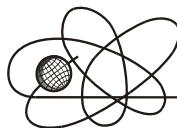




*Российская Академия Наук*

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



**ИБРАЭ**

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY  
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2013-01

Preprint IBRAE-2013-01

**Е.Ф.Митенкова, Е.В.Соловьева**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЯ *BR-FUEL* ДЛЯ  
РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ НАКОПЛЕНИЯ  
ВТОРИЧНОГО ТОПЛИВА**

Москва  
2013

Moscow  
2013

**Митенкова Е.Ф.** Использование модуля *BR-FUEL* для расчета коэффициентов накопления вторичного топлива / Е.Ф. Митенкова, Е.В. Соловьева — (Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № ИБРАЭ-2013-01). — М. : ИБРАЭ РАН, 2012. — 16 с. — Библиогр.: 6 назв. — 53 экз.

Приведены характеристики воспроизводства и накопления плутония в быстром реакторе с диоксидаураниевым, смешанным оксидным, карбидным и металлическим уран-плутоний-циркониевым топливом. Представлены результаты работы модуля *BR-FUEL* при анализе коэффициентов накопления вторичного топлива в реакторе типа БН-800, полученных для различных моделей расчета. Рассмотрены изменения коэффициентов воспроизводства при выгорании.

©ИБРАЭ РАН, 2013

Mitenkova, E. *BR-FUEL* programming module for breeding ratio calculations / E.F. Mitenkova, E.V. Solovjeva — (Preprint / Nuclear Safety Institute RAS, February 2013, № ИБРАЭ-2013-01). — Moscow : NSI RAS, 2013. — 16 p. — Bibliogr.: 6 items.

The breeding ratio and other characteristics of plutonium accumulation are analyzed in fast sodium reactors with UO<sub>2</sub>, MOX, UC and metallic (U-Pu-Zr) fuel. For reactor of BN-800 type the analysis of accumulation factors are performed by using BR-FUEL for different calculated models. The dependence of breeding ratio on a burnup is also considered.

# Использование модуля *BR-FUEL* для расчета коэффициентов накопления вторичного топлива

*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 Физический коэффициент воспроизводства $KB^{diff}$ .....	4
2 Материальный коэффициент воспроизводства $KB^{инж}$ .....	5
3 Вычисление коэффициента воспроизводства в <i>BR-FUEL</i> .....	6
3.1 Файл задания .....	6
3.2 Описание входных файлов .....	6
3.3 Выходные файлы .....	8
4 Результаты расчетов .....	10
4.1 Сравнительные значения $KB^{diff}$ для диоксидуранового и карбидного топлива .....	10
4.2 Сравнение $KB^{инж}$ для разных топливных циклов .....	11
4.3 Сравнение $KB^{cp}$ .....	12
4.4 Оценка факторов накопления вторичного топлива .....	14
Литература .....	15
Приложение .....	15

## Введение

Для количественных оценок нарабатываемого в реакторе вторичного топлива используются различные физические модели образования и выгорания топлива [1].

Одним из основных параметров, применяемых при оценке эффективности топливоиспользования, является коэффициент воспроизводства ( $KB$ ). Традиционно в уравнениях баланса накопления и выгорания топлива используется дифференциальный  $KB^{diff}$ , в инженерных расчетах для оценки накопления топлива используется так называемый материальный коэффициент воспроизводства  $KB^{инж}$ , который вычисляется через отношение масс наработанного и выгоревшего топлива для заданного выгорания.  $KB^{инж}$  в отличие от  $KB^{diff}$  является интегральным коэффициентом. К интегральным коэффициентам можно отнести также коэффициент накопления вторичного топлива  $KB_n^{дон}$ , определяемый в виде отношения дополнительно воспроизведенного топлива к выгоревшему за определенный период облучения, и усредненный  $KB^{cp}$ , вычисленный на основе  $KB^{diff}$  для указанного выгорания.

Для оценки наработанного вторичного топлива в реакторных системах с уран-плутониевым топливом можно применить коэффициенты замещения выгоревших ядер  $^{235}\text{U}$  ядрами  $^{239}\text{Pu}$  и коэффициенты накопления делящихся ядер плутония относительно  $^{238}\text{U}$ , которые коррелируют с параметром «темп воспроизводства», широко применяемым для оценки времени удвоения загруженного топлива.

При всех перечисленных определениях составляющие в  $KB$  даже для диоксидуранового топлива определяются неоднозначно и зависят от того, какие изотопы плутония (помимо  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$ ) рассматриваются в качестве делящихся, как трактуется радиационный захват нейтронов в топливе и какие ядерные реакции учитываются при описании процесса убывания топлива. Для уран-плутониевого топлива требуется еще больше уточнений при определении  $KB$ .

При анализе топливных циклов, характеризующихся увеличенным выгоранием, использованием рециклированного топлива и др., вычисление дифференциального и интегрального  $KB$  предполагает обязательное расширение списка делящихся нуклидов. Если в интегральных определениях  $KB$  фигурируют массы ядер соответствующих актинидов, то в определении дифференциального  $KB$  необходимо указать ядерные реакции с захватом нейтрона и представлением в явном виде материнских и дочерних ядер, что приводит к трудностям при расширении списка делящихся нуклидов. При анализе замкнутых топливных циклов в определении  $KB$  необходимо учитывать изменение топливного состава при охлаждении и пере-

работке топлива, что требует расширения рассматриваемых ядерных реакций с захватом нейтрона в цепочках превращений и включения ряда дополнительных делящихся изотопов, помимо традиционных ядер  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ . В качестве дополнительных изотопов рассматриваются четные изотопы плутония, минорные актиниды и ряд нуклидов, входящих в состав рециклированного топлива.

Изначально в быстрых реакторах с диоксидурановым топливом оценка  $KB$  в основном осуществлялась в рамках базовой модели, в которой скорость образования вторичного топлива принималась равной скорости захватов в  $^{238}\text{U}$ , а скорость выгорания определялась скоростью поглощений в  $^{235}\text{U}$  [1]. Вычисленные в базовой модели значения  $KB$  до сих пор используются при сравнении коэффициентов воспроизводства для новых активных зон с новыми типами топлива. Использование для расчета коэффициентов воспроизводства уточненной модели может привести к заметным отличиям в значениях  $KB$ , и особенно это может проявиться при использовании новых типов топлива.

