к Value
Value	8688.0	Значение
Unit	3600.0	Коэффициент перевода часов в с
Name	Cooling	Произвольное имя

Таблица 7.63 – Атрибуты конечного момента времени TimeStop

Атрибут	Значение	Описание
Base	0.0	Величина, прибавляемая к Value
Value	8698.0	Значение
Unit	3600.0	Коэффициент перевода часов в с
Name	Cooling	Произвольное имя

Таблица 7.64 – Атрибуты профиля SpaceAtStart, соответствующего начальному моменту времени

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	14	Задано 14 точек по $z$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $z$

Таблица 7.65 – Атрибуты оси абсцисс профиля SpaceAtStart

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию
Base	-0.008	Из значения абсцисс вычитается 0,008 м

Таблица 7.66 – Атрибуты оси ординат профиля SpaceAtStart

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.67 – Заданные значения абсцисс и ординат профиля SpaceAtStart

$z$ , м	$f(z)$ , К
0.4	673.0
0.75	673.0
0.775	716.8
0.875	752.5
0.975	789.1
1.025	807.8
1.125	845.2
1.275	895.8
1.375	923.6

1.475	944.8
1.525	951.7
1.575	956.5
1.625	919.8
2.0	919.8

Таблица 7.68 – Атрибуты профиля SpaceAtStop, соответствующего конечному моменту времени

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	2	Задано 2 точки по $z$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $z$

Таблица 7.69 – Атрибуты оси абсцисс профиля SpaceAtStop

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.70 – Атрибуты оси ординат профиля SpaceAtStop

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.71 – Заданные значения абсцисс и ординат профиля SpaceAtStop

$z$ , м	$f(z)$ , К
0.0	673.0
2.0	673.0

Таблица 7.72 – Атрибуты функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8698 до 8708 часов

Атрибут	Значение	Описание
Class	TFun2DZLin	Функция линейной интерполяции по времени между двумя профилями по $z$
Name	RODCooler	Название функции
Space	SpaceAtStart	Профиль в момент времени $t = 8698$ ч.
Time	SpaceAtStop	Профиль в момент времени $t = 8708$ ч.

Таблица 7.73 – Атрибуты начального момента времени TimeStart

Атрибут	Значение	Описание
Base	0.0	Величина, прибавляемая к Value
Value	8698.0	Значение

Unit	3600.0	Коэффициент перевода часов в с
Name	CoolingUpToRoomTe	Произвольное имя

Таблица 7.74 – Атрибуты конечного момента времени TimeStop

Атрибут	Значение	Описание
Base	0.0	Величина, прибавляемая к Value
Value	8708.0	Значение
Unit	3600.0	Коэффициент перевода часов в с
Name	CoolingUpToRoomTe	Произвольное имя

Таблица 7.75 – Атрибуты профиля SpaceAtStart, соответствующего начальному моменту времени

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	2	Задано 2 точки по $z$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $z$

Таблица 7.76 – Атрибуты оси абсцисс профиля SpaceAtStart

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.77 – Атрибуты оси ординат профиля SpaceAtStart

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.78 – Заданные значения абсцисс и ординат профиля SpaceAtStart

$z$ , м	$f(z)$ , К
0.0	673.0
2.0	673.0

Таблица 7.79 – Атрибуты профиля SpaceAtStop, соответствующего конечному моменту времени

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	2	Задано 2 точки по $z$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $z$

Таблица 7.80 – Атрибуты оси абсцисс профиля SpaceAtStop

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.81 – Атрибуты оси ординат профиля SpaceAtStop

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.82 – Заданные значения абсцисс и ординат профиля SpaceAtStop

$z$ , м	$f(z)$ , К
0.0	293.0
2.0	293.0

Таблица 7.83 – Атрибуты функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8708 до 8718 часов

Атрибут	Значение	Описание
Class	TFun2D	Функция от $z$ и $t$
Name	RODCooler	Название функции
Space	Space	Имя временной составляющей
Time	Time	Имя пространственной составляющей

Таблица 7.84 – Атрибуты начального момента времени TimeStart

Атрибут	Значение	Описание
Base	0.0	Величина, прибавляемая к Value
Value	8708.0	Значение
Unit	3600.0	Коэффициент перевода часов в с
Name	RoomTe	Произвольное имя

Таблица 7.85 – Атрибуты конечного момента времени TimeStop

Атрибут	Значение	Описание
Base	0.0	Величина, прибавляемая к Value
Value	8718.0	Значение
Unit	3600.0	Коэффициент перевода часов в с
Name	RoomTe	Произвольное имя

Таблица 7.86 – Атрибуты пространственной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8708 до 8718 часов

Атрибут	Значение	Описание
---------	----------	----------

NPoint	2	Задано 2 точки по $z$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $z$

Таблица 7.87 – Атрибуты оси абсцисс пространственной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8708 до 8718 часов

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.88 – Атрибуты оси ординат пространственной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8708 до 8718 часов

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.89 – Значения абсцисс и ординат пространственной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8708 до 8718 часов

$z$ , м	$f(z)$ , К
0.0	293.0
2.0	293.0

Таблица 7.90 – Атрибуты временной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8708 до 8718 часов

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	2	Задано 2 точки по $t$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $t$

Таблица 7.91 – Атрибуты оси абсцисс временной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8708 до 8718 часов

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию
Unit	3600.0	Коэффициент перевода времени из часов в с

Таблица 7.92 – Атрибуты оси ординат временной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8708 до 8718 часов

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.93 – Значения абсцисс и ординат временной составляющей функции температуры поверхности оболочки твэла на временном интервале от 8708 до 8718 часов

$t$ , ч.	$f(t)$ , отн. ед.
8708	1.0
8718	1.0

В таблицах 7.94–7.102 даны значения и описание атрибутов функции скорости набора дозы оболочкой твэла. Функция зависит от высоты твэла и времени.

Таблица 7.94 – Общие атрибуты функции скорости набора дозы оболочкой твэла

Атрибут	Значение	Описание
Class	TFun2D	Функция от $z$ и $t$
Name	DPARate	Название функции
Time	Time	Имя временной составляющей
Space	Space	Имя пространственной составляющей

Таблица 7.95 – Атрибуты пространственной составляющей функции скорости набора дозы оболочкой твэла

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	15	Задано 15 точек по $z$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $z$

Таблица 7.96 – Атрибуты оси абсцисс пространственной составляющей функции скорости набора дозы оболочкой твэла

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.97 – Атрибуты оси ординат пространственной составляющей функции скорости набора дозы оболочкой твэла

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию

Таблица 7.98 – Значения абсцисс и ординат пространственной составляющей функции скорости набора дозы оболочкой твэла

$z$ , м	$f(z)$ , отн. ед.
0.4	0.0

0.742	0.0
0.742	0.56
0.847	0.77
0.962	0.9
1.052	0.97
1.092	0.99
1.167	1.0
1.242	0.985
1.352	0.91
1.452	0.8
1.552	0.63
1.592	0.54
1.592	0.0
2.0	0.0

Таблица 7.99 – Атрибуты временной составляющей функции скорости набора дозы оболочкой твэла

Атрибут	Значение	Описание
NPoint	4	Задано 4 точки по $t$
Class	TFunOfX	Функция одномерна по $t$

Таблица 7.100 – Атрибуты оси абсцисс временной составляющей функции скорости набора дозы оболочкой твэла

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию
Unit	3600.0	Коэффициент перевода времени из часов в с

Таблица 7.101 – Атрибуты оси ординат временной составляющей функции скорости набора дозы оболочкой твэла

Атрибут	Значение	Описание
Value	0.0	Значение по умолчанию
Unit	9.274e-7	Максимальная скорость набора дозы, сна/с

Таблица 7.102 – Значения абсцисс и ординат временной составляющей функции скорости набора дозы оболочкой твэла

$t, c$	$f(t)$ , отн. ед.
0.0	0.0
10.0	1.0
8688	1.0
8698	0.0



Вывод переменных в текстовые файлы осуществляется с помощью инструмента ControlFunc – контрольная функция. Для данной задачи выводились следующие параметры:

- максимальная температура в твэле;
- суммарная деформация оболочки в центральной осевой ячейке активной части твэла;
- объёмное распухание топлива в центральной осевой ячейке активной части твэла;
- абсолютный выход ГПД под оболочку.

Все значения контрольных функций выводятся в один выходной файл – NIMRHE2.dat.

На рисунках 7.4–7.9 представлен файл ввода исходных данных для моделирования испытаний твэлов со смешанным нитридным топливом в быстром натриевом реакторе ФЕНИКС.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<Task Version="3.2">
  <Main>
    <Description>NIMPHE-2 Experiment in PHENIX reactor</Description>
    <ModuleList SchemeType="Serial" Linking="Auto">
      <Module Name="CFunc"/>
      <Module Name="BERKUT"/>
    </ModuleList>
    <TimeTable StartTime="0.0" EndTime="3.2e7" DtStart="600.0">
      <TimeControl Start="0" DtMin="600.0" DtMax="600.0"
DtRestart="-1" DtPlot="3.6e3" DtCF="3.6e3"/>
      <TimeControl Start="36000.0" DtMin="18000.0" DtMax="18000.0"
DtRestart="-1" DtPlot="3.6e4" DtCF="3.6e4"/>
      <TimeControl Start="3.12768e7" DtMin="600.0" DtMax="600.0"
DtRestart="-1" DtPlot="3.6e3" DtCF="3.6e3"/>
    </TimeTable>
    <PlotList>
      <Plot Filter="+BERKUT"/>
    </PlotList>
  </Main>
  <!-- Задание данных для ТВЭЛЬНОГО модуля BERKUT-->
  <BERKUT>
    <!-- Global BERKUT parameters -->
    <MainBERKUT TRREF0="293.0" PGAP0="0.1e+06" TRSTART="673.0"
DPARate="DPARate" HeatPower="RODHeater" CoolTemp="RODCooler"
IFUEL="UPN" ICLAD="CHS68" IGAS="He"
PUPART="0.208" RELDENS="0.82" DBSVer="SMARTDBS">
    <Modules>
      <mdlHeat Use="1" GridType="GRD_DIST" iGapGasMix="0">
        <RadLayCount cntHole="2" cntPellet="20" cntGap="4" cntClad="8"/>
      </mdlHeat>
      <mdlMechanica Version="2" Use="1"
GridType="GRD_DIST" iPelSolid="1" iHardPCMI="0"
iPelEpsTh="1" iPelEpsSw="1" iPelEpsEl="1" iCladEpsTh="1"
iCladEpsSw="1" iCladEpsEl="1">
        <RadLayCount cntHole="0" cntPellet="10" cntGap="1" cntClad="4"/>
      </mdlMechanica>
      <mdlGFR Use="1">
        <RadLayCount cntHole="0" cntPellet="10" cntGap="0" cntClad="0"/>
      </mdlGFR>
    </Modules>
  </MainBERKUT>
  <!-- Fuel Rod Geometry -->
  <FuelRod Name="FR-NI24">

    <MeshSet Name="TopVol" Count="1" Title="Top compensating volume">
      <Modules>
        <mdlHeat>
          <RadLayCount cntHole="0" cntPellet="0" cntGap="24" cntClad
="8"/>
        </mdlHeat>
      </Modules>
      <Mesh Title="Cell N 22" Repeat="1">
        <Matter Height="0.1"
dmHole="0.0" dmPellet="0.0" dmGap="0.00736" dmCladding
="0.0085"/>
      </Mesh>
    </MeshSet>

```

Рисунок 7.4 – Файл ввода исходных данных для моделирования испытаний ТВЭЛОВ со смешанным нитридным топливом в быстром натриевом реакторе ФЕНИКС. Часть 1

```

    <MeshSet Name = "TopFuel" Count="1" Title="Top fuel shield" IFUEL = "UN"
ICLAD = "CHS68">
    <Mesh Title = "Cell N 21" Repeat="1">
        <Matter Height = "0.31"
            dmHole = "0.0" dmPellet = "0.007122" dmGap = "0.00736"
dmCladding = "0.0085" />
    </Mesh>
</MeshSet>

    <MeshSet Name = "ActFuel" Count="17" Title="Reactor Core">
    <Mesh Title = "Cell N 3-20" Repeat="17">
        <Matter Height = "0.05"
            dmHole = "0.0" dmPellet = "0.007122" dmGap = "0.00736"
dmCladding = "0.0085" />
    </Mesh>
</MeshSet>

    <MeshSet Name = "BtmFuel" Count="1" Title="Bottom fuel shield" IFUEL
="UN" ICLAD = "CHS68">
    <Mesh Title = "Cell N 2" Repeat="1">
        <Matter Height = "0.3"
            dmHole = "0.0" dmPellet = "0.007122" dmGap = "0.00736"
dmCladding = "0.0085" />
    </Mesh>
</MeshSet>

    <MeshSet Name = "BtmVol" Count="1" Title="Bottom compensating volume">
    <Modules>
    <mdlHeat>
        <RadLayCount cntHole = "0" cntPell = "0" cntGap = "24" cntClad
="8" />
    </mdlHeat>
    </Modules>
    <Mesh Title = "Cell N 1" Repeat="1">
        <Matter Height = "0.442"
            dmHole = "0.0" dmPellet = "0.0" dmGap = "0.00736" dmCladding
="0.0085" />
    </Mesh>
</MeshSet>
</FuelRod>
<!-- Boundary conditions and External Functions -->
<FuncBERKUT>
    <!--
$*****-->
    <!--Linear power in fuel rod as a function of t and z-->
    <RODHeater Class="TFun2D" Name="RODHeater" Time="Time" Space="Space">
    <Space NPoint = "15" Class="TFunOfX">
    <Coord Value="0.0">
        0.4 0.742 0.742 0.847 0.962 1.052 1.092 1.167 1.242
1.352 1.452 1.552 1.592 1.592 2.0
    </Coord>
    <Value Value="0.0" Unit="73000.0">
        0.0 0.0 0.56 0.77 0.9 0.97 0.99 1.0 0.985 0.91
0.8 0.63 0.54 0.0 0.0
    </Value>
    </Space>

```

Рисунок 7.5 – Файл ввода исходных данных для моделирования испытаний твэлов со смешанным нитридным топливом в быстром натриевом реакторе ФЕНИКС. Часть 2

```

<Time NPoint="5" Class="TFunOfX">
  <Coord Value="0.0" Unit="3600.0">
    0.0 10.0 6240 8688 8698
  </Coord>
  <Value Value="0.0">
    0.0 1.0 0.904 0.753 0.0
  </Value>
</Time>
</RODHeater>
<!--
$*****-->
<!--Surface temperature of cladding of fuel rod as a function of t and
z-->
<RODCooler Class="TFun2DSet" Name="CoolingFun" Element="RODCooler">
  <!--Heating-->
  <RODCooler Class="TFun2DZLin" Name="RODCooler" Space="SpaceAtStart"
Time="SpaceAtStop">

