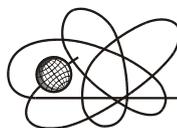




Российская Академия Наук

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



ИБРАЭ

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИBRAE-2011-06

Preprint IBRAE-2011-06

Е.Ф.Митенкова, Е.В.Соловьева

**ОПИСАНИЕ МОДУЛЯ VAR-GM ГЕНЕРАЦИИ
РАСЧЕТНЫХ ФАЙЛОВ В МНОГОВАРИАНТНЫХ
РАСЧЕТАХ MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN ДЛЯ
ВАРЬИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И
МАТЕРИАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ
ЗОНЫ**

Митенкова Е.Ф. Описание модуля VAR-GM генерации расчетных файлов в многовариантных расчетах MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN для варьирования геометрических и материальных параметров активной зоны / Е.Ф. Митенкова, Е.В. Соловьева — (Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № IBRAE-2011-06). — М. : ИБРАЭ РАН, 2011. — 25 с. — Библиогр.: 10 назв. — 60 экз.

Данная работа выполнена в рамках разработки специализированного программно-вычислительного комплекса (п/к) CFC_BN, предназначенного для моделирования топливных циклов на базе заданных активных зон реакторов с использованием MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN. Модуль VAR-GM предназначен для генерации расчетных файлов, формирующихся при варьировании геометрических и материальных параметров твэл, ТВС и конфигурации активной зоны при порядном или ТВС-ом задании с учетом ограничений, накладываемых форматными возможностями MCNP5.

Представлены результаты работы модуля VAR-GM при анализе возможностей применения металлического (U-Pu-Zr) топлива в режиме разовой загрузки на начальном этапе работы реактора типа БН-800.

©ИБРАЭ РАН, 2011

Mitenkova, E. VAR-GM module generation of calculated files for varying geometry and core material parameters in MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN multiple calculations / E.F. Mitenkova, E.V. Solovjeva — (Preprint / Nuclear Safety Institute RAS, July 2011, № IBRAE-2011-06). — Moscow : NSI RAS, 2011. — 25 p. — Bibliogr.: 10 items.

This work is realized as a part of the specialized programming complex CFC_BN for fuel cycle simulation on the basis of cores in MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN calculations. The VAR-GM is intended for generation of calculated files for fuel pins, fuel assembly at varying geometry and material parameters. Also the core variations are considered for its row and FA representation at some MCNP5 limitations of format possibilities. The VAR-GM results are represented at the applicability analyses of metallic (U-Pu-Zr) fuel in the mode of single loading for initial stage of BN-800 operation.

©Nuclear Safety Institute, 2011

Описание модуля VAR-GM генерации расчетных файлов в многовариантных расчетах MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN для варьирования геометрических и материальных параметров активной зоны

Е.Ф.Митенкова, Е.В.Соловьева

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52

тел.: (495) 955-22-02, факс: (495) 955-20-29, эл. почта: mit@ibrae.ac.ru

Введение	3
1 Формирование вариантов расчетных ячеек и макроячеек ТВС	4
2 Формирование конфигураций расчетной модели активной зоны	6
3 Блок модификации параметров ТВЭЛ, ТВС	8
3.1 Процедуры изменения геометрических параметров твэл	8
3.2 Процедуры вычисления объемов топливных зон	9
4 Расчеты выгорания ячеек ТВС с металлическим (U-Pu-Zr) и МОКС топливом	11
4.1 ТВС с различным числом твэл с фиксированной геометрией	11
4.2 ТВС с 91 твэл с металлическим топливом	12
4.3 Особенности изменения K^∞ и накопления Pu с натрием или гелием в зазоре твэл	13
4.4 Моделирование топливных циклов на основе рециклированного топлива	15
5 Реакторные расчеты в MCNP – MONTEBURNS – ORIGEN	16
5.1 Выбор начальной компоновки активной зоны	16
5.2 Особенности расчета $K_{эф}$ в задачах выгорания	18
5.3 Расчет коэффициента воспроизводства KB	20
Литература	24
Приложение	25

Введение

Вычислительные процедуры модуля VAR-GM входят в состав специализированного программно-вычислительного комплекса CFC_BN [1, 2], предназначенного для моделирования топливных циклов на базе заданных активных зон реакторов. Данный модуль предназначен для генерации расчетных файлов, формирующихся при варьировании геометрических и материальных параметров ТВЭЛ, ТВС и по заданным параметрам конфигурации активной зоны для последующих многовариантных расчетов, осуществляемых средствами п/к MCNP5-MONTEBURNS1.0-ORIGEN2 [3 – 5]. На основе анализа результатов таких расчетов в рамках конкретных решаемых задач оказывается возможна оптимизация некоторых параметров ТВЭЛ, ТВС, активной зоны. Использование данного модуля возможно для реакторов типа ВВЭР и БН при порядном или ТВС-ом задании активной зоны с соответствующими ограничениями, которые накладываются синтаксическими (форматными) возможностями MCNP5.

Входные файлы для представленных процедур модуля VAR-GM базируются на заданных согласованных расчетных файлах п/к MCNP (файл *INP*) и MONTEBURNS (файл *INP.inp*), включающих детальное описание геометрии и нуклидного состава материалов исследуемой активной зоны, которые дополняются входными данными для соответствующих варьировемых параметров. В результате формируются выходные файлы *OUT* и *OUT.inp*, являющиеся модифицированными файлами *INP* и *INP.inp*, а также «*tmp*» файлы, содержащие дополнительную информацию. При проведении многовариантных расчетов имена выходных файлов генерируются с учетом параметров варьирования (см. 1).

Для моделирования топливных циклов в п/к CFC_BN предусматривается порядное (*RW*) и ТВС-ое задание активной зоны. Ряды включают ТВС, расположенные на одинаковом расстоянии от центральной ТВС с учетом компоновки активной зоны [1]. При порядном задании, как правило, используются одинаковые высотные разбиения для всех ТВС активной зоны. При ТВС-ом представлении для каждой ТВС возможно задание своей структуры по высоте.

В настоящей версии предполагается моделирование топливных циклов с оксидным урановым (идентификатор UO или O), карбидным (UC или C), смешанным уран-плутониевым оксидным топливом МОКС (идентификатор M) и металлическим уран-плутониевым легированным топливом вида U-(pp)Pu-(zz)Zr (идентификатор Z).

Далее все примеры приведены для моделирования топливных циклов на базе активных зон реактора типа БН.

1 Формирование вариантов расчетных ячеек и макроячеек ТВС

Основное назначение процедуры *bn_cell* – формирование вариантов ячейки ТВС, различающихся составом топлива, плотностью и геометрическими параметрами твэлов. Параметры процедуры включаются в файл *INP*. В результате формируются файлы, являющиеся модифицированными *INP* файлами кода MCNP с заданными составами материалов и плотности.

При задании типа топлива используются приведенные выше идентификаторы. При моделировании ячеек ТВС со смешанным уран-плутониевым оксидным топливом или металлическим уран-плутониевым легированным топливом следует использовать развернутое наименование топлива в виде U-(pp)Pu-O, U-(pp)Pu-(zz)Zr с указанием доли Pu и Zr.

При формировании вариантов с помощью описываемой процедуры допускается использование различных библиотек ядерно-физических данных.

Пример 1. Задание параметров во входном файле для процедуры *bn_cell*

```
Cell_test (11.01.2011)
с Fuel: T_F:U-8Pu-10Zr WG LIB: B7, J3 T = 1000K Var_ro = 15.25–15.75, 0.2 U: 0.2
с Fuel: Var_pu = 8, 10, 15
с Var_pin: (8.6×0.5) gap = 0.1, (8.0×0.5) gap = 0.1
с MAT_F: N1, M11
с ***** BN-cell >>> pz 1 ex 8 *****
...
```

Первая строка – информационная, включающая имя задачи и дату создания базового файла *Cell_test*. Дата изменяется для формируемых вариантов файлов. Указанное имя задачи используется далее при образовании имен модифицированных файлов, имена которых формируются по следующей схеме: «имя задачи» *LIB_ppPu_gn_ro+N*.

- *LIB* – идентификатор используемой библиотеки ядерно-физических данных (B7, B-7, B-VII, B-VII, J3, JENDL3)
- *ppPu* – указывает на вариацию доли плутония, pp доля плутония в данном варианте.
- *gn* – указывает на вариант примененной геометрии твэла.
- *ro+N* – указывает на вариант с варьированием плотности топлива, 0 – начальная плотность, 1 – значение плотности, определяемое в соответствии с шагом варьирования, например, *cell_test_b-7_ro+1*.

Строка *Fuel*: содержит характеристики топлива. После ключевого слова *T_F*: указывается идентификатор топлива UO≡O, UC≡C, U-(pp)Pu-O (МОКС), U-(pp)Pu-(zz)Zr (металлическое), где «pp» означает массовую долю плутония, «zz» – массовую долю циркония (по умолчанию *zz* = 10%). Указание массовой доли плутония является обязательным.

Для плутоний-содержащего топлива указывается тип используемого плутония – *RG* (реакторного типа) или *WG* (оружейного типа) с указанием массовой доли Pu239. При задании типа плутония – *RGxx* или *WGxx* – «xx» указывает массовую долю Pu239 в топливе. По умолчанию *xx* = 60% для *RG* типа и 94% для *WG* типа. Содержание других изотопов плутония задается в соответствии с производимым в настоящее время топливным концентратом с плутонием [6]. При анализе топливных циклов наиболее распространенными являются следующие составы плутония

RG60 : Pu239 – 60%, Pu240 – 25%, Pu241 – 8%, Pu242 – 6%, Pu238 – 1% ;
RG54 : Pu239 – 54%, Pu240 – 27%, Pu241 – 10%, Pu242 – 7%, Pu238 – 2% ;
WG94 : Pu239 – 94.93%, Pu240 – 4.69%, Pu241 – 0.38%.

Используемый в МОКС и МЕТ топливе обедненный уран может иметь различную долю U235, задаваемую в виде $U: x.x$, (по умолчанию $x.x = 0.3\%$).

Конструкция « $Var_ro = xx.xx - yy.yy, d.dd$ » задает варьирование плотности топлива при расчете вариантов базовой конфигурации с указанием интервала и шага изменения плотности. При отсутствии варьирования плотность топлива задается в виде $ro = xx.xx$ (г/см³).

Конструкция « $LIB:A, B T = tttK$ » определяет библиотеки ядерно-физических данных. Здесь « A, B » – имена используемых библиотек при температуре « ttt » в градусах Кельвина (К). В настоящее время при моделировании используются библиотеки ENDF/B-VII и JENDL3.3. Возможно использование сокращенных имен: B7, B-7, B-VII, B VII, J3, JENDL3. При идентификации нуклидов в составе материалов в соответствии с форматом MCNP для заданных значений температуры и указанной библиотеки формируются расширения вида « xxc ». Список соответствующих расширений содержится в файле *sp_lib*

Пример 2. Фрагмент файла *sp_lib*

```

с T,K      B7 /B-7, B-VII, B VII/
  300      ulc
  350      vlс
  ...
  2000     ugc
с T,K      J3 /JENDL3, JENDL3.3/
  300      jlс
  350      iac
  ...
  1500     j6с
  1600     j7с

```

Конструкция « $Var_pu = xx.xx-yy.yy, d.dd$ » используется для плутониевого топлива и задает варьирование доли плутония с указанием интервала и шага изменения. Варьирование может задаваться и перечислением в виде « $Var_pu = xx.xx, yy.yy, zz,zzz$ », количество значений не ограничено. При отсутствии варьирования значение доли плутония в топливе содержится в идентификаторе топлива.