Для вычисления коэффициента воспроизводства в реакторных системах с разным типом топлива разработан модуль  $BR-FUEL$ . Модуль  $BR-FUEL$  входит в состав специализированного п/к CFC\_BN [2], предназначенного для моделирования топливных циклов на базе активных зон реакторов, заданных в формате MCNP5. Использование модуля  $BR-FUEL$  допускается для различных типов реакторов при порядном или ТВС-ом задании активной зоны с соответствующими ограничениями, накладываемыми форматными возможностями MCNP5 и MONTEBURNS1.0. Все расчеты выполнены на основе кодов MCNP5—MONTEBURNS1.0—ORIGEN2 при использовании вычислительного модуля VAR-GM [3—4].

## 1 Физический коэффициент воспроизводства $KB^{diff}$

Согласно классическому определению значение  $KB$  равно отношению скорости образования ядер вторичного топлива к скорости выгорания ядер первичного топлива для определенного выгорания. Такое определение коэффициента воспроизводства делает его изменяющимся в процессе выгорания ( $KB^{diff}$ ).

Для каждой выгорающей зоны значение  $KB^{diff}$  определяется как

$$KB_i^{diff} = \frac{\int_0^{20\text{Mэв}} (N^{U238} \cdot \sigma_{n,\gamma}^{U238}(E) + N^{Pu240} \cdot \sigma_{n,\gamma}^{Pu240}(E))_i \cdot \Phi_i(E) dE}{\int_0^{20\text{Mэв}} (N^{Pu239} \cdot \sigma_{n,abs}^{Pu239}(E) + N^{Pu241} \cdot \sigma_{n,abs}^{Pu241}(E) + N^{U235} \cdot \sigma_{n,abs}^{U235}(E) + N^{U238} \cdot \sigma_{n,f}^{U238}(E))_i \cdot \Phi_i(E) dE}, \quad (1)$$

где  $N^{235}\text{U}, \dots, N^{241}\text{Pu}$  — концентрации ядер нуклидов для соответствующего выгорания;  $\sigma_{n,\gamma}^{239}\text{Pu}$ ,  $\sigma_{n,f}^{239}\text{Pu}$ ,  $\sigma_{n,a}^{239}\text{Pu}$  — микросечения захвата, деления и поглощения,  $\sigma_{n,a}^{239}\text{Pu} = \sigma_{n,f}^{239}\text{Pu} + \sigma_{n,\gamma}^{239}\text{Pu}$ ;  $\Phi$  — нейтронный поток.

Для удобства «образующую» и «выгорающую» составляющие для  $i$ -й зоны в формуле (1) обозначим  $AA_i$  и  $BB_i$  соответственно.

$$AA_i = (N^{238}\text{U} \cdot \sigma_{n,\gamma}^{238}\text{U} + N^{240}\text{Pu} \cdot \sigma_{n,\gamma}^{240}\text{Pu})_i \cdot \Phi_i$$

$$BB_i = (N^{239}\text{Pu} \cdot \sigma_{n,a}^{239}\text{Pu} + N^{241}\text{Pu} \cdot \sigma_{n,a}^{241}\text{Pu} + N^{235}\text{U} \cdot \sigma_{n,a}^{235}\text{U} + N^{238}\text{U} \cdot \sigma_{n,f}^{238}\text{U})_i \cdot \Phi_i$$

Для активной зоны с заданным числом выгорающих областей  $N_{mat}$  значение  $KB^{diff}$  вычисляется как

$$KB^{diff} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{mat}} AA_i \cdot V_i}{\sum_{i=1}^{N_{mat}} BB_i \cdot V_i}, \quad \text{где} \quad (2)$$

$V_i$  — объем  $i$ -ой зоны.

Поскольку значения  $KB^{diff}$  соотносятся с определенными значениями выгорания, целесообразно для оценки воспроизводящих свойств реакторных систем использовать интегральное усредненное значение  $KB^{cp}$ , вычисляемое на основе  $KB^{diff}$ .

$$KB^{cp} = \frac{\sum_{j=1}^{T^{cp}} KB^{diff}(j)}{T^{cp}}. \quad (3)$$

Для разных параметров усреднения  $KB^{cp}$  может иметь различные значения. Обычно  $KB^{cp}$  определяется для значения выгорания, при котором коэффициент размножения  $K_{эф}$  достигает  $\sim 1$ , что обеспечивается за время облучения  $T^{cp}$  заданной мощностью. Для оценок воспроизводящих свойств решеток ТВС усреднение осуществляется за время облучения  $T^{cp}$ , за которое  $K_{\infty}$  достигает значений, указанных в сценарии моделирования топливных циклов.

Для зоны воспроизводства  $KB^{duф}$  корректируются с помощью коэффициента  $N\_br$ .

В реакторных системах, имеющих зону воспроизводства, расчет  $KB^{duф}$  проводится отдельно в активной зоне и зоне воспроизводства с использованием формулы (2). Различие мощности активной зоны и зоны воспроизводства приводит к необходимости нормировки  $KB^{duф}$  в зоне воспроизводства. Соответствующий нормировочный коэффициент  $N\_br$  определяется исходя из значений мощности активной зоны ( $P_a$ ) и зоны воспроизводства ( $P_g$ ). В представленных результатах значения  $P_a$  и  $P_g$  получены в расчетах п/к MCNP5—MONTEBURNS1.0—ORIGEN2 и п/к CFC\_BN [2]. Для времени  $T^{cp}$  определяется средняя мощность активной зоны и мощность зоны воспроизводства с коэффициентом нормировки

$$N\_br = P_a / P_g$$

## 2 Материальный коэффициент воспроизводства $KB^{инж}$

При сравнении эффективности топливоиспользования одной из наиболее важных нейтронно-физических характеристик является масса нарабатываемого топлива за определенное время при заданной мощности облучения. В инженерных задачах практикуется использование интегрального  $KB^{инж}$ , определяемого на заданном временном интервале  $0 - T$  по значениям массы делящихся ядер в загружаемом топливе и образующихся в процессе функционирования реактора. Значение  $KB^{инж}$  для оксидного уранового топлива определяется как:

$$KB^{инж} = \left( \sum_i^{N\_mat} M_i^{Pu239} + M_i^{Pu241} \right)_{t=T} / \left( \left( \sum_i^{N\_mat} M_i^{U235} \right)_{t=0} - \left( \sum_i^{N\_mat} M_i^{U235} \right)_{t=T} \right) \quad (4)$$

Для уран-плутониевого топлива формула (4) некорректна, поэтому в качестве аналога  $KB^{инж}$  можно использовать коэффициент замещения плутонием  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$  выгоревшего урана  $^{235}\text{U}$ , вычисляемого по значениям массы делящихся ядер в загружаемом и образующемся топливе за некоторое характерное время  $T$  — микрокампанию, кампанию или заданное время облучения [5]. По аналогии с  $KB^{инж}$  обозначим коэффициент замещения  $KB_{U-Pu}^{инж}$ .