    <TimeStart Base="0.0" Value="0.0" Unit="3600.0" Name="Heating"/>
    <TimeStop Base="0.0" Value="10.0" Unit="3600.0" Name="Heating"/>

    <SpaceAtStart NPoint ="2" Class="TFunOfX">
      <Coord Value="0.0">
        0.0 2.0
      </Coord>
      <Value Value="0.0">
        673.0 673.0
      </Value>
    </SpaceAtStart>
    <SpaceAtStop NPoint="14" Class="TFunOfX">
      <Coord Value="0.0" Base="-0.008">
        0.4 0.75 0.775 0.875 0.975 1.025 1.125 1.275 1.375
1.475 1.525 1.575 1.625 2.0
      </Coord>
      <Value Value="0.0">
        673.0 673.0 716.8 752.5 789.1 807.8 845.2 895.8 923.6
944.8 951.7 956.5 919.8 919.8
      </Value>
    </SpaceAtStop>
  </RODCooler>
  <!--Nominal regime-->
  <RODCooler Class="TFun2D" Name="RODCooler" Time="Time" Space="Space">

    <TimeStart Base="0.0" Value="10.0" Unit="3600.0" Name="OnPower"/>
    <TimeStop Base="0.0" Value="8688" Unit="3600.0" Name="OnPower"/>

    <Space NPoint ="14" Class="TFunOfX">
      <Coord Value="0.0" Base="-0.008">
        0.4 0.75 0.775 0.875 0.975 1.025 1.125 1.275 1.375
1.475 1.525 1.575 1.625 2.0
      </Coord>
      <Value Value="0.0">
        673.0 673.0 716.8 752.5 789.1 807.8 845.2 895.8 923.6
944.8 951.7 956.5 919.8 919.8
      </Value>
    </Space>

```

Рисунок 7.6 – Файл ввода исходных данных для моделирования испытаний твэлов со смешанным нитридным топливом в быстром натриевом реакторе ФЕНИКС. Часть 3

```

<Time NPoint="2" Class="TFunOfX">
  <Coord Value="0.0" Unit="3600">
    10.0 8688
  </Coord>
  <Value Value="0.0">
    1.0 1.0
  </Value>
</Time>
</RODCooler>
<!--Cooling-->
<RODCooler Class="TFun2DZLin" Name="RODCooler" Space="SpaceAtStart"
Time="SpaceAtStop">

  <TimeStart Base="0.0" Value="8688" Unit="3600.0" Name="Cooling"/>
  <TimeStop Base="0.0" Value="8698" Unit="3600.0" Name="Cooling"/>

  <SpaceAtStart NPoint="14" Class="TFunOfX">
    <Coord Value="0.0" Base="-0.008">
      0.4 0.75 0.775 0.875 0.975 1.025 1.125 1.275 1.375
      1.475 1.525 1.575 1.625 2.0
    </Coord>
    <Value Value="0.0">
      673.0 673.0 716.8 752.5 789.1 807.8 845.2 895.8 923.6
      944.8 951.7 956.5 919.8 919.8
    </Value>
  </SpaceAtStart>
  <SpaceAtStop NPoint="2" Class="TFunOfX">
    <Coord Value="0.0">
      0.0 2.0
    </Coord>
    <Value Value="0.0">
      673.0 673.0
    </Value>
  </SpaceAtStop>
</RODCooler>
<!--Cooling up to room temperature-->
<RODCooler Class="TFun2DZLin" Name="RODCooler" Space="SpaceAtStart"
Time="SpaceAtStop">

  <TimeStart Base="0.0" Value="8698" Unit="3600.0"
Name="CoolingUpToRoomTe"/>
  <TimeStop Base="0.0" Value="8708" Unit="3600.0"
Name="CoolingUpToRoomTe"/>

  <SpaceAtStart NPoint="2" Class="TFunOfX">
    <Coord Value="0.0">
      0.0 2.0
    </Coord>
    <Value Value="0.0">
      673.0 673.0
    </Value>
  </SpaceAtStart>
  <SpaceAtStop NPoint="2" Class="TFunOfX">
    <Coord Value="0.0">
      0.0 2.0
    </Coord>

```

Рисунок 7.7 – Файл ввода исходных данных для моделирования испытаний твэлов со смешанным нитридным топливом в быстром натриевом реакторе ФЕНИКС. Часть 4

```

        <Value Value="0.0">
          293.0 293.0
        </Value>
      </SpaceAtStop>
    </RODCooler>
  <!--Room temperature-->
  <RODCooler Class="TFun2D" Name="RODCooler" Time="Time" Space="Space">

    <TimeStart Base="0.0" Value="8708" Unit="3600.0" Name="RoomTe"/>
    <TimeStop Base="0.0" Value="8718" Unit="3600.0" Name="RoomTe"/>

    <Space NPoint = "2" Class="TFunOfX">
      <Coord Value="0.0">
        0.0 2.0
      </Coord>
      <Value Value="0.0">
        293.0 293.0
      </Value>
    </Space>
    <Time NPoint="2" Class="TFunOfX">
      <Coord Value="0.0" Unit="3600">
        8708 8718
      </Coord>
      <Value Value="0.0">
        1.0 1.0
      </Value>
    </Time>
  </RODCooler>
</RODCooler>
<!--
$*****----->
  <!--Cladding dose rate as a function of t and z-->
  <DPARate Class="TFun2D" Name="DPARate" Time="Time" Space="Space">
    <Space NPoint = "15" Class="TFunOfX">
      <Coord Value="0.0">
        0.4 0.742 0.742 0.847 0.962 1.052 1.092 1.167 1.242
1.352 1.452 1.552 1.592 1.592 2.0
      </Coord>
      <Value Value="0.0">
        0.0 0.0 0.56 0.77 0.9 0.97 0.99 1.0 0.985 0.91
0.8 0.63 0.54 0.0 0.0
      </Value>
    </Space>
    <Time NPoint="4" Class="TFunOfX">
      <Coord Value="0.0" Unit="3600">
        0.0 10 8688 8698
      </Coord>
      <Value Value="0.0" Unit="9.274e-7">
        0.0 1.0 1.0 0.0
      </Value>
    </Time>
  </DPARate>
</FuncBERKUT>
  <!--Data printed-->
  <ControlFunc Name="MaxTemp" Func="0.0" Formula="maxArray(Te2D)"
OutFile="NIMPHE2-Res.dat">
    <Arg ShortName="Te2D" Module="BERKUT" LongName="FuelRod(FR-
NI24).Temperature2D"/>
  </ControlFunc>

```

Рисунок 7.8 – Файл ввода исходных данных для моделирования испытаний твэлов со смешанным нитридным топливом в быстром натриевом реакторе ФЕНИКС. Часть 5

```

    <ControlFunc Name="TotStrain" Func="0.0"
Formula="ElEps+ThEps+SwEps+RCrEps+TCrEps" OutFile="NIMPHE2-Res.dat">
    <Arg ShortName="ElEps" Module="BERKUT" LongName="FuelRod(FR-
NI24).ElasticRadStrain(11,8)"/>
    <Arg ShortName="ThEps" Module="BERKUT" LongName="FuelRod(FR-
NI24).ThermalRadStrain(11,8)"/>
    <Arg ShortName="SwEps" Module="BERKUT" LongName="FuelRod(FR-
NI24).SwellingRadStrain(11,8)"/>
    <Arg ShortName="RCrEps" Module="BERKUT" LongName="FuelRod(FR-
NI24).ThCreepRadStrain(11,8)"/>
    <Arg ShortName="TCrEps" Module="BERKUT" LongName="FuelRod(FR-
NI24).IrCreepRadStrain(11,8)"/>
    </ControlFunc>
    <ControlFunc Name="Swel" Func="0.0" Formula="Sw" OutFile="NIMPHE2-
Res.dat">
    <Arg ShortName="Sw" Module="BERKUT" LongName="FuelRod(FR-NI24).Fuel
Swelling(11)"/>
    </ControlFunc>
    <ControlFunc Name="FGRel" Func="0.0" Formula="FG" OutFile="NIMPHE2-
Res.dat">
    <Arg ShortName="FG" Module="BERKUT" LongName="FuelRod(FR-NI24).FG
Release"/>
    </ControlFunc>

</BERKUT>

</Task>

```

Рисунок 7.9 – Файл ввода исходных данных для моделирования испытаний твэлов со смешанным нитридным топливом в быстром натриевом реакторе ФЕНИКС. Часть 6

#### 7.1.4 Выходные файлы и результаты расчёта

При расчёте задачи NIMPHE2 формируются следующие выходные файлы:

- NIMPHE2.msg – содержит весь протокол информационных сообщений, включая ошибки, диагностические сообщения, события и информационные сообщения;
- NIMPHE2.plt – содержит расчётные данные для просмотра постпроцессором;
- NIMPHE2.rst – файл записей рестартов;
- NIMPHE2.plt~, NIMPHE2.rst~ – вспомогательные файлы интегрирующей оболочки;
- NIMPHE2-Res.dat – содержит текстовый вывод значений максимальной температуры в твэле, выхода ГПД под оболочку, распухания топлива в центральной осевой ячейке, общей деформации оболочки в центральной осевой ячейке.

На рисунке 7.10 представлен фрагмент файла диагностики NIMPHE2.msg, содержащего сообщения программы при расчёте описанной задачи.

```

26 Jul 2019 - 13:15:34 - info      : using default module step type "Common".
26 Jul 2019 - 13:15:34 - info      : using default plot file name "NIMPHE2.plt".
26 Jul 2019 - 13:15:34 - info      : using default restart file name "NIMPHE2.rst".
26 Jul 2019 - 13:15:34 - info      : Automatically connecting module "BERKUT" to "CFunc" at port "CFunc" type "CFunc 3.4 Arg".
26 Jul 2019 - 13:15:34 - info      : Automatically connecting module "BERKUT" to "CFunc" at port "CFunc" type "CFunc 3.4 Const".
26 Jul 2019 - 13:15:34 - info      : Automatically connecting module "BERKUT" to "CFunc" at port "CFunc" type "CFunc 3.4 Extension".
26 Jul 2019 - 13:15:34 - info      : Automatically connecting module "BERKUT" to "CFunc" at port "CFunc" type "CFunc 3.4 Func".
BERKUT: BERKUT input file opening is OK
BERKUT: SmartDB loading
BERKUT: BERKUT Input Reading OK
26 Jul 2019 - 13:15:48 - info      : Starting from the beginning, time = 0.
26 Jul 2019 - 13:15:49 - log       : Restart saved (time = 0).
26 Jul 2019 - 13:15:49 - log       CFunc: writing control functions (time = 0).
26 Jul 2019 - 13:15:49 - log       : Plot group 1 saved (time = 0).
26 Jul 2019 - 13:15:49 - log       : Beginning step 0, time = 0, dt = 600
26 Jul 2019 - 13:15:49 - log       : Beginning step 1, time = 600, dt = 600
BERKUT: /FR-NI24: Iterations with dt=0.789523, Numiter=0

26 Jul 2019 - 13:15:50 - info      BERKUT: /FR-NI24: Iterations with dt=44.765084, Numiter=115

26 Jul 2019 - 13:15:50 - log       : Beginning step 2, time = 1200, dt = 600
26 Jul 2019 - 13:15:50 - info      BERKUT: /FR-NI24: Iterations with dt=0.786010, Numiter=0

26 Jul 2019 - 13:15:51 - info      BERKUT: /FR-NI24: Iterations with dt=47.628282, Numiter=113

26 Jul 2019 - 13:15:51 - log       : Beginning step 3, time = 1800, dt = 600
26 Jul 2019 - 13:15:51 - info      BERKUT: /FR-NI24: Iterations with dt=0.782504, Numiter=0

26 Jul 2019 - 13:15:52 - info      BERKUT: /FR-NI24: Iterations with dt=50.288055, Numiter=112

26 Jul 2019 - 13:15:52 - log       : Beginning step 4, time = 2400, dt = 600
26 Jul 2019 - 13:15:52 - info      BERKUT: /FR-NI24: Iterations with dt=0.779030, Numiter=0

26 Jul 2019 - 13:15:53 - info      BERKUT: /FR-NI24: Iterations with dt=53.117793, Numiter=110

26 Jul 2019 - 13:15:53 - log       : Beginning step 5, time = 3000, dt = 600
26 Jul 2019 - 13:15:53 - info      BERKUT: /FR-NI24: Iterations with dt=0.775589, Numiter=0

26 Jul 2019 - 13:15:54 - info      BERKUT: /FR-NI24: Iterations with dt=2.250335, Numiter=109

```

Рисунок 7.10 – Фрагмент файла диагностики NIMPHE2.msg

На рисунке 7.11 представлен фрагмент файла выходных данных NIMPHE2.dat.