Строка *Var_pin*: указывается для формирования вариантов в соответствии с геометрическими параметрами твэлов. Параметры твэла указываются в виде $(x.xxy.y)$, где « $x.x$ » – внешний диаметр (мм), « $y.y$ » – толщина оболочки, и $gap = d.d$ – величина зазора между топливом и оболочкой. По умолчанию для металлического топлива принимается $d.d = 0.1$ (мм). Для корректной работы необходимо задание согласованных величин внешнего диаметра, толщины оболочки и зазора. При отсутствии *Var_pin* используется геометрия твэла, определенная во входном файле. Имеется возможность варьирования толщины оболочки и зазора при постоянном внешнем диаметре, с соответствующим пересчетом диаметра топлива.

Строка с указателем *Mat_F* содержит номера модифицируемых материалов. Для ячейки возможно использование нескольких материалов, количество которых указывается идентификатором Nxx, Mxx – идентификатор материала. В настоящей версии допускается только один материал.

В результате выполнения процедуры формируются модифицированные *INP* файлы кода MCNP. Для сформированного файла в первой строке указываются значения параметров данного варианта (внешний радиус твэла (см), доля плутония (%), плотность (г/см³), библиотека ядерно-физических данных).

Пример 3. Фрагмент одного из выходных файлов с именем *Cell_test_jendl3_8Pu_g1_ro+2*

```

Cell_test (07.09.2011) R = 0.43 Pu = 8 RO = 15.65 LIB = J3
с Fuel: T_F:U-8Pu-10Zr WG LIB: B7, J3 T = 1000K Var_ro = 15.25–15.75, 0.2 U: 0.2
с Fuel: Var_pu = 8, 10, 15
с Var_pin: (8.6×0.5) gap = 0.1, (8.0×0.5) gap = 0.1
с MAT_F:N1, M11
с ***** BN-cell >>> pz 1 ex 8 *****
...
11102 11      -15.65  $ -15.25
...
с geometry_fuel_pin
11701      pz 0.1

```

```

11101    cz  0.000001
11102    cz  0.370      $ 0.360
11103    cz  0.380      $ 0.390
11104    cz  0.430      $ 0.430
...
m11
  92235.i4c - 0.00164
  92238.i4c - 0.81836
  94239.i4c - 0.07594
  94240.i4c - 0.00375
  94241.i4c - 0.00030
  40190.i4c - 0.05145
  40191.i4c - 0.01122
  40192.i4c - 0.01715
  40194.i4c - 0.01738
  40196.i4c - 0.00280

```

2 Формирование конфигураций расчетной модели активной зоны

Основное назначение процедуры *bn_fcb0* (*fuel_cycle_begin*) – формирование вариантов базовой (начальной) конфигурации расчетной модели активной зоны с различными топливными композициями, отличающимися обогащением U235, долей Pu, плотностью топлива. Под базовой конфигурацией подразумевается структура активной зоны, в которой ТВС соответствующих рядов объединены в зоны с заданными обогащениями топлива. В зону могут быть включены и отдельные ТВС из разных рядов, допускается принадлежность ТВС с одинаковым обогащением различным зонам. Количество задаваемых зон не ограничивается. Базовые комплектации активных зон существующих реакторных систем обычно состоят из трех до пяти зон.

При формировании вариантов допускается использование различных библиотек ядерно-физических данных. Для активной зоны используется «порядное» (*RW*) и «ТВС-ое».

Параметры процедуры включаются в файл *INP*, в результате формируются файлы, являющиеся модифицированными *INP* файлами для кода MCNP.

Пример 4. Фрагмент входного файла *INP* процедуры *bn_fcb0*

```

BN_test (14.01.2011)
c Core: R1-8(8.8) R9-10(9.0) R11-12(9.2) R13-15(10.4) / 1 строка /
c Fuel: T_F: Z WG U: 0.2 LIB: B7, J3 T = 1000K Var_ro = 15.25-15.65, 0.2 / 2 строка /
c Mat_F: N60, H04, M110, M120, M130, M140, M150, M160 ,M210, M220 / 3 строка /
c Mat_F: M230, M240, M250, M410, M420, M430, M440 / 4 строка /
9 0 -3 : 4 : 93 : 94 : 95 : -96 : -97 : -98
3 7 3.4016E-2 3 -1 -93 -94 -95 96 97 98 $ stal + Na
1 0 1 -2 -93 -94 -95 96 97 98 fill=9
4 7 3.4016E-2 2 -4 -93 -94 -95 96 97 98 $ stal + Na
2 0 -13 16 -14 17 -15 18 u=9 lat=2....
...

```

Первая строка – информационная, включающая имя задачи и дату создания базового файла *BN_test*. Дата изменяется для формируемых вариантов файлов. Указанное имя задачи используется далее в схеме образования имен модифицированных файлов: «имя задачи»_LIB_ro+N.

- **LIB** – идентификатор используемой библиотеки ядерно-физических данных (B7, B-7, B-VII, B VII, J3, JENDL3)
- **ro+N** – указывает на вариант с варьированием плотности топлива, 0 – начальная плотность, 1 – значение плотности, определяемое в соответствии с шагом варьирования, например, *BN_test1_b-7_ro+1*.

Строка **Core**: идентификатор *R* определяет ряды ТВС активной зоны с соответствующими параметрами топливных композиций. В зависимости от типа топлива этот параметр определяет массовую долю

Pu (для МОКС или металлического топлива) или обогащение U235 (для UO2 или UC топлива) с указанием характеристик топлива. В соответствии с типом топлива (см. строку **Fuel**) в указанном примере с металлическим легированным топливом R1-8 (8.8) для рядов с 1 по 8 определяет массовое содержание плутония 8.8% .

Строка **Fuel**: содержит характеристики топлива. После ключевого слова **T_F**: указывается идентификатор топлива UO₂, UC₂, M (МОКС), xxZ, где «xx» означает массовую долю циркония (по умолчанию xx = 10%).

Для плутоний-содержащего топлива указывается тип используемого плутония – **RG** или **WG** с указанием массовой доли Pu239.(см. п. 1)

Конструкция «**Var_ro**= xx.xx-yy.yy, d.dd» задает варьирование плотности топлива аналогично описанию в п.1. При отсутствии варьирования плотность топлива задается в виде **ro**= xx.xx (г/см³).

Конструкция «**LIB:A, B T=tttK**» определяет библиотеки ядерно-физических данных (см. п.4).

Строка **Mat_F** содержит номера модифицируемых материалов. Идентификатор **Nxx** определяет количество материалов (в примере 60 материалов), идентификатор **Hxx** определяет высотное разбиение ТВС (в примере указано 4 высотные зоны). Далее через запятую перечислены материалы. При «порядном» представлении указывается номер только первого слоя высотного разбиения (для остальных слоев номер определяется автоматически по заданной схеме [1]). При «ТВС-ом» представлении материалы указываются в явном виде, т.е. для каждого слоя свой номер. В этом случае используется ключевое слово **Mat_F_S**.

В результате выполнения процедуры формируются модифицированные **INP** файлы кода MCNP с заданными составами материалов и плотности. Дополнительно формируются файлы «имя задачи» **tab0.txt**, где представлено «усеченное» описание исходной активной зоны в «RW» представлении и файл «имя задачи» **дата.tmp**, содержащий отчет о выполнении процедуры.

В примере 5 приведен фрагмент «**tmp**» файла, полученного после выполнения процедуры с входным файлом **INP** (пример 4), в частности здесь содержатся имена всех сформированных файлов с вариантами конфигураций активной зоны. Включен фрагмент описания активной зоны, состоящей из 15 рядов ТВС с высотным разбиением из восьми областей (для симметричной модели указываются 4 слоя) с 4 зонами обогащения. Используется металлическое уран-плутониевое легированное топливо с долей Zr = 10%. Нумерация материалов начинается с нижнего слоя активной зоны.

Пример 5. Фрагмент файла – отчета **BN_test_24.05.2011.tmp**

IBRAE (24.05.2011 14:32:20)
 BN_test (04.02.2011) H=95cm
 с Core: R1-8(8.8) R9-10(9.0) R11-12(9.2) R13-15(10.4)
 с Fuel: T_F: Z WG U: 0.2 LIB: B7, J3 T= 1000K VAR_RO = 15.25–15.65, 0.2
 * 2 используемые библиотеки b-7 jendl3 при T = 1000K
 Построение таблицы базовой конфигурации для файла BN_test
 Обедненный уран с 0.2% U235
 Базовая конфигурация активной зоны для файла met_test
 Ряды = 15 Число высотных зон = 4, 1(1–8) , 2(9–10) , 3(11–12) , 4(13–15)
 Доля Zr =1.00000e-01
 Состав плутония WG
 Pu39–0.9493, Pu40–0.0469, Pu41–0.0038

зона	ряд	кол-во ТВС	материалы	Pu%	Pu	U235	U238
1	01	7	M110,M111,M112,M113	08.80	8.80000e-02	1.62400e-03	8.10376e-01
1	02	12	M120,M121,M122,M123	08.80	8.80000e-02	1.62400e-03	8.10376e-01
1	03	18	M130,M131,M132,M133	08.80	8.80000e-02	1.62400e-03	8.10376e-01
1	04	24	M140,M141,M142,M143	08.80	8.80000e-02	1.62400e-03	8.10376e-01
1	05	30	M150,M151,M152,M153	08.80	8.80000e-02	1.62400e-03	8.10376e-01
1	06	36	M160,M161,M162,M163	08.80	8.80000e-02	1.62400e-03	8.10376e-01
1	07	42	M210,M211,M212,M213	08.80	8.80000e-02	1.62400e-03	8.10376e-01

1	08	48	M220,M221,M222,M223	08.80	8.80000e-02	1.62400e-03	8.10376e-01
2	09	54	M230,M231,M232,M233	09.00	9.00000e-02	1.62000e-03	8.08380e-01
2	10	60	M240,M241,M242,M243	09.00	9.00000e-02	1.62000e-03	8.08380e-01
3	11	66	M250,M251,M252,M253	09.20	9.20000e-02	1.61600e-03	8.06384e-01
3	12	72	M410,M411,M412,M413	09.20	9.20000e-02	1.61600e-03	8.06384e-01
4	13	78	M420,M421,M422,M423	10.40	1.04000e-01	1.59200e-03	7.94408e-01
4	14	84	M430,M431,M432,M433	10.40	1.04000e-01	1.59200e-03	7.94408e-01
4	15	90	M440,M441,M442,M443	10.40	1.04000e-01	1.59200e-03	7.94408e-01

Среднее $Z_{av}=9.49739$

Тип топлива MET

* Невыгорающее элементы Zr в топливе U-Pu-10Zr

40190.u7c – 0.05145

40191.u7c – 0.01122

40192.u7c – 0.01715

40194.u7c – 0.01738

40196.u7c – 0.00280

Файлы для библиотеки B-VII

RO = 15.25 файл met_test1_b-7_ro+0

RO = 15.45 файл met_test1_b-7_ro+1

RO = 15.65 файл met_test1_b-7_ro+2

Файлы для библиотеки JENDL3

RO = 15.25 файл met_test1_jendl3_ro+0

RO = 15.45 файл met_test1_jendl3_ro+0

RO = 15.65 файл met_test1_jendl3_ro+2

3 Блок модификации параметров ТВЭЛ, ТВС

При формировании рабочих конфигураций активной зоны может потребоваться дополнительный анализ нейтронно-физических характеристик, например, отношений нейтронных потоков на границах зон, натриевый пустотный эффект реактивности и др. Поскольку в процессе работы реактора происходят изменения радиальных и аксиальных характеристик твэлов, то предусмотрено варьирование параметров высотного разбиения, радиального расширения и общей высоты активной зоны. При этом с учетом изменяемых параметров радиального и аксиального разбиений определяются коэффициенты перераспределения массы топлива в заданных областях активной зоны, и в результате формируются новые расчетные файлы. Из условия сохранения массы определяется «новая» плотность топлива, которая заменяет «старую» во входном файле *INP*.