Для активной зоны с  $N\_mat$  выгорающими областями активной зоны  $KB_{U-Pu}^{инж}$  определяется как

$$KB_{U-Pu}^{инж} = \sum_{i=1}^{N\_mat} (M_i^{Pu239} + M_i^{Pu241})_{t=T} / \sum_{i=1}^{N\_mat} (M_i^{Pu239} + M_i^{Pu241} + M_i^{U235})_{t=0}, \quad (5)$$

где  $M_i^{239}\text{Pu}$ ,  $M_i^{241}\text{Pu}$ ,  $M_i^{235}\text{U}$  — масса  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$  в  $i$ -й области соответственно, (кг).

При оценке эффективности накопления вторичного топлива в активной зоне удобно воспользоваться коэффициентом накопления  $KB^{дон}$ , определяемым как  $KB^{дон} = KB^{инж} - 1$ .

Для оценки топливоиспользования в активной зоне с разными типами топлива в реакторах разной мощности используется коэффициент наработки вторичного топлива, который аналогичен  $KB^{дон}$ , но с расчетом массы образующегося топлива для фиксированной продолжительности облучения заданной мощности ( $KB_H^{дон}$ ). При этом  $KB_H^{дон}$  может определяться для разных условий облучения, учитывающих, например, длительность кампании и другие нейтронно-физические параметры.

$$KB_H^{дон} = \sum_{i=1}^{N\_mat} (M_i^{Pu239} + M_i^{Pu241})_{t=T} - \sum_{i=1}^{N\_mat} (M_i^{Pu239} + M_i^{Pu241})_{t=0} \quad (6)$$

### 3 Вычисление коэффициента воспроизводства в *BR-FUEL*

Основное назначение модуля *BR-FUEL* – вычисление коэффициентов воспроизводства для уранового и уран-плутониевого топлива. С помощью процедур модуля проводятся вычисления по формулам (2) — (6), которые применяются в зависимости от типа топлива. Результатом расчета являются значения  $KB^{эф}$ ,  $KB^{инж}$ ,  $KB^{дон}$  для каждого шага по выгоранию и  $KB^{ср}$ . Имеется возможность вычисления усредненных значений для  $KB^{эф}$  на заданных интервалах облучения. Допускается проведение ячеечных и реакторных расчетов  $KB$  с вычислением и для отдельных областей активной зоны.

Файл задания *task* содержит параметры для *BR-FUEL*. Входные данные содержатся в файлах *INP.inp* (расчетный файл п/к MCNP5), *TAPE7\_N.nnn*, *TAPE9\_N.nnn* ( $N$  – номер выгорающего материала,  $nnn$  – шаг по выгоранию), полученных в расчете выгорания с помощью п/к MCNP5—MONTEBURNS1.0—ORIGEN2, в файлах *asumtmp.tmp*, *apowtmp.tmp* полученных при обработке выходных файлов MCNP5—MONTEBURNS1.0—ORIGEN2 с помощью модуля п/к CFC\_BN. Файлы с расширением *tmp* включают дополнительную информацию, которая в дальнейшем используется для перекрестной обработки.

#### 3.1 Файл задания

В файле *task* указываются параметры обработки: предельное значение для  $K_{эф}$  ( $K_{\infty}$  для ячеечных расчетов), по которому определяется интервал  $T^{ср}$  для вычисления  $KB^{ср}$ ; список значений выгорания, по достижению которых дополнительно проводятся вычисления «средних» значений. При проведении расчета для определения  $KB^{ср}$  выбирается шаг по выгоранию, для которого  $K_{эф}$  максимально приближено к указанному в задании. Таким же образом вычисления дополнительных усредненных значений проводятся на интервалах, максимально приближенных к заданным. При отсутствии файла *task* расчеты в *BR-FUEL* выполняются корректно с параметрами, заданными по умолчанию.

##### Пример 1. Файл *task*

```
IBRAE (27.01.12) параметры для расчета KB
C N_mat_calc   выбранные материалы
110, 112
*
C Kef_end
1.000
*
с BR_average
30.2 , 160.1
*
```

После строки с ключевым словом *N\_mat\_calc* указывается список материалов, для которых дополнительно вычисляется  $KB^{эф}$ . Номера материалов указаны в соответствии с файлом *Inp*.

После строки с указателем *Kef\_end* приводится предельное значение для  $K_{эф}$ , по которому определяется интервал  $T^{ср}$  для вычисления «средних» значений различных характеристик. По умолчанию это значение  $\sim 0.995$ .

После строки с указателем *BR\_average* приводится список значений выгорания, по достижению которых также проводятся вычисления «средних» значений. По умолчанию это значения 25, 50, 100, 150.

#### 3.2 Описание входных файлов.

Для работы модуля *BR-FUEL* необходим ряд входных файлов.

- Расчетный файл *INP.inp* п/к MCNP и MONTEBURNS (в примере файлы *bnaxtox3.inp*) необходим для определения типа топлива, компоновки активной зоны, нумерации материалов, объемов выгорающих зон, мощности а.з. и т.д.
- Файлы *TAPE7\_N.nnn*, *TAPE9\_N.nnn*, полученные в расчетах по п/к MCNP5—MONTEBURNS1.0—ORIGEN2.  $N$  означает номер выгорающего материала,  $nnn$  — шаг по выгоранию. Файлы содержат концентрации нуклидов и соответствующие им однокрупные

сечения захвата, деления и поглощения, необходимые для вычисления различных коэффициентов по формулам (2) — (6).