```

values CF (formulas). Formulas and arguments:
-----
Function: MaxTemp
Formula: maxArray(Te2D)
Function: TotStrain
Formula: E1Eps+ThEps+SwEps+RCrEps+TCrEps
----- Argument: E1Eps Variable: FuelRod(FR-NI24).Cladding_ElasticRadStrain(11,8)
----- Argument: ThEps Variable: FuelRod(FR-NI24).Cladding_ThermalRadStrain(11,8)
----- Argument: SwEps Variable: FuelRod(FR-NI24).Cladding_SwellingRadStrain(11,8)
----- Argument: RCrEps Variable: FuelRod(FR-NI24).Cladding_ThCreepRadStrain(11,8)
----- Argument: TCrEps Variable: FuelRod(FR-NI24).Cladding_IrCreepRadStrain(11,8)
Function: Swel
Formula: Sw
----- Argument: Sw Variable: FuelRod(FR-NI24).FuelSwelling(11)
Function: FGRel
Formula: FG
----- Argument: FG Variable: FuelRod(FR-NI24).FGRelease
-----

```

time	MaxTemp	TotStrain	Swel	FGRel
0.000000E+000	0.0000E+000	0.0000E+000	0.0000E+000	0.0000E+000
3.600000E+003	8.2010E+002	6.7939E-003	1.3515E-002	9.2996E-015
7.200000E+003	1.0074E+003	7.1019E-003	1.8738E-002	7.8067E-013
1.080000E+004	1.1695E+003	7.4135E-003	2.3593E-002	8.9342E-012
1.440000E+004	1.3151E+003	7.7289E-003	2.8193E-002	4.8276E-011
1.800000E+004	1.4493E+003	8.0480E-003	3.2620E-002	1.7763E-010
2.160000E+004	1.5750E+003	8.3672E-003	3.6913E-002	5.1708E-010
2.520000E+004	1.6943E+003	8.6932E-003	4.1107E-002	1.2856E-009
2.880000E+004	1.8090E+003	9.0176E-003	4.5240E-002	2.8543E-009
3.240000E+004	1.9192E+003	9.3447E-003	4.9315E-002	5.8185E-009
3.600000E+004	2.0255E+003	9.6764E-003	5.3341E-002	1.0830E-007
7.200000E+004	2.0580E+003	9.7485E-003	5.5054E-002	6.9909E-007
1.080000E+005	2.0552E+003	9.7232E-003	5.5710E-002	1.4593E-006
1.440000E+005	2.0523E+003	9.6851E-003	5.6233E-002	2.2240E-006
1.800000E+005	2.0496E+003	9.6569E-003	5.6692E-002	3.0074E-006
2.160000E+005	2.0471E+003	9.6348E-003	5.7112E-002	3.7942E-006
2.520000E+005	2.0448E+003	9.6168E-003	5.7504E-002	4.5931E-006
2.880000E+005	2.0426E+003	9.6018E-003	5.7874E-002	5.4121E-006
3.240000E+005	2.0405E+003	9.5889E-003	5.8226E-002	6.2745E-006
3.600000E+005	2.0385E+003	9.5776E-003	5.8562E-002	7.1269E-006

Рисунок 7.11 – Фрагмент файла выходных данных NIMPHE2.dat



На рис. 7.12 представлены результаты расчётов и измерений выгорания топлива в эксперименте NIMPHE-2. Наблюдается хорошее согласие результатов расчёта с экспериментом: измеренное значение максимального выгорания – 5,8% т. ат., расчётное – 5,58% т. ат. Относительное отклонение экспериментальных и расчётных данных по выгоранию топлива не превышает 5%. Удовлетворительное согласие результатов расчёта с экспериментом наблюдается по объёмному распуханию топлива (рисунок 7.13). Относительное отклонение расчётных и экспериментальных данных не превышает 10% при точности используемой корреляции ~ 25÷30%.

Оба представленных графика получены с помощью пост-процессора системной оболочки SMART\_LM.

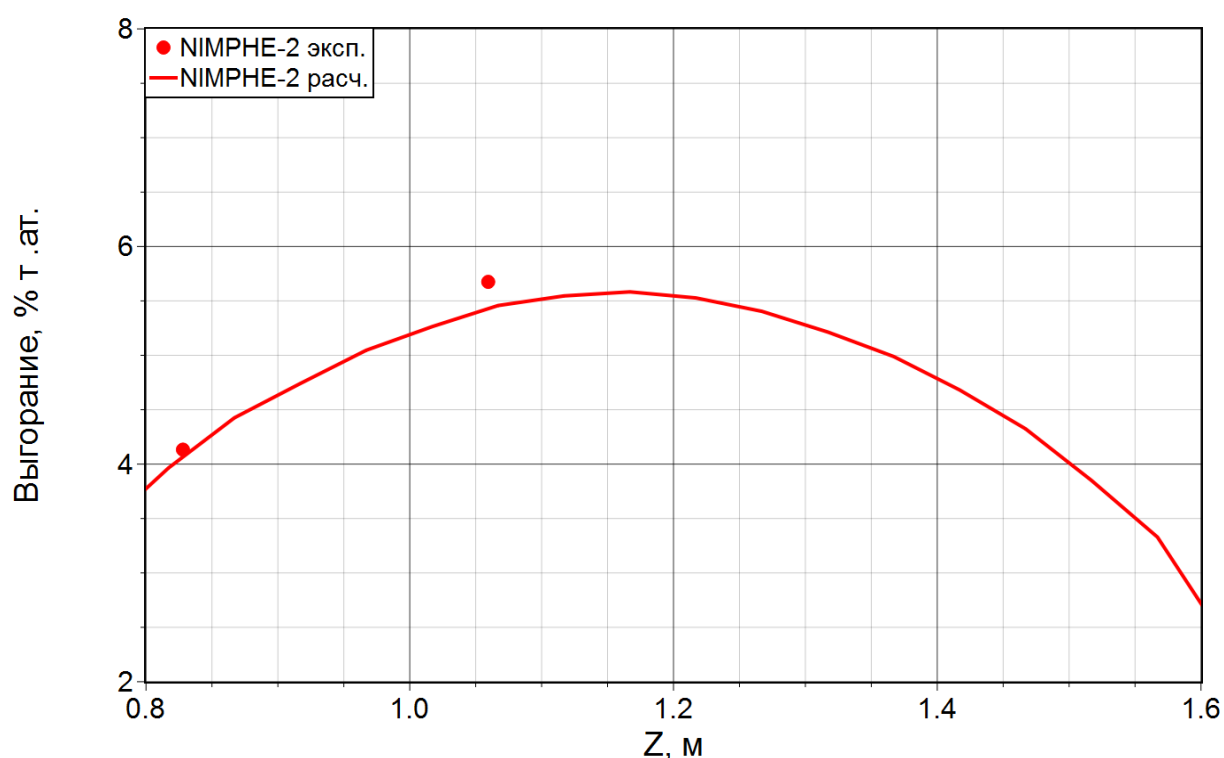


Рисунок 7.12 – Распределение выгорания топлива по высоте твэла в эксперименте NIMPHE-2

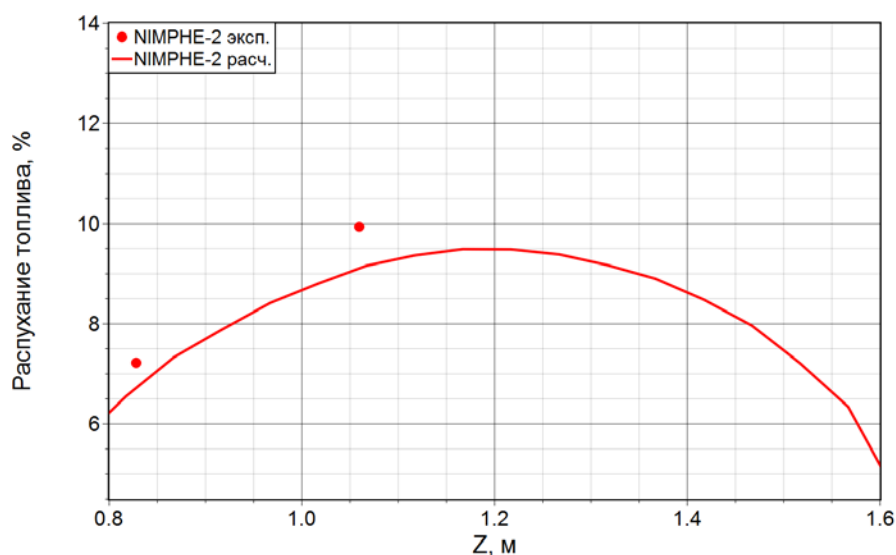


Рисунок 7.13 – Распределение объёмного распухания топлива по высоте твэла в эксперименте NIMPHE-2

## 7.2 Интегральный расчет реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем BR-NPP-simulator

В данном подразделе представлен пример моделирования кодом ЕВКЛИД/V1 линейного снижения мощности с выходом на новое стационарное значение реакторной установки на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем.

### 7.2.1 Постановка задачи

Представлена модельная задача для демонстрации связного расчета интегральным кодом ЕВКЛИД/V1. Рассматривается активная зона реакторной установки с реактором на быстрых нейтронах с модельным первым контуром. Работа второго контура моделируется соответствующим граничным условием. Производится поканальный расчёт активной зоны, состоящей из 169 ТВС, и свинцового отражателя. В каждом теплогидравлическом канале с ТВС моделируется один эквивалентный твэл.

### 7.2.2 Файл входных данных

Далее представлен входной файл в спецификации XML (BR-NPP-simulator.xml), который содержит значения всех входных параметров, необходимых для проведения расчётов модулями. Перед тегами, которые требуют более детального пояснения, приведены соответствующие комментарии.

На рисунке 7.14 представлена заголовочная часть входного файла BR-NPP-simulator.xml со списком участвующих в расчёте модулей.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<Task Version="3.2">
  <!-- Общие параметры для расчета кодом Euclid-->
  <Main PlotFileName="BR-NPP-simulator.plt" RestartFileName="BR-NPP-simulator.rst">
    <Description>Test Example XML file for code Euclid</Description>
    <ModuleList SchemeType="Serial" Linking="Auto">
      <Module Name="CFunc"/>
      <Module Name="DN3D"/>
      <Module Name="BERKUT"/>
      <Module Name="Hydra"/>
    </ModuleList>
  </Main>
</Task>

```

Рисунок 7.14 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

### Часть 1

Расчет начинается при  $t = -100,0$  с ( $StartTime="-100.0"$ , атрибут тега `TimeTable`). Заканчивается при  $t = 200,0$  с ( $EndTime="200.0"$ , атрибут тега `TimeTable`). Данный входной файл настроен так, чтобы начало расчета нестационарной задачи приходилось на  $t = 0,0$  с. Так как для начала расчета динамического режима необходимо получить стационарное распределение теплогидравлических и нейтронно-физических параметров, то первые  $100,0$  с расчета при вызове нейтронно-физического модуля используется решение условно-критического уравнения переноса нейтронов (первые  $100,0$  с расчета интегральная мощность остается постоянной). Запись в плот-файл на отрезке времени  $[-100,0, 0,0]$  осуществляется каждую секунду ( $DtPlot="1.0"$ , атрибут тега `TimeControl`), на отрезке времени  $[0,0, 5,0]$  – каждую  $0,01$  с ( $DtPlot="0.01"$ ). Запись в рестарт-файл на всех временных отрезках осуществляется каждые  $20,0$  с ( $DtRestart="20.0"$ , атрибут тега `TimeControl`). В теге `PlotList` перечислены плот-переменные, которые необходимо вывести в плот-файл. В приведенном примере нейтронно-физические и теплогидравлические характеристики выводятся в полном объеме, для твэлов выводятся только результаты решения тепловой задачи. Пример заполнения тегов `TimeTable` и `PlotList` представлен на рисунке 7.15.

```

<TimeTable StartTime="-100.0" EndTime="200.0" DtStart="1.0e-2">
  <TimeControl Start="-100.0" DtMax="0.01" DtMin="1.0e-6" DtRestart="20.0" DtPlot="1.0"
DtOutput="0.5" DtCF="0.5"/>
  <TimeControl Start="0.0" DtMax="0.01" DtMin="1.0e-6" DtRestart="20.0" DtPlot="0.1"
DtOutput="0.1" DtCF="0.1"/>
  <TimeControl Start="5.0" DtMax="0.01" DtMin="1.0e-6" DtRestart="20.0" DtPlot="1.0"
DtOutput="1.0" DtCF="1.0"/>
  <TimeControl Start="20.0" DtMax="0.01" DtMin="1.0e-6" DtRestart="20.0" DtPlot="1.0"
DtOutput="1.0" DtCF="1.0"/>
  <TimeControl Start="200.0" DtMax="0.01" DtMin="1.0e-6" DtRestart="20.0" DtPlot="1.0"
DtOutput="1.0" DtCF="1.0"/>
</TimeTable>
<PlotList>
  <Plot Filter="+BERKUT/Thermal"/>
  <Plot Filter="+Hydraulics"/>
  <Plot Filter="+Neutronics"/>
  <Plot Filter="+ControlFunctions"/>
</PlotList>
</Main>

```

Рисунок 7.15 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

### Часть 2

На рисунке 7.16 приведён пример задания картограммы а.з. в файле BR-NPP-simulator.xml. В атрибутах тега Core заданы уникальное имя а.з. (Name) – TestCore, шаг ТВС в а.з. (FAPitch), равный 17,77 см, шаг твэлов в ТВС (FRPitch), равный 1,34 см, число аксиальных ячеек в теплогидравлической расчётной модели (NCellHydra), равное 27, длина теплогидравлических каналов (зон) в а.з. (LengthHydra), равная 2,7 м, длина модельных твэлов (LengthHeat), равная 2,1 м, и координата начала твэлов в теплогидравлических каналах а.з. (XHeat), равная 0,5 м. Сама картограмма заведена в теге LoadТНМАР. Теплогидравлические зоны, имя которых начинается с «1» относятся к центральной подзоне, с «2» – периферийной подзоне, с «3» – свинцовому отражателю. «0» обозначена граница а.з.

```
<Core Name="TestCore" FAPitch = "0.1777" FRPitch = "0.0134" NCellHydra="27" LengthHydra="2.7"
LengthHeat="2.1" XHeat="0.5">
  <LoadТНМАР>
    27      14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16 15 14
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 304 304 304 304 304 304 304 304 304 0 0 0 0 0
          0 0 0 304 304 301 301 301 301 301 301 301 301 304 304 0 0 0
          0 0 304 304 301 301 301 301 301 301 301 301 301 301 304 304 0 0
          0 0 304 301 301 301 300 301 301 300 301 301 300 301 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 300 263 264 265 266 267 268 269 228 300 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 301 262 222 223 224 225 226 227 192 229 301 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 301 261 221 187 188 189 190 191 162 193 230 301 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 300 260 220 186 158 159 160 161 138 163 194 231 300 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 301 259 219 185 157 135 136 137 120 139 164 195 232 301 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 301 258 218 184 156 134 118 119 108 121 140 165 196 233 301 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 300 257 217 183 155 133 117 107 102 109 122 141 166 197 234 300 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 256 216 182 154 132 116 106 101 103 110 123 142 167 198 235 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 300 255 215 181 153 131 115 105 104 111 124 143 168 199 236 300 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 301 254 214 180 152 130 114 113 112 125 144 169 200 237 301 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 301 253 213 179 151 129 128 127 126 145 170 201 238 301 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 300 252 212 178 150 149 148 147 146 171 202 239 300 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 301 251 211 177 176 175 174 173 172 203 240 301 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 301 250 210 209 208 207 206 205 204 241 301 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 300 249 248 247 246 245 244 243 242 300 301 301 304 0 0
          0 0 304 301 301 301 300 301 301 300 301 301 300 301 301 301 304 0 0
          0 0 304 304 301 301 301 301 301 301 301 301 301 301 301 304 304 0 0
          0 0 304 304 301 301 301 301 301 301 301 301 301 301 304 304 0 0
          0 0 0 0 0 304 304 304 304 304 304 304 304 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
  </LoadТНМАР>