3.1 Процедуры изменения геометрических параметров твэл

Основное назначение процедуры *mod_extend* – изменение параметров, связанных с аксиальным и радиальным изменением твэлов.

Входные файлы – *INP* и *INP.inp*. В результате формируется файл *OUT*, представляющий модифицированный расчетный *INP* файл MCNP.

Параметры для изменения высоты активной зоны включаются во входной файл *INP* строкой с указателем **Mod_H**: *old=xxx* – старое значение высоты, *new=yyy* – новое значение.

В рамках модели MCNP допускается варьирование массы топлива при неизменных значениях толщины оболочки и зазора, при этом за счет изменения диаметра топлива производится перерасчет внешнего диаметра.

В примере 6 предполагается только изменение высоты.

Пример 6. Фрагмент входного файла *INP (mod_extend)*

```
bn800_8 (27.07.07) 217(15.0) 330(15.7) 174(14.7) H=105cm
с H=105-125 (20cm) stal + Na , radial steel shield
с Mod_H : old=105 new=110cm
9   0   -3 : 4 : 93 : 94 : 95 : -96 : -97 : -98
...
```

3.2 Процедуры вычисления объемов топливных зон

В данном разделе приводится описание двух процедур – процедуры вычисления объемов топливных зон *mod_burnvol* и процедуры масштабирования объемов топлива *mod_vult_h*.

Основное назначение процедуры *mod_burnvol* – вычисление объемов при «RW» представлении активной зоны с учетом заданного высотного разбиения.

Параметры для вычисления объемов включаются во входной файл *INP.inp* и дополнительно выделяются знаком «/». В результате выполнения процедуры формируется файл *OUT.inp*, отвечающий входным параметрам.

Пример 7. Фрагменты входного и выходного файлов для *mod_burnvol*

```
bn800_8 (27.07.07)E=2100 187(15.0)330(15.7)174(14.7) H=95cm           / 1 строка /
PC   ! Z20*S691*A/r03-06/r05-12/r07-12/*                             / 2 строка /
66   ! *Zone0060/H04/08-05-02/* Num mat /S37/=25.7296 /S91/=40.2026   / 3 строка /
110  ! u=11 S91  92235 -0.1145950  R7  20.0                          / 4 строка /
...
113  !           92235 -0.1145950  R7  15.0
...
410  ! u=22 S37 92235 -0.114595  R72  20.0  1.440e+3  5.78916986e+4
...
```

Выходной файл *OUT.inp*

```
bn800_8(27.07.07)E=2100 187(15.0)330(15.7)174(14.7) 105cm           / 1 строка /
PC   ! Z20*S691*A/r03-06/r05-12/r07-12/* /VOL/=22.13450e+6           / 2 строка /
66   ! *Zone0060/H04/08-05-02/* Num mat /S37/=25.7296 /S91/=40.2026   / 3 строка /
110  ! u=11 S91  92235 -0.1145950  R7  20.0  1.400E+2  5.43224248E+3 / 4 строка /
...
113  !           92235 -0.1145950  R7  15.0  1.050e+2  2.70161260E+3
...
410  ! u=22 S37 92235 -0.1145950  R72  20.0  1.440e+3  5.78916986E+4
...
5.43224248e+3 ! 5.43224248E+3 ! 11  u=11           / вычисленный ! «старый» объемы /
8.14836372e+3 ! 8.14836372E+3 ! 31
...
/VOL_MAT/
2.87238e+4           / 1-ый ряд /
4.92407e+4
...
3.43732e+5           / 15-ый ряд /
```

Параметры процедуры указываются в 3-ей строке файла. В 1-ой позиции приводится общее число выгорающих зон (в примере 7 – это 66). Идентификатор **Zonexxxx* указывает количество выгорающих зон (в примере =60), которые должны быть модифицированы. Идентификатор */Hxx* / указывает высотное разбиение ТВС (в примере 7 – это 4). Идентификаторы */Sxx* / задают значения параметров, характеризующих площади сечений твэлов в ТВС с учетом общего числа твэлов и их конструктивных особенностей (центральное отверстие и др.).

С 4-ой строки указываются идентификаторы выгорающих материалов согласованно с соответствующими идентификаторами файла *INP* кода MCNP. В этой же строке указывается значение *Sxx*, относящееся ко всем последующим строкам, которые не содержат идентификатор *Sxx*. Новое значение *Sxx* мо-

жет быть указано в любой последующей строке. Общее количество таких строк определяется идентификатором **Zone*. Указатель *Rxx* определяет количество ТВС соответствующего ряда (для *RW* представления активной зоны) с учетом компоновки – размещение системы СУЗ, АЗ и др. Высотное разбиение ТВС задается указанием парциальных высот, суммарное значение которых определяет общую высоту активной зоны. Для контроля при вычислении объемов ТВС указываются суммарные значения парциальных высот с учетом количества ТВС соответствующего ряда.

В соответствии с синтаксисом входного файла кода MONTEBURNS вычисленные объемы выгорающих зон добавляются в формируемый файл с сохранением «старых» значений. Во вторую строку файла записывается значение суммарного объема топлива всех ТВС активной зоны с идентификатором */VOL/*. Также для каждой выгорающей зоны вычисляется объем топлива записываемый в конце файла с идентификатором */VOL_MAT/*. Эти значения необходимы в расчетах активных зон с ТВС, содержащими твэлы различных диаметров.

Пример 8. Фрагменты входного файла и выходного файла для *mod_vult_h*

```
bn15y67 (22.03.08)He 91tv(r=0.375cm)UC(1-8:12.0, 9-12:12.7, 13-15:13.0%)95cm / 1 строка /
PC ! Z1*691*A/r03-06/r05-12/r07-12/* / 2 строка /
66 ! *Zone0060/H04/08-07-02/* /K/=1.5 / 3 строка /
110 ! u=11 91 92235 -0.1145950 R 7 20.0 1.400E+2 / 4 строка /
...
93 ! 91 92235 -0.0061705 R252 20.0 5.040E+3
94 ! 37 92235 -0.0061705 R198 40.0 7.920E+3
...
4.03140633E+3 ! 11 u=11 5.43224248E+3
6.04710948E+3 ! 31 8.14836372E+3
...
```

Выходной файл *OUT.inp*

```
bn15y67 (22.03.08)He 91tv(r=0.375cm)UC(1-8:12.0, 9-12:12.7, 13-15:13.0%)95cm / 1 строка /
PC ! Z1*691*A/r03-06/r05-12/r07-12/* /VOL/=2.83545e+6 / 2 строка /
66 ! *Zone0060/H04/08-07-02/* /K/=1.5 / 3 строка /
110 ! u=11 s91 92235 -0.1145950 r7 20.0 ! 30.00 2.100e+2 / 4 строка /
...
4.03140633E+3 ! 11 u=11 5.43224248E+3 6.04710950e+03
6.04710948E+3 ! 31 8.14836372E+3 9.07066422e+03
...
/VOL_MAT/
2.87238e+4 / 1-ый ряд /
4.92407e+4
...
1.47722e+5 / 15-ый ряд /
```

Параметры процедуры *mod_vult_h* указываются в 3-ей строке файла *INP.inp*. Здесь также как и во входном файле процедуры *MOD_BURNVOL* приведено общее число выгорающих зон (66), количество выгорающих зон (60), которые должны быть модифицированы, высотное разбиение ТВС (4). Идентификатор */K/=* коэффициент масштабирования выгорающих зон.

С 4-ой строки указываются идентификаторы выгорающих материалов (см. п. 3.2) согласованно с соответствующими идентификаторами файла *INP* кода MCNP. Указатель *Rxx* определяет количество ТВС соответствующего ряда (для «порядного» представления активной зоны) с учетом компоновки – размещение системы СУЗ, АЗ и др. Высотное разбиение ТВС задается указанием парциальных высот. Модифицированные значения парциальных высот записываются в те же строки с сохранением «старых» значений. Для контроля при вычислении объемов ТВС указываются суммарные значения парциальных высот с учетом количества ТВС соответствующего ряда.

Аналогично процедуре *mod_burnvol* вычисленные объемы выгорающих зон добавляются в формируемый файл. Модифицированные значения объемов выгорающих зон указываются в согласованных файлах для проведения расчетов выгорания в п/к MCNP – MONTEBURNS – ORIGEN.

4 Расчеты выгорания ячеек ТВС с металлическим (U-Pu-Zr) и МОКС топливом

При решении задач на выгорание в ячейчных расчетах обычно используются два типа ячеек – бесконечная ячейка решеток ТВС, состоящая из ТВС одного типа с зеркальным отражением по высоте и макроячейка, состоящая из 7 и 19 ТВС в плоскости, с граничными радиальными условиями утечки и зеркальным отражением по высоте. Также возможно рассмотрение макроячеек с заданным гетерогенным высотным распределением и реальными аксиальными граничными условиями.

В данном разделе приводятся примеры расчетов выгорания бесконечных ячеек с ТВС различной комплектации с МОКС и металлическим (U-Pu-10Zr) топливом и макроячейки из 7 ТВС. При этом анализируются ТВС с разным числом твэл и различными геометрическими характеристиками.

- ТВС – 91 твэл и 127 твэл.
- Твэлы различной геометрии с варьированием следующих параметров:
 - внешний диаметр;
 - толщина оболочки;
 - зазор между топливом и оболочкой.
- Материал в зазоре – гелий, натрий.

Изменения основных нейтронно-физических характеристик – бесконечного коэффициента мультипликации K^∞ , накопления плутония и др. представляются в виде графиков. Представленные графики построены в пакете Origin 8.0 [7].

Для отображения изменения накопления ядер Pu239 и Pu241 в процессе облучения могут использоваться различные варианты – отношение суммы концентраций Pu239 и Pu241 к начальной их концентрации, отношение приращение концентраций Pu239, Pu241 относительно начальной концентрации U238. Выбор конкретного представления обуславливается спецификой решаемой задачей. Графики представлений изменения ядер плутония приведены на рис. 1.