- Файлы *asumtmp.tmp*, *apowtmp.tmp*, сформированные в процессе обработки результатов посредством п/к CFC\_BN. Файл *asumtmp.tmp* содержит пошаговые усредненные значения выгорания в активной зоне, значения  $K_{эф}$  и данные, используемые для определения интервала облучения при вычислении усредненных значений  $KB^{cp}$ . Файл *apowtmp.tmp* содержит данные радиального энергораспределения в активной зоне, которые необходимы для вычисления поправочных коэффициентов к  $KB^{оуф}$ , в частности коэффициента  $N_{br}$  для зоны воспроизводства.

### Пример 2. Фрагмент файла *INP.inp*

```

bnaxmox3 (23.08.11) 91 z=14,5% 14.4(1-8) 14.5(9-12) 14.6(13-15) 95cm
PC ! Z01*S691*A/r03-06/r05-12/r07-12/* /F/=MOX
66 ! *Zone0060/H04/08-07-02/* Num mat S37=44.8362606 S91=38.801732
110 ! u=11 91 92235 -0.1145950 7 20.0 1.400E+2 5.43224248E+3
...
1.95560729E+5 ! 93 / объемы выгорающих зон/
3.55103184E+5 ! 94
2.100e+3 ! Мощность в МВт NTVS=691
...
50 ! Число шагов выгорания
...

```

В первой строке содержится идентификатор активной зоны (здесь *bnaxmox3*) и описание структуры в формате *a (r1 – r2)*, где «*a*» - в зависимости от типа топлива определяет массовую долю Pu (для МОКС или металлического топлива) или обогащение  $^{235}\text{U}$  (для  $\text{UO}_2$  или UC топлива), «*(r1 – r2)*» определяет ряды ТВС активной зоны с соответствующими параметрами топливных композиций. При отсутствии описания структуры или некорректном задании не производится расчет среднего обогащения топлива в активной зоне.

Во второй строке после ключевого слова */F/* указывается идентификатор топлива  $\text{UO} \equiv \text{O}$ ,  $\text{UC} \equiv \text{C}$ ,  $\text{M}$  (МОКС),  $\text{U-Pu-xxZr}$ , где «*xx*» означает массовую долю циркония (по умолчанию *xx = 10%*). В данном примере рассматривается смешанное уран-плутониевое оксидное топливо.

В 3-ей строке файла в 1-ой позиции приводится общее число выгорающих зон (в примере — 66). Идентификатор *\*Zonexxxx* указывает количество выгорающих зон (в примере 60 материалов). Идентификатор */ Hxx /* указывает высотное разбиение ТВС (в примере — 4). В случае расчета  $KB$  для ячейки, когда количество зон равно 1, идентификатор *\*Zonexxxx*, указывающий количество выгорающих зон можно опустить.

С 4-ой строки указываются идентификаторы выгорающих материалов. Для указанных материалов в файле *INP.inp* содержатся объемы необходимые для вычисления  $KB^{оуф}$

В файле *INP.inp* содержится предварительное число расчетных файлов по выгоранию, в примере 50. В действительности, расчетных шагов может быть проведено меньше, если предельные значения нейтронно-физических характеристик уже достигнуты. Модуль *BR-FUEL* работает с фактическим числом выходных файлов MCNP5—MONTEBURNS1.0—ORIGEN2. При процессе вычисления используются файлы для всех *N* материалов на заданном интервале выгорания типа *TAPE7\_N.xxx* и *TAPE9\_N.xxx*. В частности, для входного расчетного файла с 50-ю шагами выгорания и 60-ю выгорающими зонами при расчете  $KB$  используются  $60 \times 50 \times 2 = 600$  файлов.

### Пример 3. Фрагмент файла *asumtmp.tmp*

```

...
Day Burnup(GWd/MTU) Keff K-err
0 .00000E+00 1.01820 .00085
20 .17550E+01 1.01407 .00190
...
720 .62052E+02 1.00209 .00170
740 .63742E+02 1.00066 .00136 ...
980 .83905E+02 .99090 .00180

```

В первом столбце указывается продолжительность облучения в эффективных сутках, во втором — соответствующие средние значения выгорания по зоне, третьем — значения коэффициента размножения  $K_{эф}$ , четвертом — значения ошибки. Согласно формуле (3) для вычисления среднего значения  $KB^{cp}$  определяется интервал, для которого  $K_{эф}$  наиболее близко к заданному  $Kef\_end$ . Число расчетных шагов на выделенном интервале определяет значение  $T^{cp}$ . В рассматриваемом примере  $T^{cp}$  принимается равным 740. При отсутствии указанного файла  $KB^{cp}$  вычисляется для всего интервала выгорания. Это может привести к некорректности результата, так как в расчете участвуют величины  $KB^{оуф}$ , полученные при значениях выгорания после достижения предельных величин  $K_{эф}$ .

#### Пример 4. Фрагмент файла *apowtmp.tmp*

Day	Burnup, (GWd/MTU)	Total energy, (W)	Av. energy(N_TVS), (W)	Av. energy(V_T) (W/cm <sup>3</sup> )
0	.00000E+00	.20506E+10	.23067E+07	.80507E+03
20	.17550E+01	.20493E+10	.23052E+07	.80457E+03
400	.35088E+01	.20479E+10	.23036E+07	.80402E+03

...

Первый и второй столбцы аналогичны примеру 3, третий — мощность активной зоны, четвертый — мощность на 1 ТВС, пятый — мощность в единице объема. На время  $T^{cp}$  определяется значение мощности активной зоны и зоны воспроизводства, вычисляется  $N\_br$  (см.п. 1) для нормировки  $KB^{оуф}$  в зоне воспроизводства. При отсутствии этого файла невозможен расчет фактор нормировки и, как следствие, результат расчета  $KB^{оуф}$  в зоне воспроизводства некорректен. Если исследуемый вариант не имеет зоны воспроизводства, то отсутствие файла *apowtmp.tmp* не влияет на результат расчета.

### 3.3 Выходные файлы

В результате выполнения расчетов с помощью модуля *BR-FUEL* формируются файлы *BR.out* и *BR.tmp*. Файл *BR.out* содержит пошаговые значения  $KB^{оуф}$ ,  $KB^{инж}$ ,  $KB^{доп}$  и усредненное значение  $KB^{cp}$ , вычисленные с использованием формул (2) — (5). Файл *BR.tmp* содержит расширенную информацию, необходимую для контроля и оценки получаемых результатов, в том числе, массы выгорающих материалов, концентрации используемых в расчетах изотопов (извлекаемые из файлов *TAPE7\_N.xxx*), одногрупповые сечения нейтронных реакций захвата и деления (из *TAPE9\_N.xxx*) и др.