```

Рисунок 7.16 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

### Часть 3

После тега LoadТНМАР следует набор тегов Zone с описанием теплогидравлических зон, представленных на картограмме, в которых указаны тип ТВС в данной зоне (тег FuelAssemblyList) и величина локальных сопротивлений (тег LocalResistance), отвечающих за гидравлическое профилирование а.з. На рисунке 7.17 представлена часть описания теплогидравлических зон, остальные зоны заводятся по аналогии. Полностью описание каналов а.з. в терминах входного файла кода ЕВКЛИД/VI приведено в тестовом входном файле BR-NPP-simulator.xml.

```
<Zone Name = "101"> <FuelAssemblyList Name = "ROAZ"/>
  <LocalResistance Name="101_LR_ROAZ" X="0.1" DirectResistance="800.0"
InverseResistance="800.0"/>
  <LocalResistance Name="101_LR_ROAZout" X="2.6" DirectResistance="800.0"
InverseResistance="800.0"/>
</Zone>

```

```

    <Zone Name = "102"> <FuelAssemblyList Name = "CB"/>
    <LocalResistance Name="102_LR_CB" X="0.1" DirectResistance="80.0"
InverseResistance="80.0"/>
    <LocalResistance Name="102_LR_CBout" X="2.6" DirectResistance="80.0"
InverseResistance="80.0"/>
  </Zone>
  <Zone Name = "103"> <FuelAssemblyList Name = "CB"/>
  <LocalResistance Name="103_LR_CB" X="0.1" DirectResistance="80.0"
InverseResistance="80.0"/>
  <LocalResistance Name="103_LR_CBout" X="2.6" DirectResistance="80.0"
InverseResistance="80.0"/>
  </Zone>
  ...
  ...
  <Zone Name = "268">
    <FuelAssemblyList Name = "PB"/>
    <LocalResistance Name="268_LR_PB" X="0.1" DirectResistance="80.0"
InverseResistance="80.0"/>
    <LocalResistance Name="268_LR_PBout" X="2.6" DirectResistance="80.0"
InverseResistance="80.0"/>
  </Zone>
  <Zone Name = "269">
    <FuelAssemblyList Name = "PB"/>
    <LocalResistance Name="269_LR_PB" X="0.1" DirectResistance="80.0"
InverseResistance="80.0"/>
    <LocalResistance Name="269_LR_PBout" X="2.6" DirectResistance="80.0"
InverseResistance="80.0"/>
  </Zone>
  <Zone Name = "300">
    <FuelAssemblyList Name = "PFR"/>
    <Section CellNumber="8" Void="0.0">
      <NCG Name="Ar" Xgas="1.0" Xfluid="0.0"></NCG>
    </Section>
    <Section CellNumber="1" Void="0.5" Pressure="1.0e5">
      <NCG Name="Ar" Xgas="1.0" Xfluid="0.0"></NCG>
    </Section>
    <Section CellNumber="18" Void="1.0" Pressure="1.0e5">
      <NCG Name="Ar" Xgas="1.0" Xfluid="0.0"></NCG>
    </Section>
  </Zone>
  <Zone Name = "301">
    <FuelAssemblyList Name = "BVO_1"/>
    <LocalResistance Name="LR_BVO_1" X="0.1" DirectResistance="3500."
InverseResistance="3500."/>
    <LocalResistance Name="LR_BVO_lout" X="2.6" DirectResistance="3500."
InverseResistance="3500."/>
  </Zone>

```

Рисунок 7.17 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

#### Часть 4

Следует обратить внимание на пример задания теплогидравлических каналов СПОС (Zone Name = "300"), отвечающих за обратную связь между расходом теплоносителя через а.з. и мощностью (реактивностью). В данных каналах в исходном состоянии столб свинца находится на уровне низа а.з. (8 аксиальных ячеек), остальной объём занят аргоном. После включения расхода на полную мощность уровень свинца поднимается до верха а.з.

Ниже приведено описание используемых в тестовом примере типов ТВС и твэлов (Рисунок 7.18). В частности, указываются имена ТВС, общее число твэлов в них (169 в ТВС центральной и периферийной подзон и 108 в ТВС с РО СУЗ, в каналах свинцового отражателя и СПОС твэлы отсутствуют), имена типов твэлов, число твэлов определённого

типа в ТВС, внешний диаметр твэлов (0,0097 м для твэлов центральной подзоны и 0,0105 м для твэлов периферийной подзоны) и их длина (2,1 м).

```
<!--Assembly List-->
<FuelAssembly Name = "BVO_1" >
</FuelAssembly>

<FuelAssembly Name = "CB" NumberRod = "169">
  <FuelRodList Name = "FR-CB" Number = "169" KPower = "1.0"/>
</FuelAssembly>

<FuelAssembly Name = "PB" NumberRod = "169">
  <FuelRodList Name = "FR-PB" Number = "169" KPower = "1.0"/>
</FuelAssembly>

<FuelAssembly Name = "ROAZ" NumberRod = "108">
  <FuelRodList Name = "FR-CB" Number = "108" KPower = "1.0"/>
</FuelAssembly>

<FuelAssembly Name = "ROKR" NumberRod = "108">
  <FuelRodList Name = "FR-CB" Number = "108" KPower = "1.0"/>
</FuelAssembly>

<FuelAssembly Name = "ROAR" NumberRod = "108">
  <FuelRodList Name = "FR-CB" Number = "108" KPower = "1.0"/>
</FuelAssembly>

<FuelAssembly Name = "PFR" >
</FuelAssembly>

<FuelRod Name="FR-CB" Diameter="0.0097" LengthHeat="2.1"/>
<FuelRod Name="FR-PB" Diameter="0.0105" LengthHeat="2.1"/>
</Core>
```

Рисунок 7.18 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

### Часть 5

На рисунке 7.19 представлено описание блока MainBERKUT твэльного модуля БЕРКУТ. В данном расчёте моделируется поведение твэлов со ЧУП топливом (IFUEL="UPN") и оболочкой из стали ЭП-823 (ICLAD="EP823"). В качестве газа закачки используется гелий (IGAS="He"). Начальная температура твэлов задана равной 693 К (TRSTART), давление – 1 атм. (PGAP0). Содержание плутония в топливе составляет 13,2 мас. % (PUPART), относительная плотность топлива – 0,85% теор. (RELDENS). В расчётах используются свойства материалов из базы данных SmartDB (DBSVer="SMARTDBS").

В расчётах данного примера используются только тепловой и механический модули (Use="1"). В каждом из них заданы радиальные сетки и дополнительные атрибуты расчёта соответствующих задач. В частности, влияние выхода ГПД на теплопроводность газового зазора не учитывается (iGapGasMix="0"), используется версия механического модуля «2», в которой моделируется НДС многослойной оболочки и рассчитываются только термические деформации и деформации распухания для топлива.

В модуле BERKUT в теге Parallel включен режим многопоточных вычислений (OMP\_NTR="6").

```

<BERKUT>
<Parallel OMP_NTR="6"/>
<!-- Задание данных для твэльного модуля BERKUT-->
<MainBERKUT TRREF0="293.0" PGAP0="0.1e+06" TRSTART="693.0"
  IFUEL="UPN" ICLAD="EP823" IGAS="He"
  PUPART="0.132" RELDENS="0.85" DBSVer="SMARTDBS">
<Modules>
  <mdlHeat Use="1" GridType="GRD_DIST" iGapGasMix="0">
    <RadLayCount cntHole="0" cntPelL="10" cntGap="2" cntClad="4"/>
  </mdlHeat>

  <mdlMechanica Version="2" Use="1"
    GridType="GRD_DIST" iPelSolid="1" iHardPCMI="0"
    iPelEpsTh="1" iPelEpsSw="1" iPelEpsEl="1" iCladEpsTh="
"1"
    iCladEpsSw="1" iCladEpsEl="1">
    <RadLayCount cntHole="0" cntPelL="10" cntGap="1" cntClad="4"/>
  </mdlMechanica>

  <mdlMFPR Use="0" GridType="GRD_VOL">
    <RadLayCount cntHole="0" cntPelL="4" cntGap="1" cntClad="1"/>
  </mdlMFPR>

  <mdlGFR Use="0">
    <RadLayCount cntHole="0" cntPelL="10" cntGap="0" cntClad="0"/>
  </mdlGFR>
</Modules>
</MainBERKUT>

```

Рисунок 7.19 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

## Часть 6

Далее определяется детальная расчётная схема твэлов типа FR-CB и FR-PB (Рисунок 7.20): задаются геометрические параметры и разбиение на аксиальные расчётные ячейки верхнего и нижнего компенсационных объёмов, верхнего и нижнего торцевых экранов, активной части. В компенсационных объёмах заведена индивидуальная радиальная расчётная сетка. В обоих типах твэлов выделено по 21 аксиальной ячейке высотой 10 см: 11 ячеек приходится на активную часть и торцевые экраны, 3 и 7 аксиальных ячеек – на нижний и верхний компенсационные объёмы соответственно. Твэлы типов FR-CB и FR-PB отличаются только внешним диаметром оболочки (9,7 и 10,5 мм) и диаметром топливного столба (8,5 и 9,3 мм). Центральное отверстие в таблетках обоих типов твэлов отсутствует.

```

<FuelRod Name="FR-CB">
  <MeshSet Name="TopVol" Count="7" Title="Top compensating volume">
    <Modules>
      <mdlHeat>
        <RadLayCount cntHole="0" cntPelL="0" cntGap="12" cntClad="4"/>
      </mdlHeat>
    </Modules>
    <Mesh Title="Cell N 16-17 (2) TCV" Repeat="7">
      <Matter Height="0.1">

```

```

    dmHole ="0.0" dmPellet ="0.0" dmGap ="8.7d-03" dmCladding ="9.7d-03"/>
  </Mesh>
</MeshSet>
<MeshSet Name ="TopFuel" Count="1" Title="Top fuel shield" >
  <Mesh Title = "Cell N 15-15 (1) TCV" Repeat="1">
    <Matter Height = "0.1"
      dmHole ="0.0" dmPellet ="8.5d-03" dmGap ="8.7d-03" dmCladding ="9.7d-03"/>
  </Mesh>
</MeshSet>
<MeshSet Name ="ActFuel" Count="9" Title="Reactor Core">
  <Mesh Title = "Cell N 4-14 (11) AF" Repeat="9">
    <Matter Height = "0.1"
      dmHole ="0.0" dmPellet ="8.5d-03" dmGap ="8.7d-03" dmCladding ="9.7d-03"/>
  </Mesh>
</MeshSet>
<MeshSet Name ="BtmFuel" Count="1" Title="Bottom fuel shield" >
  <Mesh Title = "Cell N 3-3 (1) BCV" Repeat="1">
    <Matter Height = "0.1"
      dmHole ="0.0" dmPellet ="8.5d-03" dmGap ="8.7d-03" dmCladding ="9.7d-03"/>
  </Mesh>
</MeshSet>
<MeshSet Name ="BtmVol" Count="3" Title="Bottom compensating volume">
  <Modules>
    <mdlHeat>
      <RadLayCount cntHole ="0" cntPell ="0" cntGap ="12" cntClad ="4"/>
    </mdlHeat>
  </Modules>
  <Mesh Title = "Cell N 1-2 (2) BCV" Repeat="3">
    <Matter Height = "0.1"
      dmHole ="0.0" dmPellet ="0.0" dmGap ="8.7d-03" dmCladding ="9.7d-03"/>
  </Mesh>
</MeshSet>
</FuelRod>
<FuelRod Name="FR-PB">
  <MeshSet Name ="TopVol" Count="7" Title="Top compensating volume">
    <Modules>
      <mdlHeat>
        <RadLayCount cntHole ="0" cntPell ="0" cntGap ="12" cntClad ="4"/>
      </mdlHeat>
    </Modules>
    <Mesh Title = "Cell N 16-17 (2) TCV" Repeat="7">
      <Matter Height = "0.1"
        dmHole ="0.0" dmPellet ="0.0" dmGap ="9.5d-03" dmCladding ="10.5d-03"/>
    </Mesh>
  </MeshSet>
  <MeshSet Name ="TopFuel" Count="1" Title="Top fuel shield">
    <Mesh Title = "Cell N 15-15 (1) TCV" Repeat="1">
      <Matter Height = "0.1"
        dmHole ="0.0" dmPellet ="9.3d-03" dmGap ="9.5d-03" dmCladding ="10.5d-03"/>
    </Mesh>
  </MeshSet>
  <MeshSet Name ="ActFuel" Count="9" Title="Reactor Core">
    <Mesh Title = "Cell N 4-14 (11) AF" Repeat="9">
      <Matter Height = "0.1"
        dmHole ="0.0" dmPellet ="9.3d-03" dmGap ="9.5d-03" dmCladding ="10.5d-03"/>
    </Mesh>
  </MeshSet>
  <MeshSet Name ="BtmFuel" Count="1" Title="Bottom fuel shield">
    <Mesh Title = "Cell N 3-3 (1) BCV" Repeat="1">
      <Matter Height = "0.1"
        dmHole ="0.0" dmPellet ="9.3d-03" dmGap ="9.5d-03" dmCladding ="10.5d-03"/>
    </Mesh>
  </MeshSet>
  <MeshSet Name ="BtmVol" Count="3" Title="Bottom compensating volume">
    <Modules>
      <mdlHeat>
        <RadLayCount cntHole ="0" cntPell ="0" cntGap ="12" cntClad ="4"/>
      </mdlHeat>
    </Modules>
    <Mesh Title = "Cell N 1-2 (2) BCV" Repeat="3">
      <Matter Height = "0.1"
        dmHole ="0.0" dmPellet ="0.0" dmGap ="9.5d-03" dmCladding ="10.5d-03"/>
    </Mesh>
  </MeshSet>
</FuelRod>
</BERKUT>

```

Рисунок 7.20 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

Часть 7



Входные параметры нейтронно-физического модуля задаются в теге Neutronics. В модуле DN3D в теге Parallel включен режим многопоточных вычислений (OMP\_NTR="6"). Геометрические параметры модели определяются в теге Geometry (Рисунок 7.21).

```
<Neutronics>
  <Parallel OMP_NTR="6" />
  <Geometry
    XYDimension = "17.77"
    Bucking_construction_Below = "5"
    Bucking_construction_Up = "1"
    TVSNames_for_boundary_conditions = "77">
```

Рисунок 7.21 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

### Часть 8

В теге LoadMap (Рисунок 7.22) задаётся картограмма активной зоны для нейтронно-физического расчёта. Стержни СУЗ описываются далее, в теге ControlRods. Диффузионная опция G7 использует семь расчётных точек на сборку в плане, центральная ячейка – правильный шестиугольник, шесть боковых ячеек – равнобедренные трапеции. По умолчанию размер «под ключ» центральной ячейки задаётся из условия равенства объёмов семи ячеек между собой. Значение размера «под ключ» центральной ячейки переопределяется дляборок, номера которых указаны в тегах ControlRods в подтеге NumberTVSwithSYZ. Опция G7 позволяет учитывать гетерогенность размещения стержня СУЗ, помещая стержень СУЗ в центральную шестигранную ячейку.