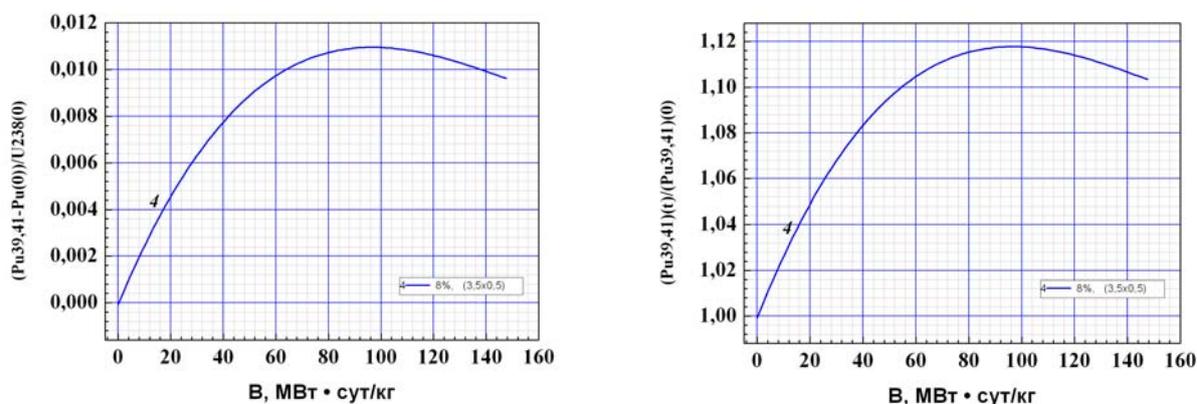


Рис. 1 Изменение с выгоранием накопления Pu в ТВС (91 твэл 7×0.5мм, Pu – 8%).

4.1 ТВС с различным числом твэл с фиксированной геометрией

На рис. 2 – 4 приведены графики основных нейтронно-физических характеристик для решетки ТВС, состоящей из 127 твэл (6.9×0.45 мм) или 91 твэл (8.6 ×0.45мм), величина зазора между топливом и оболочкой 0.1 мм, материал в зазоре – гелий.

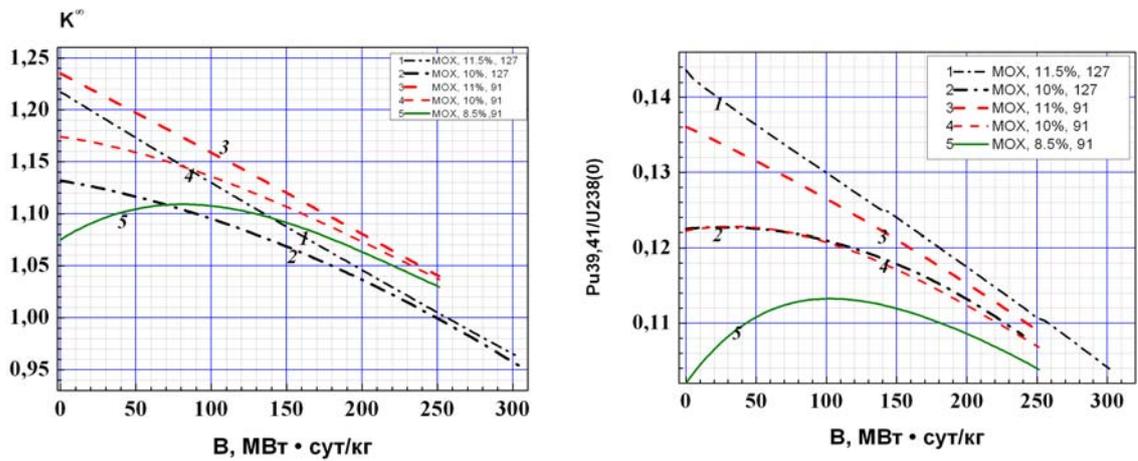


Рис. 2 Изменение с выгоранием K^∞ и накопления Pu в ТВС с 91 и 127 твэл с МОКС топливом.

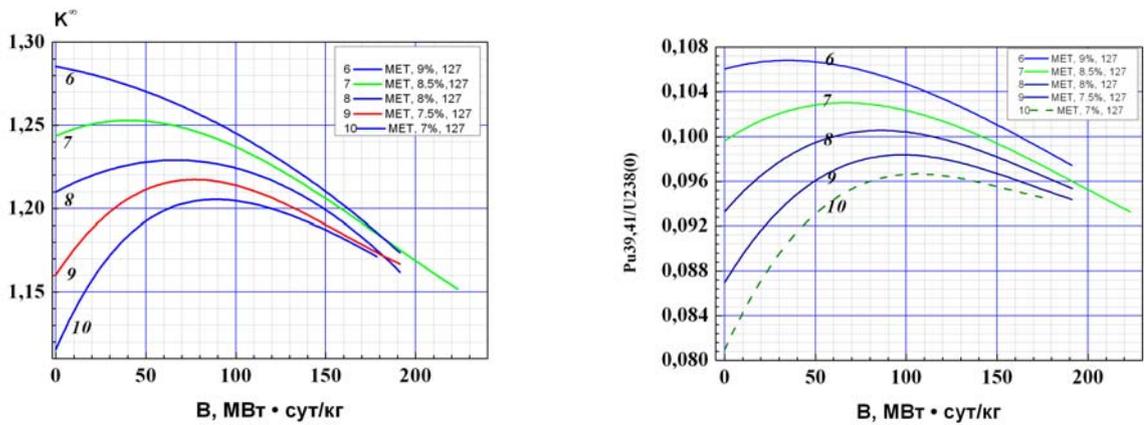


Рис. 3 Изменение с выгоранием K^∞ и накопления Pu в ТВС с 127 твэл с металлическим топливом.

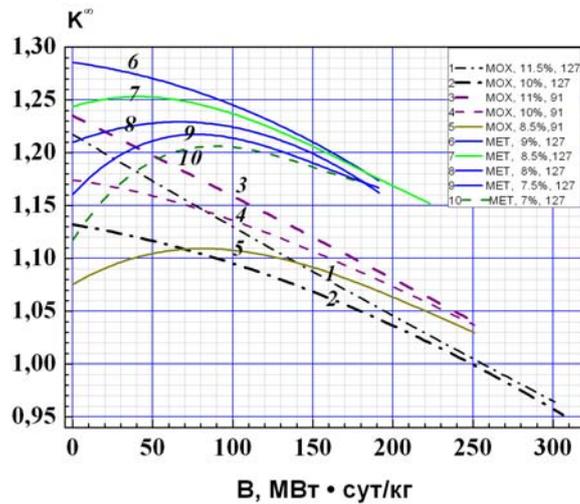


Рис. 4 Изменение с выгоранием K^∞ для ТВС с 91 и 127 твэл с металлическим и МОКС топливом.

4.2 ТВС с 91 твэл с металлическим топливом

На рис. 5 – 6 представлены результаты расчетов основных нейтронно-физических характеристик для решетки ТВС с 91 твэл разной геометрии. Рассмотрены твэл (7.2×0.6 мм) и (8.6×0.5 мм) с различными значениями зазора между топливом и оболочкой. В данных расчетах динамика изменения ядер плутония

представлена в виде отношения суммы концентраций Pu239 и Pu241 к их начальной концентрации (рис.5а, 5б, 5в).

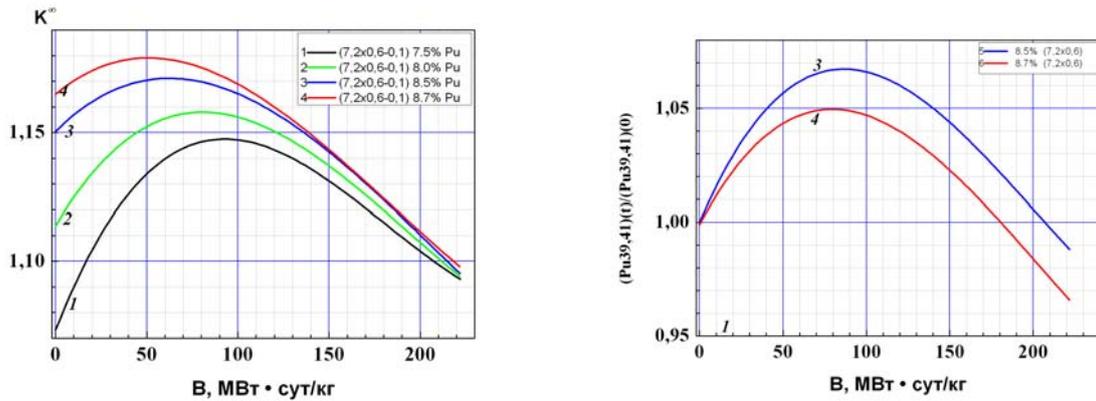


Рис. 5а Изменение с выгоранием K^∞ и накопления Pu в ТВЭЛ с твэл (7.2×0.6 мм) с зазором 0.1 мм .

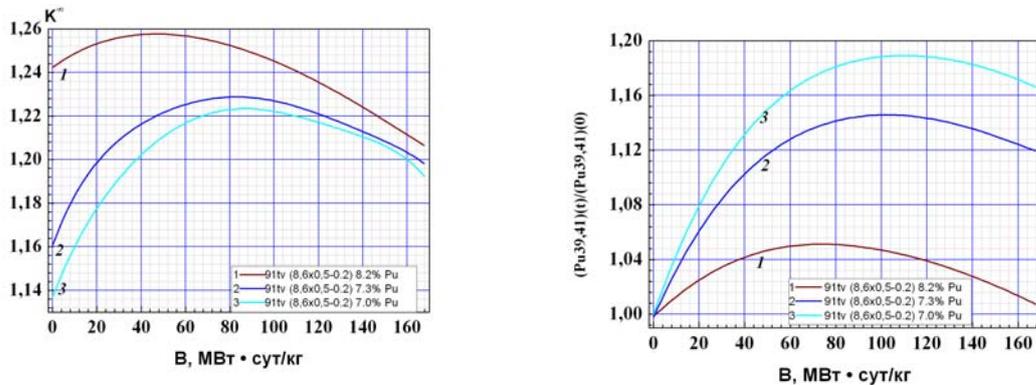


Рис .5б Изменение с выгоранием K^∞ и накопления Pu в ТВЭЛ с твэл (8.6×0.5 мм) с зазором 0.2мм.

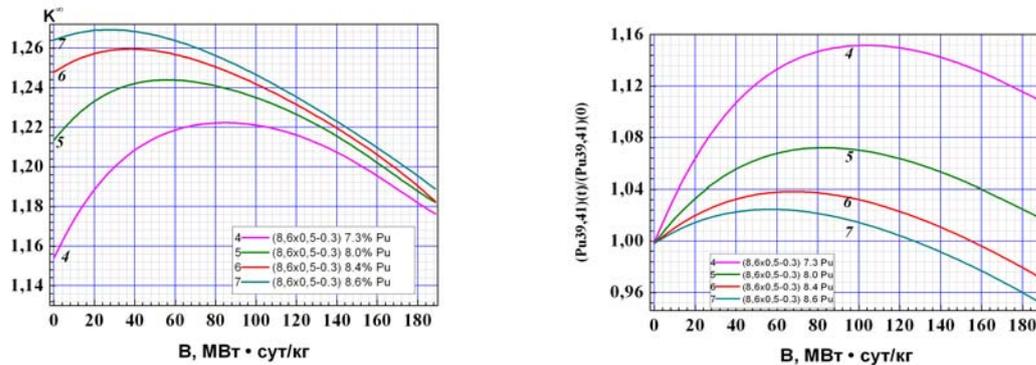


Рис. 5в Изменение с выгоранием K^∞ и накопления Pu в ТВЭЛ с твэл (8.6×0.5 мм) с зазором 0.3 мм.