В примере 5 для активной зоны реактора и зоны воспроизводства приводятся фрагменты выходных файлов.

#### Пример 5. Фрагмент файла *BR.out*

ИБРАЭ (06.02.2012) /дата обработки/  
 vnahtox3 (23.08.11) /дата запуска данного варианта/  
 Общая мощность (Мвт) 2.1000E+03  
 Мощность а.з. (Мвт) 2.0117E+03 /активная зона/  
 Мощность з.в. (Мвт) 8.8289E+01 /зона воспроизводства/  
 Число шагов 37 ( 740 сут) /для определения средних значений KB /  
 $K_{эф}(37 \text{ шага}) = 1.0007$  /для заданного  $Kef\_end = 1$  /  
 Коэффициент  $N\_br$  2.2786E+01 /поправочный коэффициент для зоны воспроизводства /  
 Выгорание (Мвт·сут/кг) 6.3742E+01 ( 740 сут)

Шаг	Сутки	Выгорание	$KB^{диф}$	$KB^{инж}$	$KB^{доп}$ (кг)
1	20	1.7550E+00	9.0904E-01	9.7402E-01	-5.2101E+00
2	40	3.5088E+00	9.0587E-01	9.7507E-01	-3.6447E+00
3	60	5.2594E+00	9.0503E-01	9.7608E-01	-2.1668E+00
...	...	...	...	...	...
49	980	8.3905E+01	8.5511E-01	9.7725E-01	-2.8787E+01
50	1000	8.5571E+01	8.5427E-01	9.7665E-01	-3.0660E+01
$KB^{cp}$			8.8323E-01		

Зона воспроизводства, материалы 61 — 66

Шаг	Сутки	Выгорание	$KB^{диф}$	$KB^{доп}$ (кг)
1	20	1.7550E+00	8.1151E+00	7.9393E+00



2	40	3.5088E+00	7.6833E+00	1.7555E+01
3	60	5.2594E+00	7.4791E+00	2.7043E+01
...	...	...	...	...
49	980	8.3905E+01	2.9113E+00	4.1621E+02
50	1000	8.5571E+01	2.8709E+00	4.2388E+02
KB <sup>cp</sup>			2.2005E-01	/с учетом поправочного коэффициента/

### Шаг 37

KB <sub>инж</sub>	= 0.983	/ активная зона/
KB <sub>н доп</sub> а.з. (кг)	= -9.1543	/ с учетом исходного <sup>235</sup> U /
KB <sub>н доп</sub> з.в. (кг)	= 322.94	/ зона воспроизводства /
KB <sup>cp</sup>	= 1.00331	/ суммарное значение KB <sup>cp</sup> а.з и з.в/

Расчеты средних KB<sup>cp</sup> для указанных в файле *task* значений выгорания.

Заданное	Ближайшее	Шаг	Сутки	KB <sup>cp</sup> а.з.	KB <sup>cp</sup> з.в.	KB <sup>cp</sup> сумма
выгорание	выгорание					
3.0200E+01	2.9585E+01	17	340	8.9507E-01	2.7219E-01	1.1673E+00
1.6010E+02	8.5571E+01	50	1000	8.7307E-01	1.9424E-01	1.0673E+00

### Пример 6. Фрагмент файла *BR.tmp*

ИБРАЭ (06.02.2012)

впахмох3 (23.08.11) 91 z=14,5% 14.5(1-8) 14.5(9-12) 14.5(13-15) 95см /строка из *Inp.inp*/

МОКС

-----  
187 ТВС с обогащением 14.4% / данные из *Inp.inp*/

252 ТВС с обогащением 14.5%

252 ТВС с обогащением 14.6%

Общее число материалов 66

Число материалов а. з. 60

Материал Объем (см<sup>3</sup>)

1 5.4322E+03

2 8.1484E+03

3 8.1484E+03

...

66 3.5510E+05

Суммарный объем материалов а. з. 2.5471E+06 (см<sup>3</sup>)

Суммарный объем материалов з. в. 1.7347E+06 (см<sup>3</sup>)

Общее число шагов 50

-----  
сутки мощность а.з. (Мвт) /данные из *apowtmp.tmp* /

0 2.0506E+03

20 2.0493E+03

40 2.0479E+03

..

-----  
Результаты расчетов

Число 37 ( 740 сут) /для средних значений KB /

K<sub>эф</sub>(37 шага) = 1.0007E+00 /для заданного K<sub>эф\_end</sub> = 1/

Используемые реакции для вычисления KB<sup>диф</sup> в а.з. ( г·барн ) /

шаг <sup>238</sup>U·σ(n,γ) <sup>240</sup>Pu·σ(n,γ) <sup>238</sup>U·σ(n,f)

1 3.5127E+11 3.0376E+10 5.3352E+10

2 3.4938E+11 3.0203E+10 5.3602E+10

...

шаг <sup>239</sup>Pu·(σ(n,γ) + σ(n,f)) <sup>241</sup>Pu·(σ(n,γ) + σ(n,f)) <sup>235</sup>U·(σ(n,γ) + σ(n,f))

1 3.3748E+11 1.9728E+10 9.2701E+09

2 3.3654E+11 1.9797E+10 9.0842E+09

...

## 4 Результаты расчетов

Представлены расчеты  $KB^{\text{диф}}$ ,  $KB^{\text{инж}}$ ,  $KB^{\text{дон}}$ ,  $KB^{\text{ср}}$  для активной зоны реактора типа ВН-800 с разным типом топлива: диоксидаураниевым  $\text{UO}_2$ , урановым карбидным  $\text{UC}$  [5], МОКС и металлическим уран-плутониевым вида  $\text{U-Pu-10Zr}$  [6].