Далее указываются типыборок со стержнями СУЗ («4», «5», «8»), число элементов соответствует количеству типов СУЗ, то есть количеству тегов ControlRods. В теге TVSNames приводятся названия типовборок. Порядок соответствует порядку элементов в теге ListTVSNames. Перечисляются типыборок, указанные в картограмме. Порядок номеров соответствует порядку столбцов в теге LoadCore\_Height. Далее указываются типыборок, в которых не моделируются теплогидравлические процессы («56») и процессы в твэле («73» и «9»). Высотные слои расчётной модели активной зоны задаются в теге LayersThickness. Первый элемент соответствует самому нижнему слою активной зоны, последний элемент – самому верхнему слою (значения указаны в см). В данном случае задано 27 слоёв высотой 10 см каждый.

```

<LoadMap>
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    0 0 0 77 77 77 77 77 77 77 77 0 0 0
  0 0 77 77 56 56 56 56 56 56 56 56 77 0 0
0 77 77 56 56 73 73 73 73 73 73 56 56 77 77 0
  0 77 56 56 73 73 73 73 73 73 73 73 56 56 77 0
0 77 56 73 73 9 9 9 9 9 9 9 9 77 0
  0 77 56 73 73 9 12 12 12 12 12 12 9 73 73 56 77 0
    0 77 56 73 73 12 12 12 12 11 11 12 12 73 73 56 77 0
      0 77 56 73 73 12 12 8 11 11 11 8 12 12 73 73 56 77 0
        0 77 56 73 73 9 12 11 11 11 8 11 11 12 9 73 73 56 77 0
          0 77 56 73 73 12 11 11 5 11 11 5 11 12 73 73 56 77 0
            0 77 56 73 73 12 11 4 11 11 8 11 4 11 12 73 73 56 77 0
              0 77 56 73 9 12 12 11 11 8 11 8 11 12 12 9 73 56 77 0 0
                0 0 77 56 73 12 12 8 11 5 11 11 5 11 8 12 12 73 73 56 77 0 0
                  0 0 77 56 73 9 12 12 11 11 8 11 11 8 11 12 12 9 73 56 77 0 0
                    0 77 56 73 73 12 11 11 4 11 11 8 11 11 4 11 12 73 73 56 77 0
                      0 77 56 73 73 12 11 11 5 11 11 5 11 11 12 73 73 56 77 0
                        0 77 56 73 73 9 12 11 11 11 8 11 11 12 9 73 73 56 77 0
                          0 77 56 73 73 12 12 8 11 11 11 8 12 12 73 73 56 77 0
                            0 77 56 73 73 12 12 11 11 12 12 12 73 73 56 77 0
                              0 77 56 73 73 9 12 12 12 12 12 12 9 73 73 56 77 0
                                0 77 56 73 73 9 9 9 9 9 9 9 73 73 56 77 0
                                  0 77 56 56 73 73 73 73 73 73 73 73 56 56 77 0
                                    0 77 77 56 56 73 73 73 73 73 73 56 56 77 0
                                      0 0 77 77 56 56 56 56 56 56 56 77 77 0 0
                                        0 0 0 77 77 77 77 77 77 77 0 0 0
                                          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
</LoadMap>
<ListSUZNames>
  4 5 8
</ListSUZNames>
<TVSNames>
  BO BVO_1 CB PB ROKR ROAR ROAZ PFR
</TVSNames>
<ListTVSNames>
  56 73 11 12 8 4 5 9
</ListTVSNames>
<TVSCalculationScheme>
  7 7 7 7 7 7 7
</TVSCalculationScheme>
<ListTVSNames_not_in_THstructure>
  56
</ListTVSNames_not_in_THstructure>
<ListTVSNames_not_in_BERKUTstructure>
  73 9
</ListTVSNames_not_in_BERKUTstructure>
<LayersThickness>
  10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10.
  10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10.
  10. 10. 10. 10. 10. 10.
</LayersThickness>

```

Рисунок 7.22 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

### Часть 9

Элементами тега `LoadCore_Height` (Рисунок 7.23) служат номера нуклидных составов (определяются в теге `Concentration_Nuclids`) и номера наборов нуклидных составов (могут совпадать с номерами нуклидных составов). Использование номера нуклидного набора позволяет далее в теге `Material` с семью подтегами `MaterialList` детально описать высотный слой сборки. Если указан набор нуклидных составов, то он обязательно раскладывается на нуклидные составы с помощью тега `Material`. В подтеге `MaterialList` тега `Material` фигурирует номер реального нуклидного состава.

Порядок столбцов в теге `LoadCore_Height` соответствует порядку элементов в теге `ListTVSNames`. В данном случае первый столбец соответствует типу сборки «56», второй – «73», третий – «11» и т.д. Количество строк соответствует количеству элементов в теге

LayersThickness, т.е. 27. Первая строка соответствует самому верхнему слою активной зоны. Последняя строка соответствует самому нижнему слою активной зоны.

```
<LoadCore_Height>
29 28 31 31 41 41 41 31
29 28 11 12 20 25 16 28
29 28 11 12 20 25 16 28
29 28 11 12 20 25 16 28
29 28 11 12 20 25 16 28
29 28 11 12 20 25 16 28
29 28 11 12 20 25 16 28
29 28 11 12 20 25 16 28
29 28 1 2 7 10 4 28
29 28 1 2 7 10 4 28
29 28 1 2 7 10 4 28
29 28 1 2 7 10 4 28
29 28 1 2 7 10 4 28
29 28 1 2 7 10 4 28
29 28 1 2 7 10 4 28
29 28 1 2 7 10 4 28
29 28 1 2 7 10 4 28
29 28 1 2 7 10 4 28
29 28 12 14 24 27 19 28
29 28 12 14 24 27 19 28
29 28 12 14 24 27 19 28
29 28 30 30 40 40 40 30
29 28 30 30 40 40 40 30
29 28 30 30 40 40 40 30
29 28 30 30 40 40 40 30
29 28 30 30 40 40 40 30
</LoadCore_Height>
```

Рисунок 7.23 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

#### Часть 10

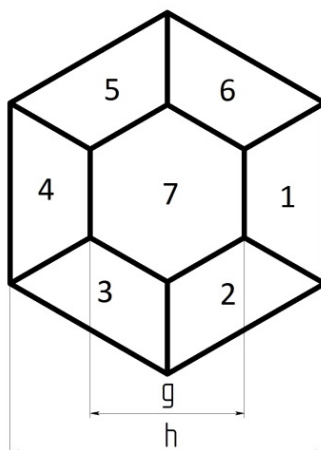
Атрибут Name тега Material принимает значение номера набора нуклидных составов из тега LoadCore\_Height (Рисунок 7.24). Атрибут Name тега MaterialList принимает номер реального нуклидного состава. Тег Material содержит семь подтегов MaterialList. Атрибут Name тега MaterialList принимает значение номера нуклидного состава, порядок ввода значений в соответствии с расположением ячеек представлен на рисунке 7.25.

```
<Material Name = "7">
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "37"/>
</Material>
<Material Name = "10">
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "37"/>
</Material>
<Material Name = "4">
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
  <MaterialList Name = "36"/>
  <MaterialList Name = "35"/>
```



Рисунок 7.24 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

Часть 11



h – размер «под ключ» сборки, g – размер «под ключ» центральной ячейки

Рисунок 7.25 – Порядок ввода номеров нуклидных составов для определённого высотного слоя сборки

Определение параметров стержней СУЗ производится в тегах ControlRods (Рисунок 7.26). Количество типов стержней СУЗ определяется в теге ListSUZNames. Необходимо, чтобы количество элементов тега ListSUZNames и количество тегов ControlRods совпадало. При этом порядок задания РО СУЗ в ListSUZNames и ControlRods также должен совпадать. Иначе диагностика выдаст ошибку при сравнении номеров сборок, заданных в картограмме и в тегах ControlRods. В рассматриваемой задаче заведено три типа стержней СУЗ: AR (стержни автоматического регулирования мощности), KR (стержни компенсации реактивности) и AZ (стержни аварийной защиты). Размер «под ключ» центральной ячейки (WidthAcrossFlats) указанных РО СУЗ равняется 8,7 см. Минимальная глубина погружения (MinDepth) – 80 см, максимальная глубина погружения (MaxDepth) – 190 см для РО AP и 200 см для РО KP и AZ. Используется гетерогенное (heterogeneous) представление задания стержня СУЗ (ConceptOfCells = "heterogeneous"). FLAG\_position = "DOWN" – стержни вводятся снизу а.з. Далее указываются номера нуклидных составов данной группы стержней СУЗ (тег Composition). Порядок элементов в теге Composition соответствует порядку элементов в теге HeightComposition. Последний элемент массива Composition – слой стержня СУЗ, который «первым» вводится в активную зону. Для РО KP и AZ – это карбид вольфрама. Тег HeightComposition определяет толщины слоёв под нуклидный состав, количество элементов соответствует количеству элементов в теге Composition. NumberTVSwithSYZ – номера сборок в

спиральной нумерации, в которых находится описанный тип стержня СУЗ (Рисунок 7.27).

DepthOfImersion – глубины погружения стержней СУЗ, указанных в теге NumberTVSwithSYZ. В примере BR-NPP-simulator.xml все стержни выведены из а.з.

```

<ControlRods
  Name = "AR"
  WidthAcrossFlats = "8.7"
  MinDepth = "80.0"
  MaxDepth = "190.0"
  ConceptOfCells = "heterogeneous"
  FLAG_position = "DOWN">
<Composition>
  34
</Composition>
<HeightComposition>
  110.
</HeightComposition>
<NumberTVSwithSYZ>
  56 40 52 44
</NumberTVSwithSYZ>
<DepthOfImersion>
  135. 80. 80. 135.
</DepthOfImersion>
</ControlRods>

<ControlRods
  Name = "AZ"
  WidthAcrossFlats = "8.7"
  MinDepth = "80.0"
  MaxDepth = "200."
  ConceptOfCells = "heterogeneous"
  FLAG_position = "DOWN">
<Composition>
  33 33 33 33 33 33 33 33 33 33 33 38
</Composition>
<HeightComposition>
  10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10. 10.
</HeightComposition>
<NumberTVSwithSYZ>
  35 20 32 1 23 29 26
</NumberTVSwithSYZ>
<DepthOfImersion>
  80. 80. 80. 80. 80. 80. 80.
</DepthOfImersion>
</ControlRods>

<ControlRods
  Name = "KR"
  WidthAcrossFlats = "8.7"
  MinDepth = "80.0"
  MaxDepth = "200."
  ConceptOfCells = "heterogeneous"
  FLAG_position = "DOWN">
<Composition>
  33 38
</Composition>
<HeightComposition>
  110. 10.
</HeightComposition>
<NumberTVSwithSYZ>
  87 62 60 19 17 9 82 67 15 11 13 48 77 72
</NumberTVSwithSYZ>
<DepthOfImersion>
  80. 80. 80. 80. 80. 80. 80. 80. 80. 80. 80. 80. 80.
</DepthOfImersion>
</ControlRods>

</Geometry>

```

Рисунок 7.26 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

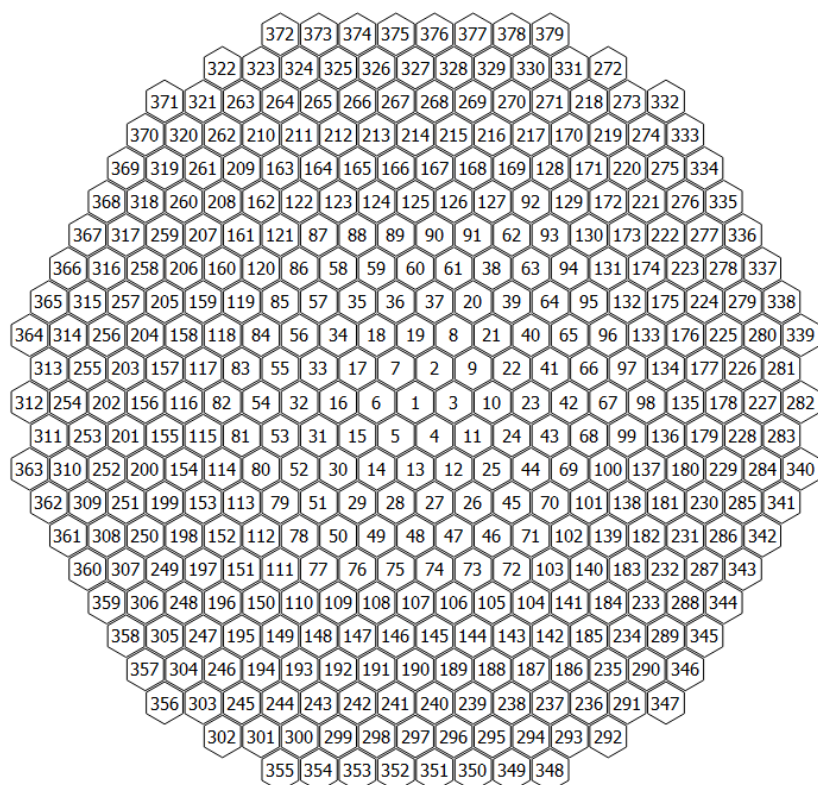


Рисунок 7.27 – Спиральная нумерация сборок, картограмма определена в теге LoadMap

В теге CommonInformation (Рисунок 7.28) заданы следующие параметры: полная тепловая мощность РУ равна 700 МВт (TotalPower = "700.0"), расчетный шаг нейтронно-физического модуля при решении нестационарного уравнения – 0,01 с (TimeStep = "0.01"), шаг при вызове решения стационарной задачи – 1,0 с (TimeStepBase = "1.0"), количество вызовов стационарной задачи указано в атрибуте MinNumIter и равно 99, количество нуклидов – 25 (NumberElements = "25"), количество нуклидных составов – 39 (MaterialTypesNumber = "39"), используется линейная интерполяция сечений (по умолчанию FLAG\_RESEAU = "0"), условие выхода на решение нестационарного уравнения составляет 1,0 (EPS\_Temp = "1.0").

```
<CommonInformation
TotalPower = "700.0"
NumberEnergeticGroups="26"
TimeStep = "0.01"
TimeStepBase = "1.0"
NumberElements = "31"
MaterialTypesNumber = "39"
EPS_Temp = "1."
MinNumIter = "99"
W_nominal = "1.0">
```