4.3 Особенности изменения K^∞ и накопления Pu с натрием или гелием в зазоре ТВЭЛ

Рассматривается влияние натрия и гелия, находящихся в зазоре между топливом и оболочкой, на значения K^∞ и накопление плутония. На рис. 6 приведены графики изменения K^∞ и накопления Pu для ТВЭЛ с 91 твэл с одинаковой массой топлива, содержащейся в сердечнике с диаметром 6.4 мм.

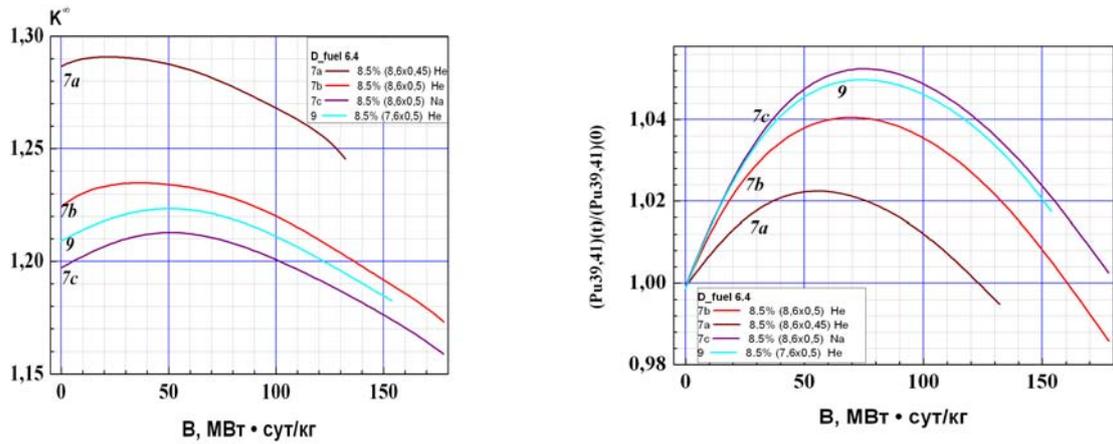


Рис. 6 Изменение с выгоранием K^∞ и накопления Pu в ТВС с 91 твэл с металлическим топливом.

Макроячейка ТВС. Расчет проводится для макроячейки, состоящей из 7 ТВС с 91 твэл. На рис.7 приведены графики изменения с выгоранием K^∞ для ТВС с твэл диаметром 7.6 мм и 8.6 мм, толщиной оболочки 0.5 мм.

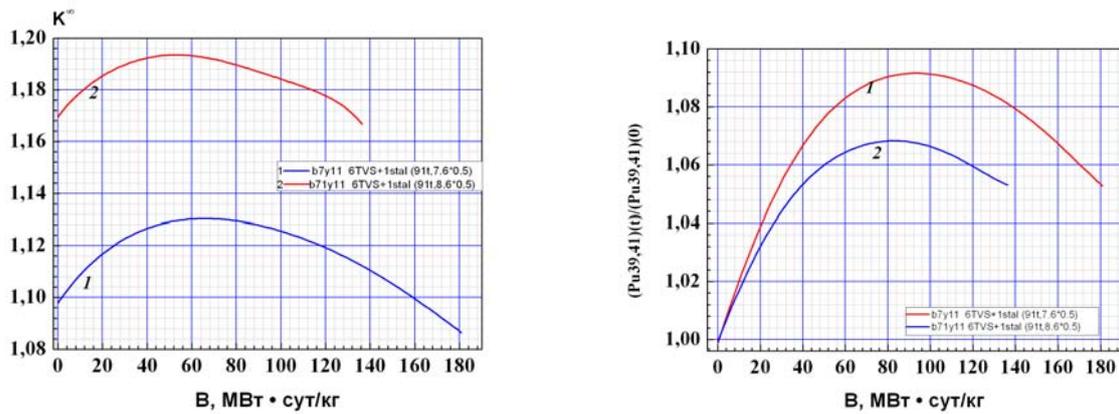


Рис. 7 Изменение с выгоранием K^∞ и накопление Pu в макроячейке с 91 твэл с металлическим топливом.

На рис. 8 приведены графики сравнительного анализа основных характеристик ТВС с 91 твэл (8.6x0.5) и зазором 0.2 и 0.3 мм. Доля плутония варьируется от 7.0% (кривая 3) до 8.6% (кривая 7).

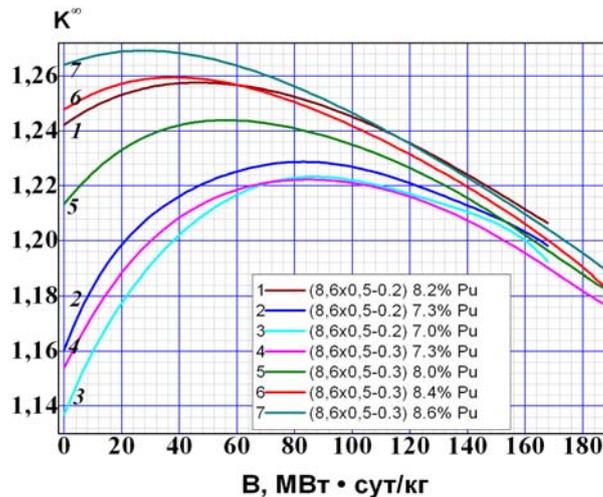


Рис. 8 Изменение с выгоранием K^∞ в ТВС с 91 твэл и зазором 0.2 и 0.3 мм с металлическим топливом

На рис.9 приведены графики сравнительного анализа основных характеристик ТВС с 91 твэл различного диаметра, толщиной оболочки в диапазоне от 0.45 мм (кривые 1, 7) до 0.6 мм (кривые 2,3,5,6), зазором 0.1мм. Доля плутония варьируется от 7.5% (кривые 1, 3) до 9% (кривая 10).

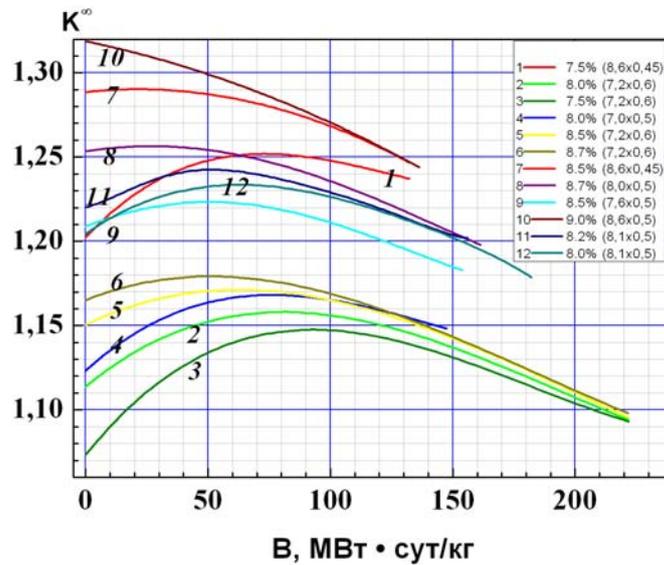


Рис. 9 Изменение с выгоранием K^{∞} в ТВС с 91 твэл и зазором 0.1мм с металлическим топливом.

4.4 Моделирование топливных циклов на основе рециклированного топлива

В рамках п/к CFC_BN [1] был описан комплекс вычислительных процедур для пошагового моделирования топливных циклов с использованием оксидного уранового топлива (UO_2). К настоящему времени возможности п/к CFC_BN расширены. Предусмотрено моделирование открытого топливного цикла, начального этапа внедрения замкнутого топливного цикла и частично-замкнутого топливного цикла. Допускается использование смешанного оксидного уран-плутониевого топлива (МОКС) и металлического легированного топлива (МЕТ).

С помощью п/к CFC_BN предполагается моделирование различных сценариев топливных циклов, определяемых допустимыми значениями базовых нейтронно-физических характеристик (запас реактивности на выгорание, средние и максимальные выгорания в ТВС и твэлах, линейная мощность твэлов и др.) и параметрами кампании (длительность и кратность перегрузок).

При моделировании топливных циклов, исходя из ограничений на линейную мощность твэлов, значений натриевого пустотного эффекта реактивности и др., допускается варьирование некоторых параметров активной зоны, зон воспроизводства и стального экрана (высота активной зоны, количество ТВС и др.). Также, в рамках базовых конфигураций активной зоны предусмотрено варьирование «геометрических» параметров ТВС и твэлов, включающих количество твэл в ТВС; диаметр твэл; шаг размещения твэл в ТВС; толщину оболочки твэл. Возможности прямых нейтронно-физических расчетов, осуществляемых с помощью п/к MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN, позволяют провести сравнительный анализ нейтронных характеристик активной зоны для различных режимов топливоиспользования, включая использование и регенерированного топлива разного состава.

При моделировании топливных циклов рециклированное топливо может иметь различный изотопный состав актинидов и продуктов деления, что обуславливается типом загружаемого топлива, параметрами решаемых задач и технологическими возможностями переработки отработавшего ядерного топлива. Для этого в п/к CFC_BN разработаны вычислительные процедуры, обеспечивающие формирование необходимых составов регенерированного топлива. Составы регенерированного топлива моделируются с учетом сохранения общей массы загружаемого топлива в твэл при следующих условиях:

- отбрасываются все шлаки- продукты деления отработавшего ядерного топлива;
- осуществляется частичная регенерация шлаков – продуктов деления с указанием сохраняемых в топливе изотопов продуктов деления;
- не происходит никакого разделения накопленных актинидов;
- удаляются все минорные актиниды, изотопы урана и плутония не разделяются;

- происходит включение определенных минорных актинидов с заданными изотопными составами (TRU топливо).

Для обеспечения требуемых значений нейтронно-физических характеристик в активной зоне с рециклированным топливом необходимы различные сценарии топливных циклов, например, на начальных этапах с использованием UO_2 или UC топлива может потребоваться подпитка $U235$. Поэтому один из сценариев использования рециклированного топлива предполагает перераспределение массы удаляемых продуктов деления с добавлением $U235$ и $U238$ в соответствии с заданными обогащениями $U235$. При этом, начиная с определенного рецикла, зависящего от типа используемого топлива и параметров кампании, при накоплении соответствующего количества ядер $Pu239$ (и $Pu241$) необходимость в подпитке исчезает, и тогда для последующих рециклов в регенерированном топливе может быть использован обедненный уран [7, 8].

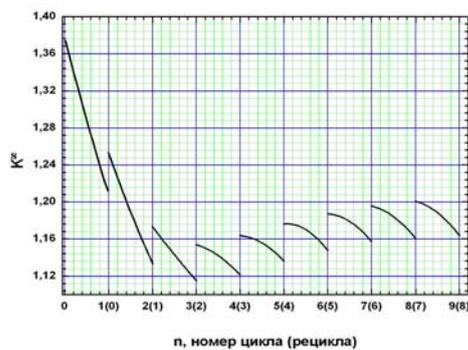


Рис. 10 Изменение K^∞ в ТВС (127 ТВЭЛ Ø 6.9мм, $Z=21\%$) в зависимости от энерговыработки (номер цикла) при рециклировании оксидного топлива

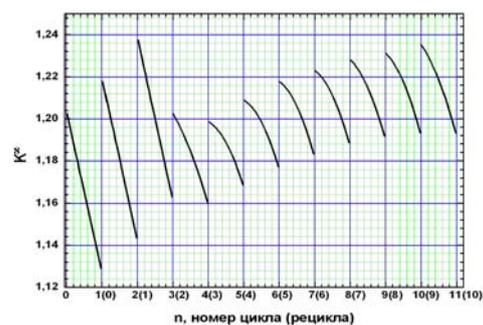


Рис. 11 Изменение K^∞ в ТВС (91 ТВЭЛ Ø 8.6мм, $Z=15\%$) в зависимости от энерговыработки (номер цикла) при рециклировании оксидного топлива

5 Реакторные расчеты в MCNP – MONTEBURNS – ORIGEN

5.1 Выбор начальной компоновки активной зоны.