### 4.1 Сравнительные значения $KB^{\text{диф}}$ для диоксидаураниевого и карбидного топлива.

Для уточнения различий  $KB^{\text{диф}}$  для отдельных выгорающих областей активной зоны на рис. 1, 2 приведены сравнительные значения  $KB^{\text{диф}}$ . На рис. 1. представлены значения  $KB^{\text{диф}}$  для активной зоны с  $\text{UO}_2$  топливом обогащением 15.3% и для отдельных областей в составе зоны. Кривые (2, 3, 4) представляют  $KB^{\text{диф}}$  в областях обогащением 15.7, 15и 14.7% в центре активной зоны ( $H=0$ ). Кривые (2', 3', 4') представлены для тех же радиальных зон, но для  $H=45\text{см}$  (от центра а.з.). Различия в значениях  $KB^{\text{диф}}$  для разных областей активной зоны позволяют более полно оценить вклад отдельной области в интегральный  $KB^{\text{диф}}$ .

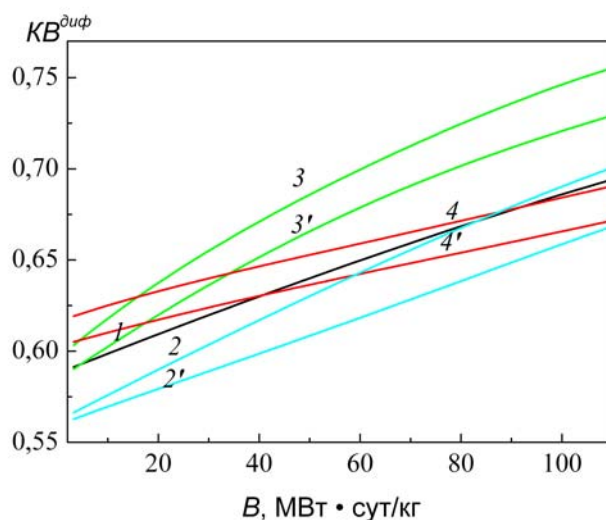


Рис. 1.  $KB^{\text{диф}}$  для активной зоны с  $\text{UO}_2$  топливом (1) и отдельных областей активной зоны с обогащением 15.7 — (2, 2'), 15 — (3, 3') и 14.7% — (4, 4').

На рис. 2. представлены значения  $KB^{\text{диф}}$  для активной зоны с  $\text{UC}$  топливом обогащением 12.5% и для отдельных областей в составе а.з. На графике приведены значения для областей в центре а.з. (2, 3, 4).

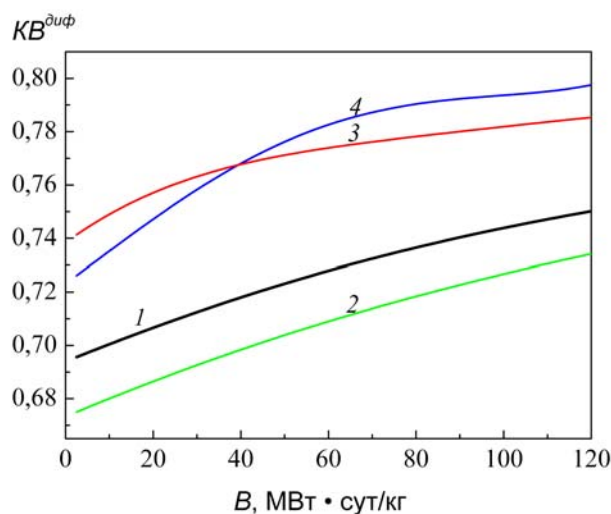


Рис. 2.  $KB^{\text{диф}}$  для активной зоны с  $\text{UC}$  топливом (1) и областей активной зоны обогащением 12 — (2), 12.5 — (3) и 13% — (4).

## 4.2 Сравнение $KB^{инж}$ для разных топливных циклов

На рис. 3 — 5 представлены значения  $KB^{инж}$  в зависимости от выгорания для активной зоны с металлическим топливом с разным содержанием плутония, МОКС топливом и карбидным топливом.

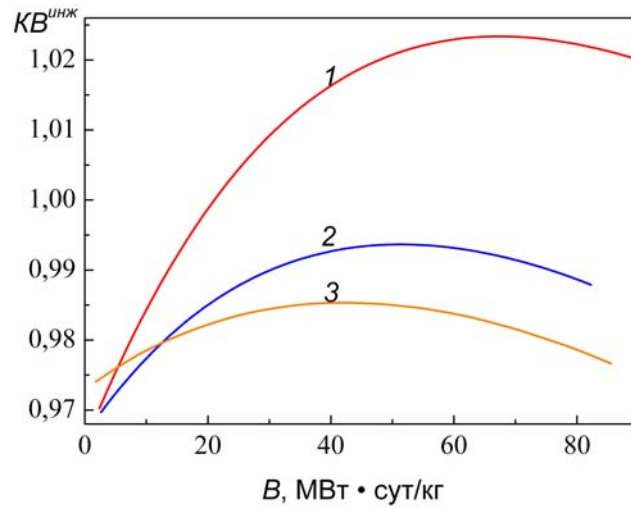


Рис. 3.  $KB^{инж}$  для активной зоны с U-Pu-Zr топливом при содержании плутония 7.8 — (1), 8.2 — (2) и МОКС топливом при содержании плутония 14.5% — (3)

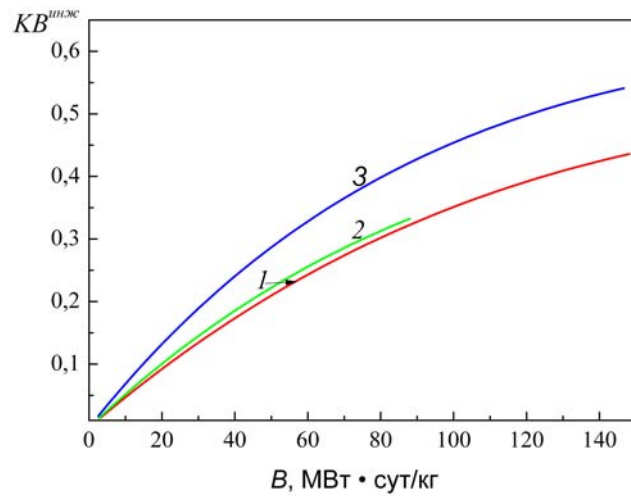


Рис. 4.  $KB^{инж}$  для активной зоны (1) — с  $UO_2$  топливом при обогащении 15.3, (2) — с UC топливом обогащением 14.1, (3) — с UC топливом обогащением 12.5%.