Рисунок 7.28 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

### Часть 13

В нейтронно-физической модели реализовано два условия для выхода на решение нестационарного уравнения:







```

0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 6.94000E-03 1.88000E-04 5.44000E-05 9.73000E-04 5.09000E-05 3.60000E-05 2.71000E-05
1.49000E-05 1.64000E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 1.63000E-05 6.13000E-05 2.11000E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 6.94000E-03 1.88000E-04 5.44000E-05 9.73000E-04 5.09000E-05 3.60000E-05 2.71000E-05
1.49000E-05 1.64000E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 1.63000E-05 6.13000E-05 2.11000E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 1.97000E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 1.95000E-05 7.35000E-05 1.64000E-02 4.18000E-03
6.39280E-07 1.10044E-06 2.79868E-05 2.30336E-04 3.11466E-04 3.04634E-04 3.43796E-04 1.09000E-03
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 6.94000E-03 1.88000E-04 5.44000E-05 9.73000E-04 5.09000E-05 3.60000E-05 2.71000E-05
1.49000E-05 1.64000E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 1.63000E-05 6.13000E-05 2.11000E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 1.06000E-02 2.87000E-04 3.46000E-05 1.17000E-03 6.11000E-05 4.32000E-05 3.25000E-05
2.27000E-05 2.50000E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 2.48000E-05 9.35000E-05 2.64000E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 6.94000E-03 1.88000E-04 5.44000E-05 9.73000E-04 5.09000E-05 3.60000E-05 2.71000E-05
4.33000E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 3.94000E-04 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 3.95000E-02 2.85000E-03 3.36000E-04 8.87000E-03 4.71000E-03 0.00000E+00 0.00000E+00
2.81000E-04 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 2.56000E-04 1.09000E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 1.06000E-02 2.87000E-04 3.36000E-05 1.48000E-03 7.77000E-05 5.48000E-05 4.13000E-05
2.27000E-05 2.50000E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 2.48000E-05 9.35000E-05 2.64000E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 1.06000E-02 2.87000E-04 3.36000E-05 1.48000E-03 7.77000E-05 5.48000E-05 4.13000E-05
2.27000E-05 2.50000E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 2.48000E-05 9.35000E-05 2.64000E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 1.05650E-02 2.86760E-04 8.28590E-05 1.48160E-03 7.75620E-05 5.47470E-05 4.12430E-05
2.26140E-05 2.49900E-06 9.03700E-03 3.32770E-02 2.47600E-05 1.06560E-02 9.13430E-03 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 1.05650E-02 2.86760E-04 8.28590E-05 1.48160E-03 7.75620E-05 5.47470E-05 4.12430E-05
3.15200E-04 2.49900E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 2.47600E-05 9.32910E-05 9.13430E-03 1.74460E-02
2.67680E-06 4.60778E-06 1.17187E-04 9.64466E-04 1.30417E-03 1.27557E-03 1.43955E-03 4.52610E-03
1.41520E-05 6.97300E-03 1.27500E-05 7.22670E-04 2.44450E-04 3.25280E-05 4.38890E-05
8.04340E-03 5.89600E-03 1.60030E-04 4.62410E-05 8.26820E-04 4.32850E-05 3.05530E-05 2.30160E-05
1.26200E-05 1.39460E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.38180E-05 5.20630E-05 1.87680E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
1.41520E-05 6.97300E-03 1.27500E-05 7.22670E-04 2.44450E-04 3.25280E-05 4.38890E-05
8.04340E-03 7.02190E-03 1.90590E-04 5.50720E-05 9.84720E-04 5.15510E-05 3.63870E-05 2.74120E-05
1.50300E-05 1.66100E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.64570E-05 6.20060E-05 1.87680E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 4.77190E-03 1.29520E-04 3.74250E-05 6.69180E-04 3.50320E-05 2.47280E-05 1.86280E-05
1.02140E-05 1.12870E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.11830E-05 4.21370E-05 2.89800E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 1.05650E-02 2.86760E-04 8.28590E-05 1.48160E-03 7.75620E-05 5.47470E-05 4.12430E-05
2.26140E-05 2.49900E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 3.76890E-03 3.83750E-03 9.13430E-03 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
0.00000E+00 6.45890E-03 1.75310E-04 5.06560E-05 9.05760E-04 4.74170E-05 3.34700E-05 2.52140E-05
1.38250E-05 1.52780E-06 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 1.51370E-05 5.70340E-05 1.87680E-02 0.00000E+00
0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
</Concentration_Nuclids>

```

Рисунок 7.29 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

#### Часть 14

Порядок нуклидов в теге Element\_List (Рисунок 7.30) соответствует их порядку в теге Concentration\_Nuclids.

```

<Element_List>
U235 U238 PU38 PU39 PU41 PU42 N FE SI MN CR NI MO V NB CE B-10 B-11 W C PB O DY56
DY58 DY60 DY61 DY62 DY63 DY64 HF

```

```

</Element_List>
<Element_Types>
  1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1 2 2 3 2 1 1 1 1 1 1 1
</Element_Types>
</CommonInformation>

```

Рисунок 7.30 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

### Часть 15

Типы нуклидов (Element\_Types) соответствуют именам нуклидов в теге Element\_List: 1 – топливо, 2 – конструкционные материалы, 3 – теплоноситель. Данный тег используется при подготовке сечений.

Сечения (Рисунок 7.31) рассчитываются на сетке температур топлива (тег Grid\_TempFuel [K]), конструкционных материалов (тег Grid\_TempMat [K]), теплоносителя (тег Grid\_TempPb [K]) и плотности теплоносителя (тег Grid\_RoPb [кг/м<sup>3</sup>]).

```

<Interpolation>
  <Grid_RoPb>
    10696. 10353. 7000. 4000. 2000. 0.0
  </Grid_RoPb>
  <Grid_RoH2O>
    1.0
  </Grid_RoH2O>
  <Grid_Void>
    1.0
  </Grid_Void>
  <Grid_TempPb>
    600.0 900.0 2100.0
  </Grid_TempPb>
  <Grid_TempMat>
    600.0 900.0 2100.0
  </Grid_TempMat>
  <Grid_TempFuel>
    600.0 900.0 2100.0 3000.0
  </Grid_TempFuel>
</Interpolation>
<PrepareConst FLAG_RF="1" BNABMLTBIN="AbbnRF95b.01a" EXE="Cs170164.exe"/>

```

Рисунок 7.31 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

### Часть 16

Далее задаются значения скорости движения каждого стержня СУЗ по порядковому номеру сборки в спиральной нумерации (Рисунок 7.32). Контрольные функции должны быть обязательно заданы для каждого стержня СУЗ. Контрольные функции позволяют привязать движение стержней СУЗ к времени процесса и расчетным параметрам.

```

<ControlFunc Name="Time_down_power" Func="0." Formula="(t1 &lt;= 31.0) ? t1 : 31.0">
  <Arg Module = "Hydra" ShortName="t1" LongName="Time"/>
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="Log_velocity" Func="0." Formula="( ( t1 &gt;= 1.0 ) ? ( W1 &gt;= ( 700.0-
7.0*(t1-1.0)+0.0001 ) ? 4.0 : ( W1 &lt;= ( 700.0-7.0*(t1-1.0)-0.0001 ) ? -4.0 : 0.0 ) ) : 0.0 )" >
  <Arg Module = "DN3D" ShortName="W1" LongName="TotalPower"/>
  <Arg Module = "CFunc" ShortName="t1" LongName="ControlFunc(Time_down_power).Func"/>
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="56" Func="0." Formula="(x1 == 190.0) ? 0.0 : v1">

```

```

    <Arg Module = "DN3D" ShortName="x1" LongName="AR_56"/>
    <Arg Module = "CFunc" ShortName="v1" LongName="ControlFunc(Log_velocity).Func"/>
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="40" Func="0." Formula="(x1 == 190.0) ? v1 : 0.0">
  <Arg Module = "DN3D" ShortName="x1" LongName="AR_56"/>
  <Arg Module = "CFunc" ShortName="v1" LongName="ControlFunc(Log_velocity).Func"/>
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="52" Func="0." Formula="(x1 == 190.0) ? v1 : 0.0">
  <Arg Module = "DN3D" ShortName="x1" LongName="AR_56"/>
  <Arg Module = "CFunc" ShortName="v1" LongName="ControlFunc(Log_velocity).Func"/>
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="44" Func="0." Formula="(x1 == 190.0) ? 0.0 : v1">
  <Arg Module = "DN3D" ShortName="x1" LongName="AR_56"/>
  <Arg Module = "CFunc" ShortName="v1" LongName="ControlFunc(Log_velocity).Func"/>
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="87" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="62" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="60" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="19" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="17" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="9" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="82" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="67" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="15" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="11" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="13" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="48" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="77" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="72" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="35" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="20" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="32" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="1" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="23" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

<ControlFunc Name="29" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

```

```

<ControlFunc Name="26" Func="0." Formula="0.0">
</ControlFunc>

</Neutronics>

```

Рисунок 7.32 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

### Часть 17

Стержни АЗ и КР в данном примере имеют нулевую скорость, то есть координата концов стержней не изменяется.

Логика движения стержней АР для реализации линейного снижения мощности и выхода на новое стационарное значение заключена в первых шести контрольных функциях (Рисунок 7.32). В контрольной функции под именем "Log\_velocity" определяется скорость движения стержня СУЗ в зависимости от расчетной мощности и времени процесса.

Для реализации логики движения стержней СУЗ необходимо определить «теоретическую функцию мощности» - функцию, с которой будет сравниваться расчетная мощность и в зависимости от результата определять скорость движения стержня СУЗ. В данной задаче в качестве «теоретической функции мощности» выступает кусочно - заданная функция. В исходном состоянии мощность равна 700 МВт, на отрезке времени [1,0, 31,0] линейно убывает до значения 410 МВт со скоростью 7 МВт/с, на полуинтервале (31,0, 200,0] остаётся постоянной.

В атрибуте Formula контрольной функции под именем "Log\_velocity" определяется скорость движения, данное значение скорости, являющееся аргументом модуля CFunc, привязано к стержням СУЗ под номерами «56», «40», «52», «44». При  $t < 1,0$  с скорость движения стержней СУЗ равна нулю. При  $t \geq 1,0$  с скорость движения определяется по следующей формуле:  $W1 \geq (700.0 - 7.0 * (t - 1.0) + 0.0001) ? 4.0 : (W1 \leq (700.0 - 7.0 * (t - 1.0) - 0.0001) ? -4.0 : 0.0)$ , где переменная  $t1$  определена в контрольной функции под именем "Time\_down\_power", расчетная мощность  $W1$  является аргументом модуля DN3D (LongName="TotalPower", [МВт]). Контрольная функция "Time\_down\_power" при  $t1 < 31,0$  выдает значение времени из модуля Hydra, а при  $t \geq 31,0$  принимает значение равное 31,0. Данный прием использован для того, чтобы описать линейную убывающую функцию мощности на отрезке времени [1,0, 31,0] и константу на интервале [31,0, 200,0] ( $t=200,0$  время окончания расчета) в контрольной функции под именем "Log\_velocity". В данном примере введена также окрестность «теоретической функции мощности»  $W(t)$  ( $W(t) - 0,0001$ ,  $W(t) + 0,0001$ ). Если расчетная мощность лежит в интервале ( $W(t) - 0,0001$ ,  $W(t) + 0,0001$ ), то скорость движения стержней равна нулю. Если расчетная мощность  $\geq$

$W(t)+0,0001$ , то стержни движутся в направлении «в зону» со скоростью 4 см/с. Если расчетная мощность  $\leq W(t)-0,0001$ , то стержни движутся в направлении «из зоны» со скоростью 4 см/с.

Стержни под номерами «56» и «44» находятся на высоте 135 см от нижнего торца расчетной области, стержни под номерами «40» и «52» – в нижнем рабочем положении (80 см). Положения стержней СУЗ являются аргументами модуля DN3D, положение стержня «56» доступно через имя «AR\_56» (см). Имя «AR\_56» сформировано из суммы трех строк: «Тип стержня СУЗ» (Указан в атрибуте Name тега ControlRods), «\_» (Нижнее подчеркивание), «Номер сборки в спиральной нумерации, где расположен стержень СУЗ» (указан в подтеге NumberTVSwithSYZ тега ControlRods). Стержни «56» и «44» работают синхронно, так как в контрольных функциях выставлены аналогичные условия. Если стержни «56» и «44» достигают верхнего рабочего положения (190 см), скорость их движения обращается в ноль, иначе скорость определяется через контрольную функцию под именем "Log\_velocity". При достижении стержнями «56» и «44» верхнего рабочего положения к работе приступают стержни «40» и «52». В данном примере для снижения мощности на 30% от номинального значения со скоростью 7 МВт/с достаточно двух стержней АР («56» и «44»).

Координаты концов стержней АР не выходят за границы отрезка [80,0, 190,0], указанные в теге ControlRods (MinDepth = "80.0" и MaxDepth = "190.0"). Так, при достижении координаты конца стержня АР отметки 190,0 см, стержень перестает перемещаться, пока направление скорости не изменится на противоположное.

Параметры теплогидравлического расчёта тестового примера BR-NPP-simulator.xml задаются в теге Hydraulics (Рисунок 7.33). В теге Parallel активировано использование режима многопоточных вычислений для систем с общей памятью, число нитей равно 6 (OMP\_NTR="6"). Далее определяются константы, используемые при задании элементов теплогидравлической сети (Dsum и MFluxSum).