Начальная конфигурация расчетной модели активной зоны строится на основе конструктивных схем существующих реакторных систем. Исследование в процессе выгорания размножающих свойств ТВС с заданным видом топлива при варьировании таких параметров как количество ТВЭЛ в ТВС и диаметр ТВЭЛ дает основополагающую информацию для сравнения и выбора ТВС, на базе которых формируется начальная компоновка активной зоны. Возможности и результаты подобных многовариантных расчетов представлены в разделе 4.

Формирование модели активной зоны при «порядном» представлении ТВС на базе выбранных ТВС осуществляется с помощью задания зон с определенными составами топливных композиций. Соответствующее профилирование активной зоны строится, исходя из поведения $K_{эф}$ при выгорании, неравномерности радиального энергораспределения и глубины выгорания.

Для заданной конструкции ТВС формирование рабочих конфигураций расчетной реакторной модели осуществляется с помощью варьирования радиальных/аксиальных параметров активной зоны и материальных параметров топлива (обогащение урана, массовая доля плутония). Варьирование конфигурации активной зоны проводится путем перераспределения ТВС по соответствующим зонам с изменяемыми составами материалов топливных композиций. Для оксидного уранового топлива варьирование связано с изменением обогащения урана (в процентах по отношению к заданному), для уран-плутониевого – с изменением массовой доли плутония [2].

С учетом заданных критериев и допустимых значений базовых нейтронно-физических характеристик на основе полученных результатов для различных конфигураций активной зоны, определяются рабочие (начальные) конфигурации активной зоны.

Все представленные далее результаты реакторных расчетов приводятся для модели активной зоны реактора типа БН-800 с 15-ю топливными рядами (центральная ТВС с шестью окружающими ее ТВС считается одним рядом) без радиальной зоны воспроизводства. Схематичная картограмма размещения ТВС в расчетной реакторной модели приведена на рис. 12.

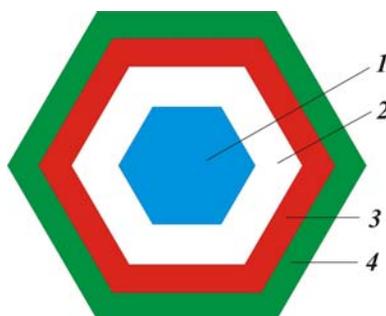


Рис.12 Картограмма размещения ТВС в расчетной реакторной модели: 1, 2, 3 – области размещения ТВС с разным обогащением, 4 – боковой экран

На рис.13 представлены графики изменения с выгоранием K^∞ и накопление ядер плутония в решетке ТВС с 91 твэл, при анализе которых определяются параметры ТВС для компоновки начальной конфигурации активной зоны. При формировании начальных конфигураций активной зоны на базе выбранных типов ТВС прежде всего анализируется неравномерность энергораспределения, максимальное значение которой задается в соответствии с конструктивными особенностями компоновки и в определенной степени типом загружаемого топлива, в частности, для металлического (U-Pu-Zr) топлива это значение может быть несколько большим, чем для МОКС топлива.

В рассматриваемых вариантах профилирование активной зоны для обеспечения необходимых значений неравномерности осуществляется двумя способами – использованием ТВС с различными геометрическими параметрами твэл с одинаковым составом топлива для всей зоны и одним типом ТВС, но с разным составом топлива в твэлах. Так в варианте активной зоны *BN15_3* используются три типа ТВС с 91 твэлом диаметром 7.6, 8.1, 8.6 мм и толщиной 0.5 мм со следующим порядком размещения ТВС: 1 – 8 ряды состоят из ТВС 1-го типа, 9 – 11 ряды из ТВС 2-го типа и 12 – 15 из ТВС 3-го типа. При этом используется для всех ТВС один вид топлива с массовой долей плутония 8.2%. В вариантах *BN15_66*, *BN15_67* и *BN15_69* используются ТВС с 91 твэлом диаметром 8.6 мм и толщиной 0.5 мм с различными долями плутония в твэлах – от 7.3% до 8.2%.

В модели *BN14_1* (рис.15 – 16) конфигурация активной зоны содержит три области: 1 – 9 ряды ТВС с твэл (\varnothing 7.6), 10 – 11 ряды ТВС с твэл (\varnothing 8.0), 12 – 15 ряды с твэл (\varnothing 8.6). Во всех трех зонах использовано одинаковое топливо U-8.3Pu-10Zr.

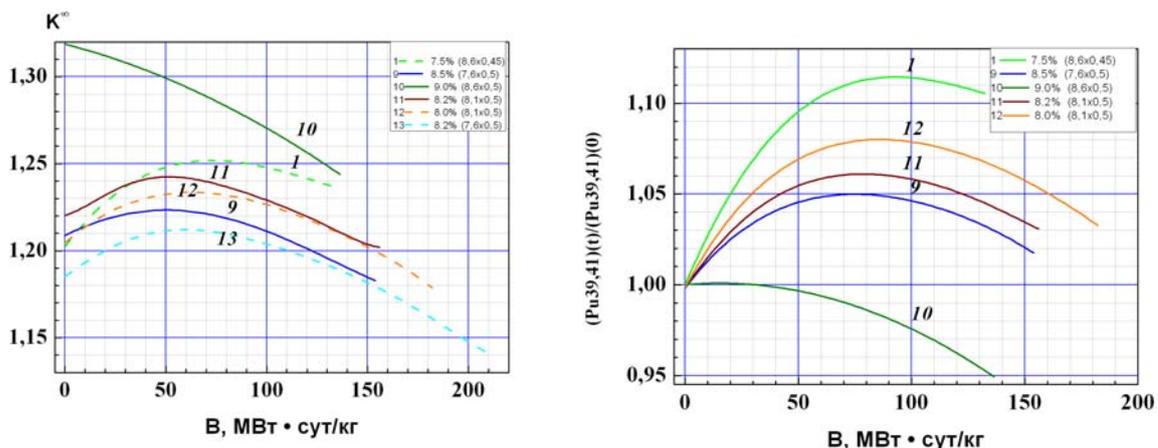


Рис. 13 Изменение с выгоранием K^∞ и накопление Pu в ТВС с 91 твэл с металлическим топливом.

Сравнительный анализ расчетов проводится для активной зоны с порядным представлением при загрузке металлическим топливом с различной массовой долей плутония. На рис. 14 приведены графики

$K_{эф}$ для активной зоны с тремя и четырьмя областями. При моделировании активной зоны используются ТВС с 91 твэл диаметром 8.6 мм, толщиной оболочки 0.5 мм и зазором от 0.2 до 0.3 мм, заполненным гелием.

Для моделей активной зоны *BN15-66*, *BN15-67* (кривые 1 – 5) зазор между топливом и оболочкой составляет 0.2 мм; для *BN15-69* (кривые 6 – 7) зазор между топливом и оболочкой 0.3 мм.

Варьирование конфигурации активной зоны проводится по составу топливных композиций (изменение доли плутония) и изменению радиальной конфигурации (перемещение всех ТВС соответствующего ряда из одной зоны в другую) [2].

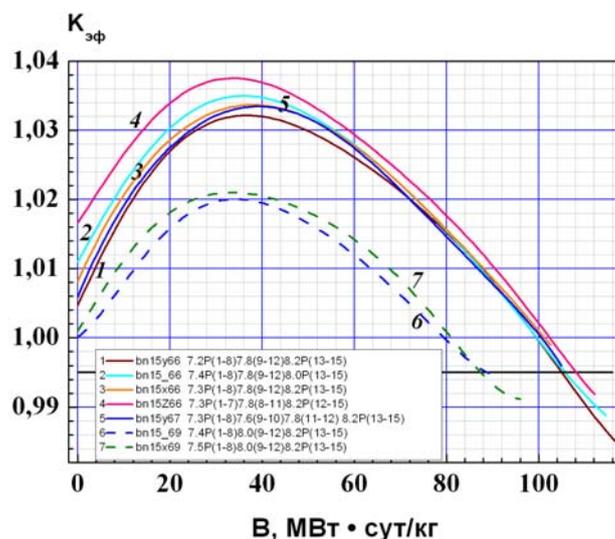


Рис. 14 Изменение с выгоранием $K_{эф}$ в активной зоне реакторов БН при разной доле плутония в металлическом топливе.

5.2 Особенности расчета $K_{эф}$ в задачах выгорания

При расчетах выгорания в MCNP используется, как правило, недостаточная статистика для собственно значений $K_{эф}$. Для более точного отображения изменения $K_{эф}$ может быть проведено уточнение значений $K_{эф}$ с помощью MCNP при увеличении статистики расчетов. В качестве примеров (рис.15 – 17) рассматриваются две модели активной зоны состоящей из ТВС с 91 твэл различного диаметра, толщиной оболочки 0.5 мм, зазор 0.1 мм заполнен гелием.

На рис.15 максимальное значение (выбег) в варианте BN14_1 недостаточно точно представляется сглаживающей кривой, построенной на основе полинома 4-ого порядка. Дальнейшее увеличение степени аппроксимирующего полинома приводит к появлению «нефизических» локальных минимумов и максимумов. Уточнение значений $K_{эф}$ для задаваемых шагов по выгоранию (рис.16) осуществляется с помощью MCNP5 при увеличенной статистике расчетов, проводимых с составами материалов, полученными в прямых расчетах по MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN. Скорректированные значения $K_{эф}$ с точностью до 4-ого знака после запятой позволяют уточнить как значение выбега, так и характер изменения $K_{эф}$. Как видно из рис. 16 сглаживающая кривая (полином 4 порядка) достаточно точно проходит по уточненным значениям $K_{эф}$.