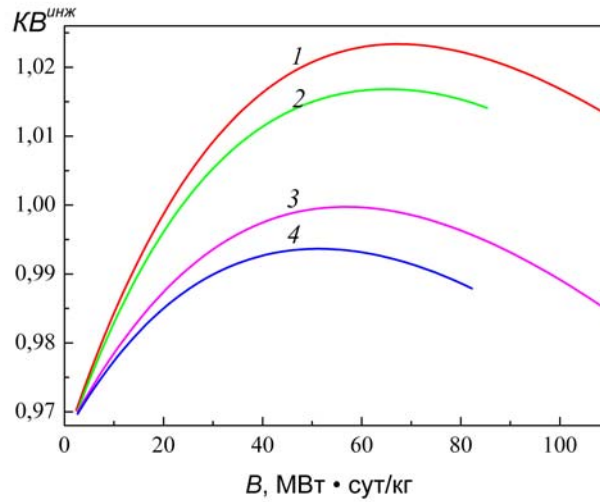


Рис. 5.  $KB^{инж}$  для активной зоны с U-Pu-Zr топливом при содержании плутония 7.8 — (1), 7.9 — (2), 8.1 — (3), 8.2% — (4).

### 4.3 Сравнение $KB^{cp}$

Для оценки воспроизводящих свойств реакторных систем применяется усредненное (интегральное) значение  $KB^{cp}$  (3), вычисляемое на основе дифференциальных значений  $KB^{diff}$ . Для активной зоны реактора типа БН-800 с диоксидауранным, оксидным, карбидным и металлическим уран-плутониевым топливом расчетные значения  $KB^{cp}$  представлены для разных уровней выгорания (табл. 1). Уровень выгорания определяется временем облучения, при котором коэффициент размножения  $K_{эф}$  достигает  $\sim 1$ . Различное время облучения обусловлено спецификой выгорания загружаемого топлива различного типа в быстром реакторе типа БН [5, 6]. Большинство расчетов проведено для реакторов с высотой активной зоны 95 см.

В таблице 2 приведены значения  $KB^{инж}$  и  $KB^{cp}$  в активной зоне реактора типа БН-800 с диоксидауранным и металлическим топливом.

Таблица 1.  $KB^{cp}$  для активной зоны с разным топливом

Топливо	Среднее обогащение, %	Время облучения, эф.сут	Выгорание, МВт сут/кг	$KB^{cp}$
UO <sub>2</sub>	15.3	840	66.63	0.63
UC <sup>(1)</sup>	12.5	1800	111.14	0.74
UC <sup>(2)</sup>	14.2	1280	40	0.65
(U,Pu <sub>оруж</sub> )O <sub>2</sub>	14.5	740	63.74	0.88
U—Pu <sub>оруж</sub> —Zr	8.3	1120	73.65	0.88
	7.9	1280	85.33	0.89
	8.2	1200	79.61	0.88
	8.1	1040	70.10	0.89
	7.8	1760	104.96	0.89

<sup>(1)</sup> H<sub>а.з.</sub> = 100 см; <sup>(2)</sup> H<sub>а.з.</sub> = 120 см

**Таблица 2. Сравнительные значения  $KB^{инж}$  и  $KB^{ср}$  в активной зоне реактора**

Топливо обогащение	Время облучения, эф. сут	Выгорание, МВт·сут/кг	$KB^{ср}$	$KB^{инж}$
UO <sub>2</sub> Z=15.3%	840	66.63	0.63	0.62
	1920	148.25	0.67	0.60
U-Pu-Zr Z=7.8%	800	47.72	0.92	1.021
	1760	104.96	0.89	1.017

Анализ значений  $KB^{инж}$  и  $KB^{ср}$  показывает, что для выгорания ~ 60 МВт·сут/кг для UO<sub>2</sub> топлива различия незначительны ~ 2%. При увеличении выгорания различия увеличиваются до ~ 10%. Для металлического U-Pu-Zr топлива различия  $KB^{инж}$  и  $KB^{ср}$  мало меняются в зависимости от выгорания и составляют ~ 11%.

На рис.6 приведены значения  $KB^{диф}$  и  $KB^{ср}$  для реактора типа БН-800 с карбидным топливом разного обогащения. Средние значения (формула (3)) рассчитываются для топлива с обогащением 12.5% по достижении выгорания 111 МВт·сут/кг (1800 эф.сут). При таком выгорании  $K_{эф} \sim 0.995$ . Для топлива с обогащением 12.6% требуемое значение  $K_{эф}$  достигается при выгорании 100 МВт·сут/кг (1520 эф.сут).

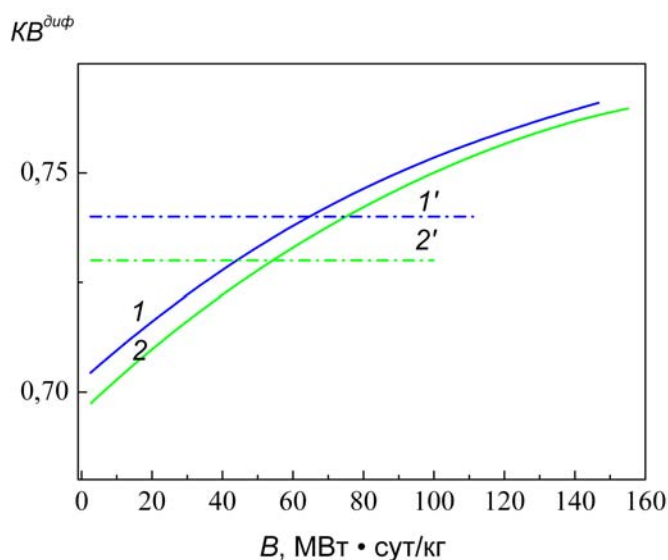


Рис. 6.  $KB^{диф}$  и  $KB^{ср}$  для активной зоны с УС топливом обогащением 12.5 — (1,1'); обогащением 12.6% — (2, 2') .

На рис.7 приведены значения  $KB^{диф}$  для активной зоны с UO<sub>2</sub> и УС топливом для разных значений выгорания (левая и нижняя шкалы). На верхней шкале приведены значения для  $KB^{ср}$ , на правой шкале указывается время в эффективных сутках.