Используемая модель активной зоны соответствует тегу Core (<Core ReadFrom="Core"/>). В качестве теплоносителя используется свинец с неконденсируемым газом аргоном (смотри тег Coolant). Свойства теплоносителя загружаются из файла PbProp\_dat. Начальное давление теплоносителя составляет 1,36 атм., начальная температура – 693 К. В начале расчёта определяется равновесное гидростатическое состояние контура (<PhysicalModels HydroStaticEquilibrium="On" />).

```
<Hydraulics>  
<Parallel OMP_NTR="6" />
```

```

<!-- Константы -->
<Constant Name="Dsum" Value="3.124925"/>
<Constant Name="MFluxSum" Value="39600"/>
<Core ReadFrom="Core"/>
<!-- Теплоноситель Свинец -->
<Coolant Name="Pb" PropFile="PbProp.dat" NCGList="Ar"
  Pressure="1.36e5" Tfluid="(420.0+273.0)" Tgas="693.0" Void="0.0">
  <NCG Name="Ar" Xgas="1.0" Xfluid="0.0"></NCG>
</Coolant>
<PhysicalModels HydroStaticEquilibrium="On" />

```

Рисунок 7.33 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

## Часть 18

Модельный контур охлаждения РУ БР со свинцовым теплоносителем (Рисунок 7.34) состоит из а.з., верхней и нижней камер (СНАМВ1 и СНАМВ2), четырёх каналов (СН1, СН2, СН3 и СНех), насоса (PUMP) и тепловой структуры с граничным условием (HS\_Cooler и НВ\_С), моделирующей работу второго контура. Гидравлический диаметр и площадь проходного сечения всех каналов и камер задаётся с использованием ранее определённой константы Dsum (Рисунок 7.33):  $Deqv="Dsum"$ ,  $Area="(pi*Dsum*Dsum)/4"$ . Камеры и канал СНех имеют длину 0,5 м, горизонтальные каналы СН1 и СН3 – 1 м. Длина вертикального канала СН2, идущего параллельно а.з., равна 2,7 м. В канале СН3, расположенном внизу а.з., задан насос PUMP, в котором через контрольную функцию PumpMassFlow определён постоянный расход свинца через а.з., равный константе MFluxSum, т.е. 39600 кг/с. В теге MatProp заведены свойства стали тепловой структуры HS\_Cooler. Тепловая структура HS\_Cooler состоит из 80000 элементов, каждый из которых имеет длину 2,7 м и внешний радиус 0,011 м. На внутренней поверхности тепловой структуры HS\_Cooler с помощью теплового граничного условия НВ\_С задана постоянная температура 693 К.

```

<!-- Камеры -->
<Chamber Name="СНАМВ1" Orientation="Horizontal" Coolant="Pb">
  <Section Length="0.5" Deqv="Dsum" Area="(pi*Dsum*Dsum)/4" Pressure="1.36e6" Tfluid="693."
  Tgas="693.0" Void="0.0"/>
</Chamber>
<Chamber Name="СНАМВ2" Orientation="Horizontal" Coolant="Pb">
  <Section Length="0.5" Deqv="Dsum" Area="(pi*Dsum*Dsum)/4" Pressure="1.e6" Tfluid="693."
  Tgas="693.0" Void="0.0"/>
</Chamber>
<!-- Каналы -->
<Channel Name="СНех" Multiplicity="1" Coolant="Pb">
  <Section CellNumber="5" Length=".5" Deqv="Dsum" Area="(pi*Dsum*Dsum)/4" Dh="0.5"
  Roughness="1.e-4"/>
</Channel>
<Channel Name="СН1" Multiplicity="1" Coolant="Pb">
  <Section CellNumber="10" Length="1." Deqv="Dsum" Area="(pi*Dsum*Dsum)/4" Dh="0."
  Roughness="1.e-4"/>
</Channel>
<Channel Name="СН2" Multiplicity="1" Coolant="Pb">
  <Section CellNumber="27" Length="2.7" Deqv="Dsum" Area="(pi*Dsum*Dsum)/4" Dh="-2.7"
  Roughness="1.e-4"/>
</Channel>
<Channel Name="СН3" Multiplicity="1" Coolant="Pb">
  <Section CellNumber="10" Length="1." Deqv="Dsum" Area="(pi*Dsum*Dsum)/4" Dh="0."
  Roughness="1.e-4"/>
</Channel>
<!-- Насос -->

```

```

<Pump Name="PUMP" PumpModel="MassFluxExternal" TypeMassFluxExternal="CF"
MassFluxExternal="PumpMassFlow"/>
<ControlFunc Name="PumpMassFlow" OutFile="PumpMassFlow.dat" Func="0." Formula="interpol([-
100.0, -98.0, 29.1, 49.0, 49.5, 50.0, 100.1,
1000],[0.0,MFluxSum,MFluxSum,MFluxSum,MFluxSum,MFluxSum,MFluxSum,MFluxSum],t1)">
  <Arg ShortName="t1" Module="Hydra" LongName="Time"/>
</ControlFunc>
<!-- Материал теплообменника -->
<MatProp Name="STEEL">
  <HeatCapacity Temp="300." Coef="900."/>
  <HeatCapacity Temp="1500." Coef="1200."/>
  <Dens Temp="300." Coef="7750."/>
  <Dens Temp="1500." Coef="7750."/>
  <HeatCond Temp="300." Coef="23."/>
  <HeatCond Temp="1500." Coef="30."/>
</MatProp>
<!-- Тепловая структура (теплообменник) -->
<HeatStruct Name="HS_Cooler" Dimension="1"
  Geometry="Cylindrical" Multiplicity="80000." TypeCrossSection="0"
  ZrReaction="Off" Q="0.0">
  <AxialSection Z0="0." DZ="2.7" NZ="27"/>
  <RadialSection R0="0.01" DR="1.e-3" NR="1" />
  <Region Z0="0." DZ="2.7" R0="0.01" DR="1.e-3" Temp="693." Kr="1.0" Material="STEEL"/>
</HeatStruct>
<!-- Тепловое граничное условие в теплообменнике-->
<HeatBound Name="НВ_С" Type="1" TypeTwall="TF" Twall="Temp_C"/>
<Table Name="Temp_C" ScalarFactor="0." MultiplFactor="1.">
  <PairXY X="0" Y="693" />
  <PairXY X="2.0" Y="693" />
  <PairXY X="2.7" Y="693" />
</Table>

```

Рисунок 7.34 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

## Часть 19

Соединения элементов теплогидравлической сети указаны в теге NodalizationScheme (Рисунок 7.35). Большинство каналов а.з. снизу соединены с камерой СНАМВ1, сверху – с камерой СНАМВ2, только каналы СПОС (Name="300", порядковый номер в списке зон – 170) сверху соединены с граничным условием Bound\_PFR\_out (Type="Plug", т.е. заглушка). Верхняя камера СНАМВ2 подсоединяется к каналам СНех и СН1. Канал СНех имеет граничное условие по давлению (BVOL2), которое постоянно и равно 1 атм. Канал СН1 на выходе соединяется с каналом СН2, выход канала СН2 соединяется со входом канала СН3, выход которого в свою очередь соединён с нижней камерой СНАМВ1, образуя таким образом замкнутый контур. Тепловая структура HS\_Cooler своей внешней поверхностью граничит с каналом СН2, а внутренней – с тепловым граничным условием НВ\_С.

```

<!--***** Связи *****-->
<NodalizationScheme>
  <!-- Замкнутый контур -->
  <Connection TypeFrom="Core" NameFrom="TestCore" InOut="In"
    TypeTo="Chamber" NameTo="CHAMB1" />
  <Connection TypeFrom="Core" NameFrom="TestCore" InOut="Out"
    TypeTo="Chamber" NameTo="CHAMB2" ListZones="1:169,171"/>
  <Connection TypeFrom="Core" NameFrom="TestCore" InOut="Out"
    TypeTo="BoundCell" NameTo="Bound_PFR_out" ListZones="170"/>
  <Connection NameFrom="CHex" TypeFrom="Channel" InOut="In" NameTo="CHAMB2"
    TypeTo="Chamber"/>
  <Connection NameFrom="CHex" TypeFrom="Channel" InOut="Out" NameTo="BVOL2"
    TypeTo="BoundCell"/>
  <Connection NameFrom="CH1" TypeFrom="Channel" InOut="In" NameTo="CHAMB2"
    TypeTo="Chamber"/>

```



```

    <Connection NameFrom="CH1" TypeFrom="Channel" InOut="Out" NameTo="CH2" TypeTo="Channel"
InOutTo="In"/>
    <Connection NameFrom="CH2" TypeFrom="Channel" InOut="Out" NameTo="CH3" TypeTo="Channel"
InOutTo="In"/>
    <Connection NameFrom="CH3" TypeFrom="Channel" InOut="Out" NameTo="CHAMB1"
TypeTo="Chamber"/>
    <Connection NameFrom="PUMP" TypeFrom="Pump" InOut="In" NameTo="CH3" TypeTo="Channel"
XCh="0.5"/>
    <Connection NameFrom="HS_Cooler" TypeFrom="HeatStruct" Boundary="External" XHS="0.0"
Length="-2.7" TypeTo="Channel" NameTo="CH2" XCh="2.7"/>
    <Connection NameFrom="HS_Cooler" TypeFrom="HeatStruct" Boundary="Internal" XHS="0.0"
Length="2.7" TypeTo="HeatBound" NameTo="HB_C"/>
</NodalizationScheme>
<!-- Граничное условие на выходе блока УПОС -->
<BoundCell Name="Bound_PFR_out" Type="Plug" />
<BoundCell Name="BVOL2" Type="Pressure"
Pressure="1.0e5" Void="0.0" Tfluid="693." Tgas="693.0">
</BoundCell>
</Hydraulics>
</Task>

```

Рисунок 7.35 – Входной файл для моделирования РУ БР со свинцовым теплоносителем.

## Часть 20

### 7.2.3 Выходные файлы и результаты расчета

При расчёте задачи BR-NPP-simulator формируются следующие выходные файлы:

- BR-NPP-simulator.msg – содержит весь протокол информационных сообщений, включая ошибки, диагностические сообщения, события и информационные сообщения;
- BR-NPP-simulator.plt – содержит расчётные данные для просмотра пост-процессором;
- BR-NPP-simulator.rst – файл записей рестартов;
- BR-NPP-simulator.plt~, BR-NPP-simulator.rst~ – вспомогательные файлы интегрирующей оболочки;
- BR-NPP-simulator.int – содержит текстовый вывод значений тепловой мощности активной зоны, заданного во входном файле; остаточного тепловыделения для стационарного состояния; эффективного коэффициента размножения; эффективной доли запаздывающих нейтронов; среднее время жизни поколения мгновенных нейтронов.

Далее представлены результаты расчета (Рисунок 7.37–Рисунок 7.39). Линейное снижение мощности с выходом на новое стационарное значение реакторной установки осуществляется за счет «отработки» стержней автоматического регулирования (Рисунок 7.36). Глубина погружения в зависимости от времени стержней СУЗ под номерами «44» и «56» показана на рисунке 7.36. Таким образом, за первые 30 с нестационарного процесса мощность реакторной установки линейно снижается со скоростью 7 МВт/с до 70% от номинального значения (Рисунок 7.38).

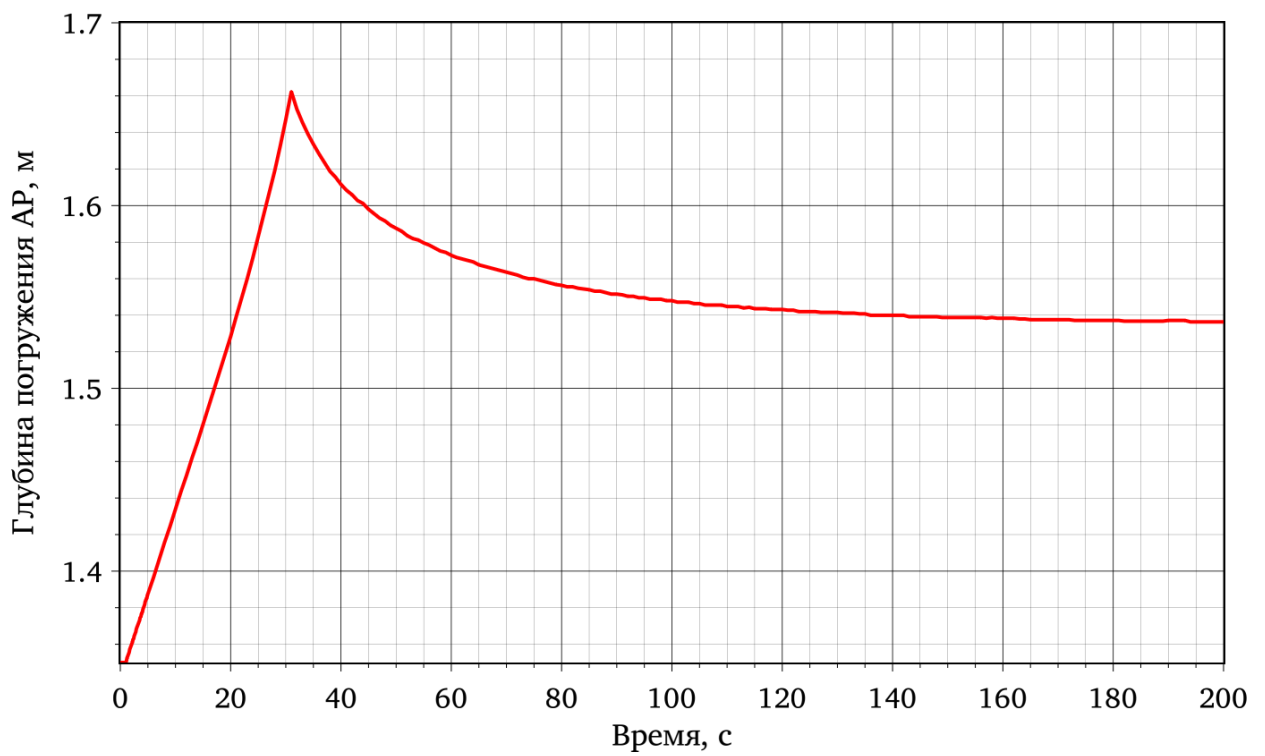


Рисунок 7.36 – Глубина погружения стержней СУЗ, расположенных в сборках №44 и №56, в зависимости от времени