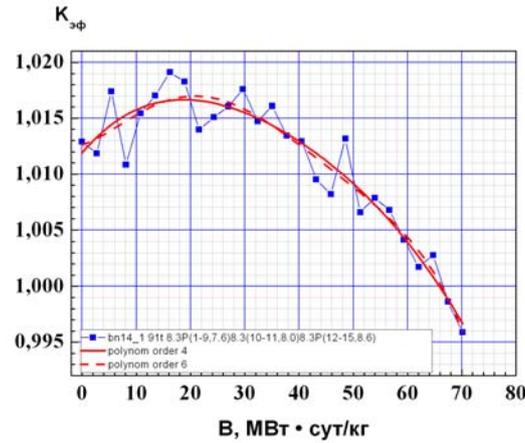


Рис. 15 Прямой расчет $K_{эф}$ в MONTEBURNS-MCNP-ORIGEN

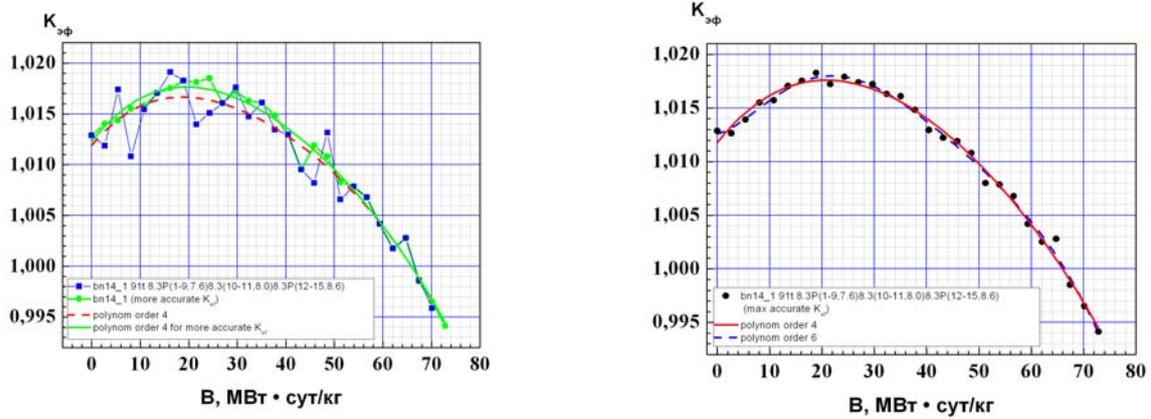


Рис. 16 Изменение с выгоранием $K_{эф}$, прямой и уточненный расчеты в MCNP.

Для варианта активной зоны *BN15_3* картина результатов расчета аналогичная. Неточное значение выбega $K_{эф}$ (рис. 17а) при недостаточной статистике расчетов для $K_{эф}$ и хорошая аппроксимация сглаживающей кривой полинома 2 порядка для уточняющих значений $K_{эф}$ (рис. 17б).

В модели *BN15_3* конфигурация активной зоны содержит три области, включающие 1 – 8 ряды ТВС с твэл (\varnothing 7.6), 10 – 11 ряды ТВС с твэл (\varnothing 8.1), 12 – 15 ряды ТВС с твэл (\varnothing 8.6). Во всех зонах используется металлическое топливо U-8.2Pu-10Zr.

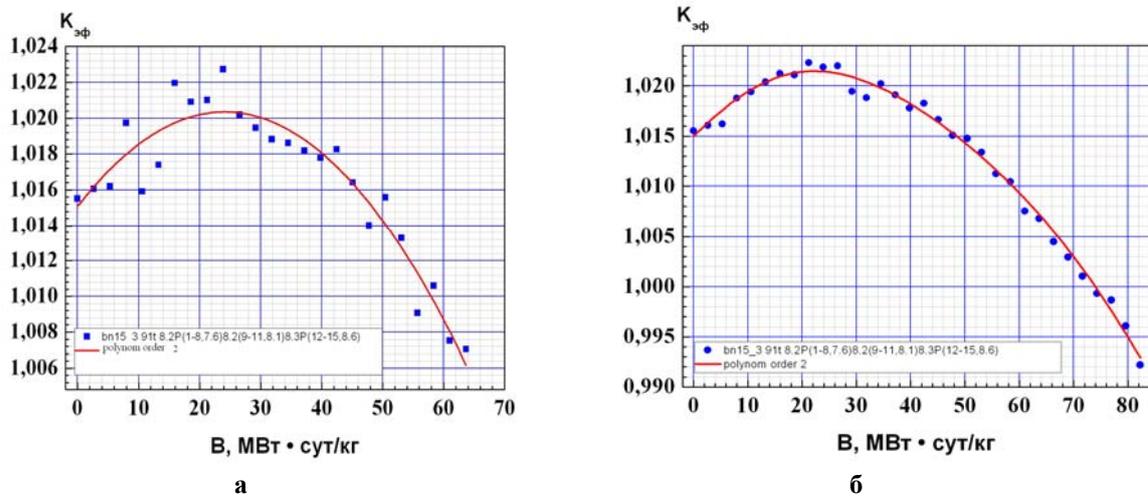


Рис.17 Изменение с выгоранием $K_{эф}$, прямой расчет в MONTEBURNS-MCNP-ORIGEN (а), уточненный расчет в MCNP (б)

5.3 Расчет коэффициента воспроизводства KB

Коэффициент воспроизводства (KB) является наиболее распространенным параметром, характеризующим количественное соотношение между образованием и выгоранием ядерного топлива в реакторе. При анализе топливных циклов значение KB является одной из определяющих интегральных характеристик при оценке эффективности топливоиспользования.

Значение KB может определяться по-разному, прежде всего, это касается учета захватных нейтронов в топливе и списка изотопов, рассматриваемых в качестве нуклидов деления. Так для оксидного уранового топлива – это изотопы плутония ($Pu240$, $Pu242$) и минорные актиниды (Am , Cm). Разные определения KB приводят соответственно и к разным значениям этого параметра [10].

Согласно физическому определению значение KB равно отношению скорости образования ядер вторичного топлива к скорости выгорания ядер первичного топлива. Такое определение KB делает его изменяющимся в процессе выгорания (дифференциальный KB).

Для UO_2 топлива для тепловых реакторов выгорающими ядрами первичного топлива являются $U235$. Для активной зоны с урановым топливом дифференциальный KB определяется:

$$KB = \frac{N^{U238} \cdot \sigma_{n,\gamma}^{U238}}{N^{U235} \cdot \sigma_{n,abs}^{U235}}. \quad (1)$$

При использовании уран-плутониевого топлива в качестве первичного топлива значение KB можно определить как:

$$KB = \frac{N^{U238} \cdot \sigma_{n,\gamma}^{U238} + N^{Pu240} \cdot \sigma_{n,\gamma}^{Pu240}}{N^{Pu239} \cdot \sigma_{n,abs}^{Pu239} + N^{Pu241} \cdot \sigma_{n,abs}^{Pu241}}, \text{ где} \quad (2)$$

N^{U238} , N^{U235} , N^{Pu239} , N^{Pu240} , N^{Pu241} – концентрации (количество ядер/1 моль) нуклидов для соответствующего шага выгорания,

$\sigma_{n,abs}^{U235}$, $\sigma_{n,abs}^{U238}$, $\sigma_{n,abs}^{Pu239}$, $\sigma_{n,abs}^{Pu240}$, $\sigma_{n,abs}^{Pu241}$ – 1-групповые сечения поглощения, которые могут определяться как

$$\sigma_{n,abs}^{Pu239} = \sigma_{n,f}^{Pu239} \quad (3)$$

$$\text{или} \quad \sigma_{n,abs}^{Pu239} = \sigma_{n,f}^{Pu239} + \sigma_{n,\gamma}^{Pu239}, \text{ где} \quad (4)$$

$\sigma_{n,\gamma}^{Pu239}$ – 1-групповое сечение реакции захвата (n,γ) нуклида $Pu239$,

$\sigma_{n,f}^{Pu239}$ – 1-групповое сечение реакции деления (n,f) нуклида $Pu239$.

В инженерных задачах практикуется использование как «усредненного» значения дифференциального KB , так и «материального» коэффициента воспроизводства KB^M , определяемых на заданном временном интервале $0 - T$ по значениям массы делящихся ядер в загружаемом топливе и образующемся в процессе функционирования реактора.

Для МОКС топлива значение KB^M определяется как:

$$KB^M = \frac{(N^{Pu239} + N^{Pu241})_T}{(N^{Pu239} + N^{Pu241})_{T=0}}$$

Основное назначение процедуры br_factor – вычисление KB для уранового и уран-плутониевого топлива.

Дифференциальный KB может вычисляться на каждом шаге выгорания на основе расчетных значений, полученных в MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN. Исходные данные для вычисления KB содержатся в соответствующих выходных файлах кода MONTEBURNS, число которых определяется заданным количеством выгорающих зон и числом шагов по выгоранию (п.3.2).

Входными файлами процедуры *br_factor*, вычисляющей значения *KB*, являются полученные при расчете в MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN файлы *TAPE7_N.xxx* и *TAPE9_N.xxx*, где *N* – номер выгорающего материала, *xxx* – шаг по выгоранию, а также файлы *INP* (раздел 3, пример 8) и *isotop_l.inp*. Файлы *TAPE7_N.xxx* содержат концентрации заданных изотопов, файлы *TAPE9_N.xxx* содержат 1-групповые сечения нейтронных реакций, $\sigma_{n,\gamma}$, $\sigma_{n,f}$, и др. для соответствующих изотопов. В файле *isotop_l.inp* указываются идентификаторы нуклидов. По умолчанию для вычисления *KB* выбираются концентрации и сечения $\sigma_{n,\gamma}$ и $\sigma_{n,f}$ изотопов U235, U238 для уранового оксидного топлива и соответствующие сечения U238, Pu239, Pu240, Pu241 для уран-плутониевого топлива.

Аналогично вычислению *KB* по формулам (1) – (4) для одной топливной зоны значение *KB* может быть вычислено для всей активной зоны с заданным числом выгорающих зон. Для этого проводится соответствующее суммирование вкладов каждой выгорающей зоны реактора в захватную, определяемую числителем (1) – (2), и делящуюся, определяемую знаменателем, составляющие. При вычислении используются файлы для всех *N* материалов на заданном интервале выгорания типа *TAPE7_N.xxx* и *TAPE9_N.xxx*. В частности, для входного расчетного файла bn15y67 (п. 3) с 50-ю шагами выгорания и 60-ю выгорающими зонами при расчете *KB* используются $60 \times 50 \times 2 + 2 = 602$ файла, полученные в расчетах MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN.

В результате выполнения процедуры *br_factor* формируются файлы *a_BR.out* и *a_BR.tmp*. Файл *a_BR.out* содержит пошаговые значения *KB*, вычисленные с использованием формул (3) – (4). Файл *a_BR.tmp* содержит полную информацию, включающую массы выгорающих материалов, концентрации заданных изотопов (*TAPE7_N.xxx*), 1-групповые сечения нейтронных реакций (*n,γ*) и (*n,f*) в *TAPE9_N.xxx* и др.

При обработке результатов, полученных в расчетах MCNP-MONTEBURNS-ORIGEN, можно воспользоваться дополнительным файлом *br_process*, содержащим параметры выборки и обработки соответствующих данных. При отсутствии этого файла по умолчанию значения *KB* вычисляются в соответствии с указанным выше описанием.

В примере 9 для активной зоны реактора (*BR_1_core*) и зоны воспроизводства (*BR_1_blanket*) приводятся фрагменты выходных файлов.