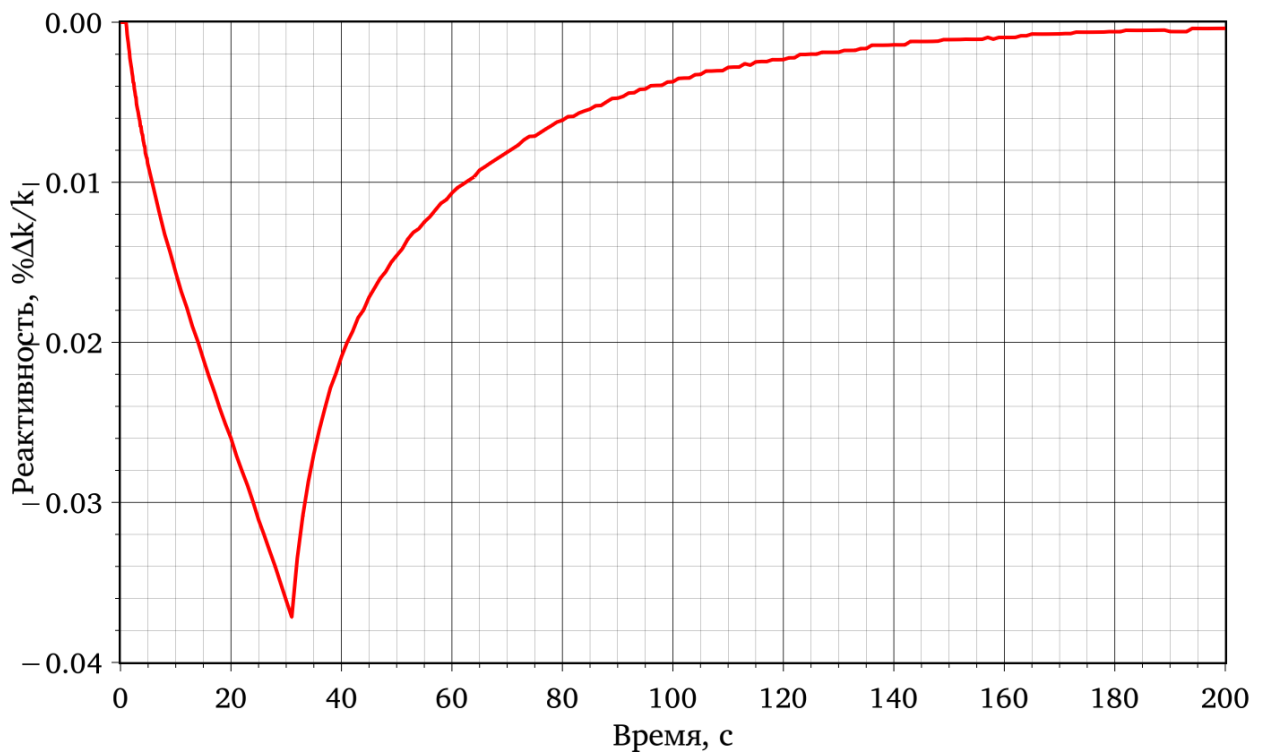


Рисунок 7.37 – Реактивность в зависимости от времени

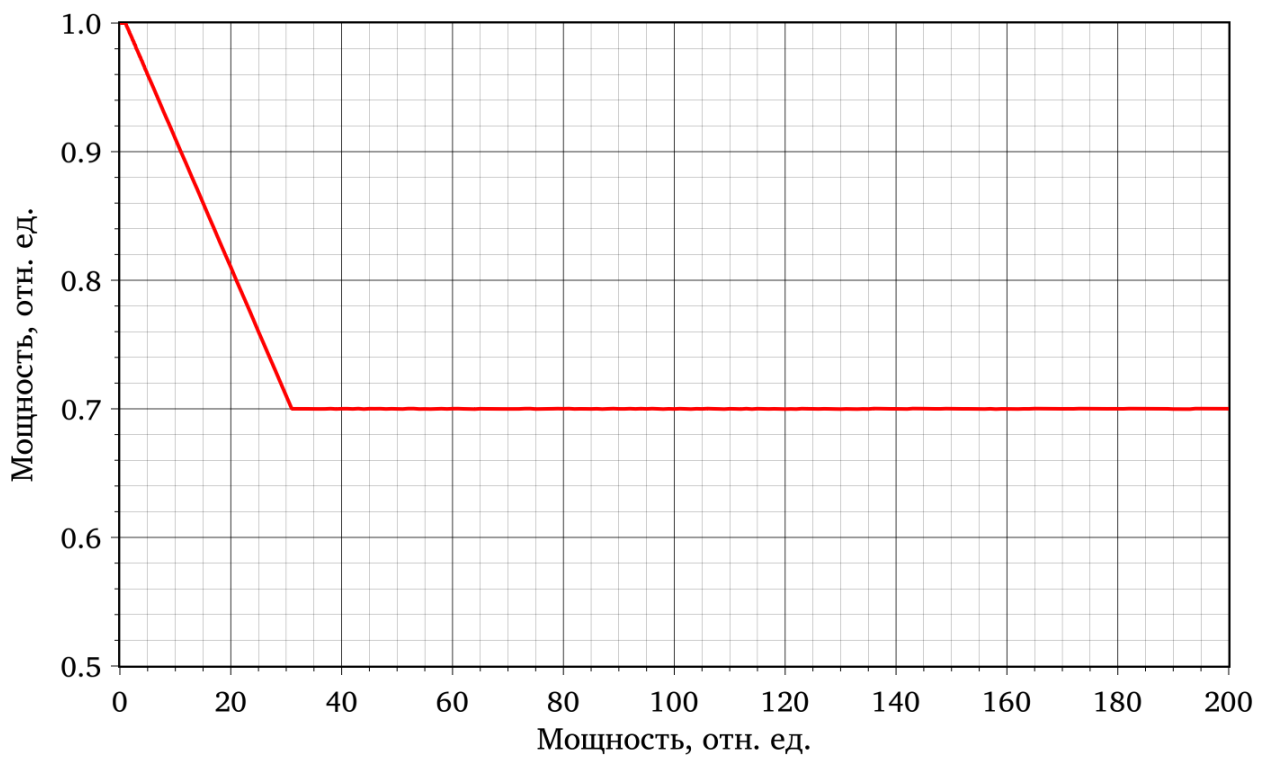


Рисунок 7.38 – Относительная мощность в зависимости от времени

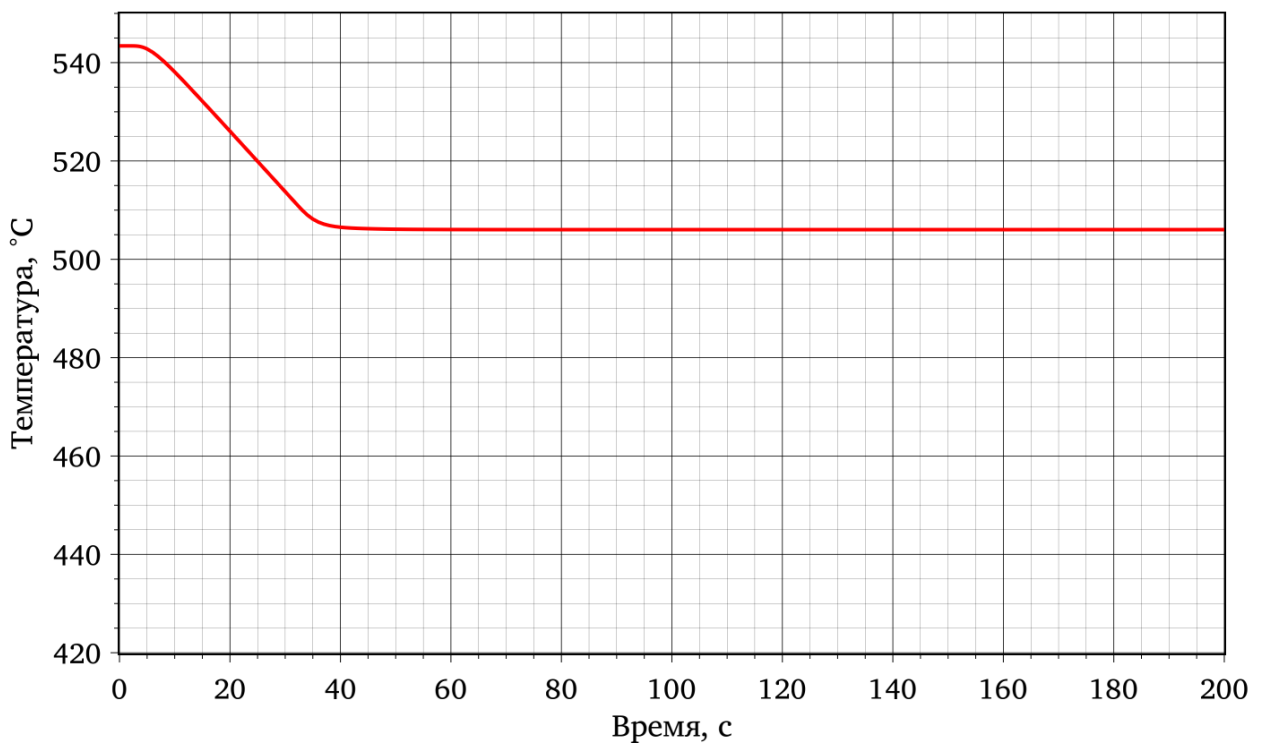


Рисунок 7.39 – Температура теплоносителя на выходе а.з. в зависимости от времени

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Динамический интегральный универсальный расчетный код для анализа и обоснования безопасности реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями. Версия 1.2 (ЕВКЛИД/V1.2). Отчет о верификации и обосновании программного средства // Отчет ИБРАЭ РАН. Инв. № 4735-Н.4х.44.9Б.14.1037-12-Р2, Москва. – 2016. – 552 с.
- 2 Программа для решения задач нестационарной теплогидравлики применительно к реакторным установкам и экспериментальным стендам с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителями. Версия 1.1 (HYDRA-IBRAE/LM/V1.1). Отчёт о верификации и обосновании программного средства // Отчёт ИБРАЭ РАН. Инв. № 4812-Н.4х.241.9Б.17.1018-1-Р/1 (в семи частях), Москва. – 2017. – 1692 с.
- 3 Подготовка первой версии руководства пользователя и руководства по моделям для канального нестационарного теплогидравлического кода HYDRA-IBRAE/Pb // Отчет ИБРАЭ РАН. Инв. № 3538-1/5610-3-13. – 2012. – 365 с.
- 4 Программа для расчётных анализов термомеханических процессов в твэлах реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями в нормальных и переходных режимах. Версия 1.1 (БЕРКУТ-V1). Отчёт о верификации и обосновании программного средства // Отчёт ИБРАЭ РАН. Инв. № 4812-Н.4х.241.9Б.17.1018-1-Р/2, Москва. – 2017. – 314 с.
- 5 Разработка и программная реализация интерфейсов для связи канального теплогидравлического, топливного и нейтронно-физического модулей // Отчет ИБРАЭ РАН. Инв. № 3538-1/5610-3-19. – 2012. – 84 с.
- 6 Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. Москва, Атомиздат – 1974. – 494 с.
- 7 Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Система групповых констант БНАБ-93, Часть 1. Ядерные константы для расчёта нейтронных и фотонных полей излучения // Вопросы Атомной Науки и Техники, Сер. Ядерные константы. Вып.1 – 1996. – С. 59-98.
- 8 Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Программа подготовки констант CONSYST. Описание применения. Препринт ФЭИ-2828, Обнинск 2000. 50 с.

9 Разработка модуля подготовки констант в нестационарном расчёте на базе их аналитических зависимостей от параметров среды // Отчет ИБРАЭ РАН. Инв. № 3538-1/5610-3-26. – 2012. – 67 с.

10 Головизнин В.М., Самарская Е.А., Чуданов В.В. Локально-одномерные схемы Роте для уравнения теплопроводности в произвольных криволинейных координатах. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша АН СССР №37, Москва 1988. 16 с.

11 Головизнин В.М., Романовский В.И., Самарская Е.А., Чуданов В.В. Метод факторизованных тепловых смещений для решения уравнения анизотропной теплопроводности с симметричным тензором. Препринт ИАЭ-4894/7, Москва 1989. 28 с.

12 Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. Москва: Наука. 1978. 592 с.

13 Временные руководящие материалы по использованию данных по свойствам конструкционных материалов и СНУП топлива для обоснования работоспособности экспериментальных твэлов ЭТВС реактора БН-600. Вторая редакция // Инв. №00154PM от 10.09.2014 ЧУ ИТЦП «Прорыв», Москва – 2014 г. – 66 с.

14 Забудько Л.М., Кочетков Л.А., Матвеев В.Н., Рогозкин Б.Д. Перспективы использования нитридного топлива в энергетических реакторах на быстрых нейтронах // Научно-техническая конференция «Ядерное топливо для человечества», г. Электросталь, 5-8 октября 1998 г.

15 Fromont M., Lamontagne J., Asou M., Aubrun I. Behaviour of Uranium-Plutonium Mixed Nitride and Carbide Irradiated in Phenix. Proceedings of GLOBAL-2005, October 9-13, 2005, Tsukuba, Japan, #329.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Индексы нуклидов по номенклатуре БНАБ

Имя нукл.	Индекс	Имя нукл.	Индекс	Имя нукл.	Индекс	Имя нукл.	Индекс	Имя нукл.	Индекс	Имя нукл.	Индекс
H	10010	SC	210450	RU	440000	CS37	551370	GD56	641560	U232	922320
D	10020	TI	220000	RU01	441010	BA	560000	GD57	641570	U233	922330
H--3	10030	V	230510	RH	451030	LA	571390	GD58	641580	U234	922340
HE	20040	CR	240000	RH03	451030	CE	580000	GD60	641600	U235	922350
HE-3	20030	MN	250550	PD	460000	PR	591410	TB59	651590	U236	922360
LI-6	30060	FE	260000	PD05	461050	ND	600000	DY	660000	U238	922380
LI-7	30070	CO	270590	PD07	461070	ND43	601430	HO	671650	NP37	932370
BE	40090	NI	280000	PD08	461080	ND45	601450	ER	680000	NP38	932380
B-10	50100	CU	290000	AG	470000	PM47	611470	TM	691690	NP39	932390
B-11	50110	ZN	300000	AG09	471090	PM48	611480	LU	710000	FP39	941180
C	60000	GA	310000	CD	480000	PM8M	611481	HF	720000	PU36	942360
N	70000	GE	320000	CD13	481130	SM	620000	TA	731810	PU38	942380
N-15	70150	AS	330750	IN	490000	SM47	621470	W	740000	PU39	942390
O	80000	SE	340000	IN15	491150	SM49	621490	RE	750000	PU40	942400
F	90190	BR	350000	SN	500000	SM50	621500	OS	760000	PU41	942410
NA	110230	SR	380000	SB	510000	SM51	621510	IR	770000	PU42	942420
MG	120000	SR89	380890	TE	520000	SM52	621520	PT	780000	AM41	952410
AL	130270	SR90	380900	I	531270	EU	630000	AU	791970	AM2M	952421
SI	140000	Y	390890	I129	531290	EU53	631530	PB	820000	AM43	952430
P	150310	ZR	400000	XE31	541310	EU54	631540	BI	832090	CM42	962420
S	160000	NB	410930	XE35	541350	EU55	631550	TH30	902300	CM43	962430
CL	170000	MO	420000	CS33	551330	GD	640000	TH32	902320	CM44	962440
AR	180000	MO95	420950	CS34	551340	GD52	641520	PA31	912310	CM45	962450
K	190000	MO97	420970	CS	551330	GD54	641540	PA33	912330	CM46	962460
CA	200000	TC99	430990	CS35	551350	GD55	641550	FP35	921160	CM48	962480