Пример 9. Фрагмент файла *a_BR.out*

```
bn15y67 (18.05.2011)91tv 7.3P(1-8)7.6(9-10)7.8(11-12) 8.2P(13-15) 95cm
step   BR_1_core   BR_2_core
001    1.4779E+00  1.2425E+00
002    1.4629E+00  1.2264E+00
...
044    1.1632E+00  9.7962E-01
avr    1.2733E+00  1.0690E+00
```

```
step   BR_1_blanket BR_2_blanket
001    1.3986E+00  1.1223E+00
002    1.3897E+00  1.1144E+00
...
044    1.2645E+00  1.0215E+00
```

Фрагмент файла *a_BR.tmp*

```
bn15y67 (18.05.2011)91tv 7.3P(1-8)7.6(9-10)7.8(11-12) 8.2P(13-15) 95cm
N конц (г/моль)
Материал N_mat=1
step   922380   942390   942400   942410
001    2.4758E+02  2.0852E+01  1.0864E+00  8.4126E-02
002    2.4711E+02  2.0946E+01  1.1444E+00  8.5931E-02
...
044    2.2643E+02  2.3104E+01  3.7048E+00  3.0136E-01
...
```

Материал N_mat=60
step 922380 942390 942400 942410
001 2.7566E+03 2.6258E+02 1.3639E+01 1.0712E+00
002 2.7522E+03 2.6306E+02 1.4340E+01 1.1109E+00
...
044 2.5869E+03 2.7405E+02 3.9498E+01 3.2013E+00

N_mat Volume (см³)
01 4.6965E+03
02 7.0448E+03
...
60 5.2836E+04

/ 1- групповые сечения нейтронных реакций, выбираемые по умолчанию/

Материал N_mat=1
step 922380 942390 942400 942410
(n,g) (n,f) (n,g) (n,f) (n,g) (n,f) (n,g) (n,f) [барн]
001 2.5450E-01 3.3710E-02 4.5270E-01 1.7790E+00 4.9240E-01 3.4780E-01 4.1550E-01 2.4240E+00
002 2.3980E-01 3.5550E-02 4.4430E-01 1.7760E+00 5.1000E-01 3.4700E-01 4.1290E-01 2.4370E+00
...

/Составляющие формулы вычисления КВ/

step N^{U238}. (n,g) N^{Pu240}. (n,g) N^{Pu239}. (n,f) N^{Pu241}. (n,f)
(г/моль) (г) (г/моль) (г) (г/моль) (г) (г/моль) (г)
001 5.1594E+8 1.2279E+11 4.9137E+6 1.1793E+9 3.4905E+8 8.3424E+10 1.9039E+6 4.5884E+8
002 5.1327E+8 1.2216E+11 5.1815E+6 1.2435E+9 3.5096E+8 8.3878E+10 1.9861E+6 4.7865E+8
...
044 4.1907E+8 9.9738E+10 1.7179E+7 4.1230E+9 3.6417E+8 8.7037E+10 9.3334E+6 2.2494E+9

step N^{Pu239}. ((n,f) + (n,g)) N^{Pu241}. ((n,f) + (n,g)) BR_2_core
(г/моль) (г) (г/моль) (г)
001 2.6125E+04 6.2438E+06 1.3838E+02 3.3351E+04 1.1708E+00
002 2.6250E+04 6.2737E+06 1.4270E+02 3.4391E+04 1.1596E+00
...
044 2.6501E+04 6.3337E+06 5.1757E+02 1.2473E+05 1.0025E+00
avr 6.3948E+06 7.6074E+04 1.0638E+00

step BR_1_core
001 1.4779E+00
002 1.4629E+00
...
044 1.1632E+00
avr 1.2733E+00

step BR_1_blanket
001 1.3986E+00
002 1.3897E+00
...
044 1.2645E+00

Процедура *br_factor* также может дополнительно использоваться для выбора определенных нейтронных реакций из файлов *TAPE9_N.xxx* для указанного списка нуклидов. Список нуклидов и нейтронных реакций задается в файле *isotop_l.inp* (пример 10). По умолчанию выбираются сечения реакций *(n,γ)* и *(n,f)*.

Пример 10. Файл *isotop_L.inp*

C список изотопов для выбора сечений реакций (n, γ), (n,2n), (n, γ)*
451030
461100
C список изотопов для выбора сечений реакций (n, γ), (n,f)
942420
952410

/ 1- групповые сечения нейтронных реакций, заданные в файле *isotop_L.inp* /
Материал N_mat= 2

step	(n,g)	(n,2n)	(n,g)*
		451030	
001	5.2950E-01	8.9180E-05	4.1340E-02
002	5.8350E-01	2.6490E-05	4.5340E-02
...			
044	4.5720E-01	1.3660E-04	3.5840E-02
		461100	
001	4.2310E-02	2.9470E-04	8.6100E-03
002	4.2310E-02	2.9470E-04	8.6100E-03
...			
044	6.0360E-02	4.6990E-04	1.1830E-02

...
Материал N_mat= 1

step	(n,g)	(n,f)
	942420	
001	4.0050E-01	2.3150E-01
002	4.0530E-01	2.3570E-01
...		
044	4.8130E-01	2.5010E-01
	952410	
001	1.6750E+00	2.2500E-01
002	1.7750E+00	2.3200E-01
...		
044	1.6820E+00	2.4680E-01
...		

На рис.18 приведены графики изменения дифференциального значения KB с «усредненными» значениями BR_{avr} и материального значения KB^M (BR_{mat}) для двух вариантов активной зоны быстрого реактора *bn15y67* и *bn15_69*. Оба варианта представляют модель активной зоны с 15 –и рядной компоновкой ТВС с 91 твэлом (8.6x 0.5 мм) соответственно с четырьмя и тремя радиальными зонами профилирования металлического уран-плутониевого топлива с массовой долей плутония 7.3 – 7.6 – 7.8 – 8.2% и 7.5 – 8.0 – 8.2%. Расчет KB проведен на основе формул (2) и (4).

На рис. 19 представлены сравнительные значения KB и KB^M при разных глубинах выгорания для вариантов активной зоны *bn15y67* и *bn15_69*.

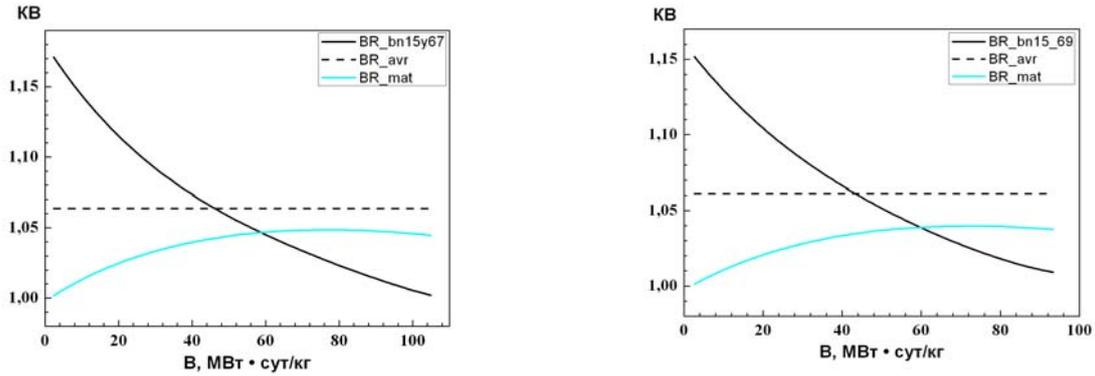


Рис.18 Изменение KB и KB^M от выгорания в быстром реакторе с металлическим топливом.

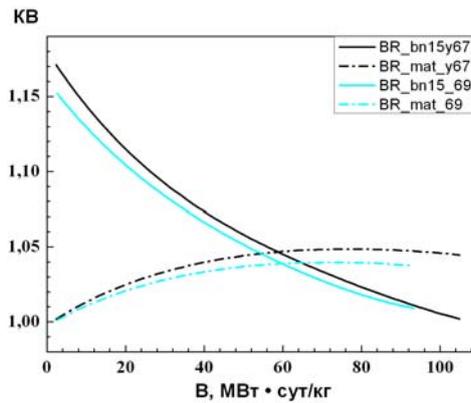


Рис.19 Сравнительные значения KB и KB^M при разных глубинах выгорания в быстром реакторе с металлическим топливом для разных компоновок активных зон.

В таблице 1 представлены сравнительные значения KB^M для моделей активных зон реакторов типа БН с зонами воспроизводства и без зоны воспроизводства с различными типами топлива при разных уровнях выгорания.

Таблица 1. Значения KB^M реактора типа БН с различными композициями топлива при разных уровнях выгорания

Модель активной зоны БН	Выгорание, МВт·сут/кг	KB^M
BN800_U-Pu-Zr (без зоны воспроизводства /с зоной воспроизводства)	11.4	1.041 / 1.079
	31.6	1.090 / 1.193
	71.3	1.142 / 1.394
BN800_MOX (с зоной воспроизводства)	10.5	1.026
	72.3	1.155

Литература

- 1 Е.Ф. Митенкова, Е.В. Соловьева. Описание блока конвертации и подготовки данных п/к BN_D_MC для расчета реакторов типа БН в кодах MCNP, MONTEBURNS. Препринт ИБРАЭ № ИБРАЕ-2008-07, Москва, 2008, 25 стр.
- 2 Е.Ф. Митенкова, Е.В. Соловьева. Описание блока моделирования топливных циклов реакторов типа БН с использованием кодов MCNP- MONTEBURNS-ORIGEN. Препринт ИБРАЭ № ИБРАЕ-2010-02, Москва, 2010, 25 стр.

- 3 Brismester(ed) J.F. MCNP - A general Monte - Carlo N-Particle transport code. Version 4B // Report LA-12625-M, Los Alamos Laboratory – 1997.
- 4 Poston D.I., Trelue H.R. User's Manual, Version 2.0 for MONTEBURNS, version 1.0 // LA- UR-99-4999, PSR-455 – 1999.
- 5 Croff A.G. A User's Manual for ORIGEN2 Computer Code // Oak Ridge National Laboratory document ORNL/TM-7175 – 1980.
- 6 MOX Cross Section Libraries for ORIGEN-ARP, ORNL/TM-2003/2, prepared by I.C. Gauld, July 2003.
- 7 ORIGIN 8 , www.originlab.com — официальный сайт.
- 8 Митенков Ф.М., Песков Р.А., Митенкова Е.Ф. «Оптимизация состава активной зоны быстрого реактора с натриевым теплоносителем и оксидным топливом и совершенствование топливо-использования при внедрении замкнутого топливного цикла » // «Атомная энергия», т. 104, вып.2, (2008), с.94–99.
- 9 Митенков Ф.М., Песков Р.А., Митенкова Е.Ф. «Нейтронно-физические характеристики и топливоиспользование в быстром реакторе с натриевым теплоносителем и топливом повышенной плотности на начальном этапе перехода к замкнутому циклу» // «Атомная энергия», т. 106, вып.1, (2009), с.8–15.
- 10 Казачковский О.Д., Матвеев В.И., Троянов М.Ф. «Определение характеристик воспроизводства ядерного топлива в быстрых реакторах» // «Атомная энергия», т. 62, вып.6, (1987), с.371–375.

Приложение

Для выполнения описанных процедур требуется корректное указание параметров с соблюдением некоторых соглашений:

- Строчные и прописные буквы в идентификаторах не различаются, количество пробелов между отдельными идентификаторами произвольное.
- При указании числовых значений параметров используется точка (не запятая).
- При отсутствии указателя строки с параметрами (*Fuel*, *Mat_F* и др.) выполнение процедуры прекращается с выдачей сообщения об ошибке.
- При отсутствии или некорректной записи идентификаторов (*T_F*, *Var_ro* и др), указанных для соответствующих процедур, выполнение процедуры прекращается с выдачей сообщения об ошибке.
- При задании интервальных значений соответствующих параметров (*Var_ro*, *Var_pu*) осуществляется элементарная проверка корректности границ интервала и шага изменения.

При задании значений параметров перечислением (например, *Var_pu*= *xx.xx*, *yy.yy*, *zz.zz*) недопустимы нулевые величины.