При заданной мощности облучения (2100 МВт(т)) вычисляются соответствующие средние значения  $KB^{ср}$  при  $K_{эф} \sim 0.995$ . В зависимости от типа загружаемого топлива время облучения для достижения указанного значения  $K_{эф}$  оказывается различным: для UO<sub>2</sub> топлива обогащением 15.3% оно составляет 840 эф.сут; для УС топлива обогащением 14.1% — 1280 эф.сут, обогащением 12.5% — 1800 эф.сут (табл.1).

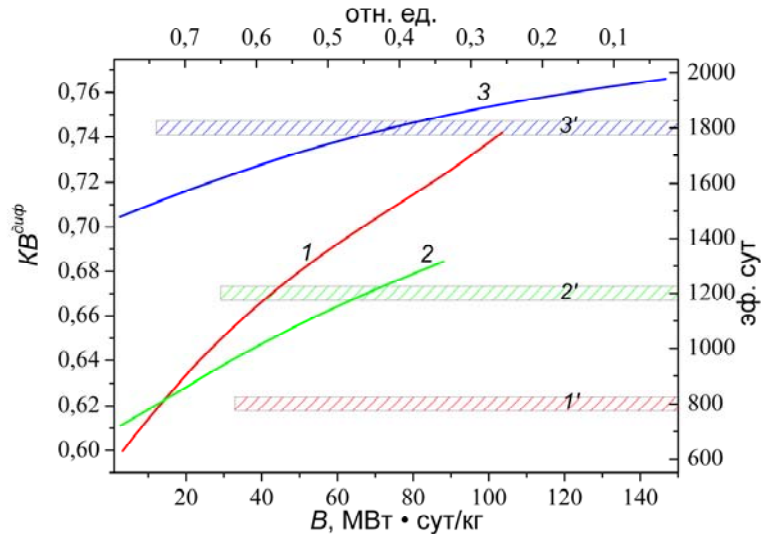


Рис. 7.  $KB^{эф}$  и  $KB^{эф}$  для активной зоны с  $UO_2$  топливом обогащением 15.3 — (1, 1');  $UO_2$  топливом обогащением 14.1 — (2, 2'), обогащением 12.5% — (3, 3').

#### 4.4 Оценка факторов накопления вторичного топлива

Сравнение значений коэффициента накопления вторичного плутония в реакторе типа БН со смешанным оксидным топливом при содержании плутония 14.5% и металлическим топливом при содержании плутония 7.8% приведено на рис. 8. Выход в асимптотике на нулевое значение означает полное самообеспечение реактора делящимися ядрами, что является одной из важнейших задач при реализации замкнутых топливных циклов и обеспечения безопасности строящихся ядерных реакторов в соответствии с современными требованиями МАГАТЭ.

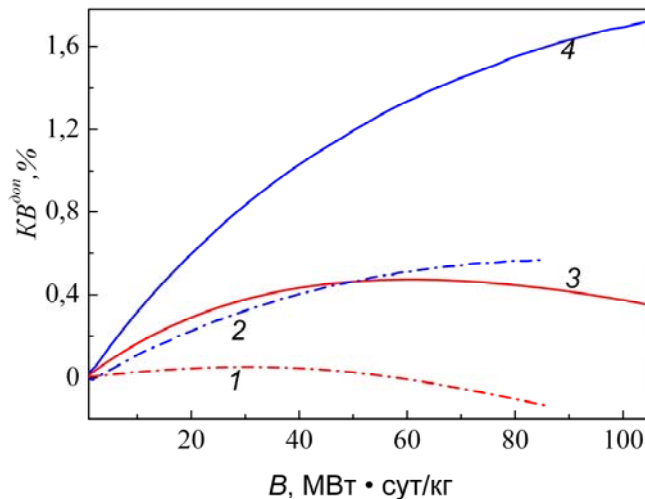


Рис. 8. Накопление вторичного плутония в активной зоне с МОКС топливом при начальном содержании плутония 14.5%  $^{239}Pu$  — (1),  $^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu$  — (2) и с  $U-Pu-Zr$  топливом при начальном содержании плутония 7.8%  $^{239}Pu$  — (3),  $^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu$  — (4)

В табл.3 представлены сравнительные значения  $KB_n^{дон}$  для реактора типа БН-800 тепловой мощностью  $P_n = 1000$  МВт (т) при длительности облучения  $T_n = 1000$  эф.сут. Тогда при вычислении  $KB_n^{дон}$  (см. формулу 6) время облучения определяется как  $T = T_n / (P/P_n)$ , где  $P$  — тепловая мощность рассматриваемого реактора (в наших расчетах  $P = 2100$  МВт).

**Таблица 3. Сравнительные значения коэффициента наработки вторичного топлива для реактора типа БН-800 с разным топливом**

Топливо	Среднее обогащение, %	$KB^{доп}$ , кг	
		Активная зона	Зона воспроизводства
UO <sub>2</sub>	15.3	– 368*	187
UC	12.5	– 206*	180
	14.2	– 331*	—
(U,Pu <sub>оруж</sub> )O <sub>2</sub>	14.5	4*	214
U—Pu <sub>оруж</sub> —Zr	7.8	123	—

\* с учетом делящихся ядер <sup>235</sup>U.

Результаты анализа значений различных  $KB$  для реакторных систем с оксидным урановым, МОКС, урановым карбидным и металлическим U-Pu-Zr топливом подтверждают важность использования единой модели расчета накопления вторичного топлива.

При сравнении  $KB$  в реакторах различной мощности, имеющих разные компоновки активных зон и зон воспроизводства, а также реакторах без зон воспроизводства, целесообразно использование параметров, определяющих удельную наработку топлива и нормированную скорость накопления топлива (например, на единицу мощности).

## Литература

1. Митенкова Е.Ф., Соловьева Е.В., Анализ коэффициентов накопления вторичного топлива в различных моделях расчета — Атомная энергия, 2013, т. 114, вып.1.
2. Митенкова Е.Ф., Соловьева Е.В.. Описание блока конвертации и подготовки данных п/к BN\_D\_MC для расчета реакторов типа БН в кодах MCNP, MONTEBURNS. Препринт № IBRAE-2008-07. ИБРАЭ, 2008, 25 с.
3. Митенкова Е.Ф., Соловьева Е.В. Описание блока моделирования топливных циклов реакторов типа БН с использованием кодов MCNP—MONTEBURNS—ORIGEN: Препринт № IBRAE-2010-02. ИБРАЭ, 2010, 25 с.
4. Митенкова Е.Ф., Соловьева Е.В. Описание модуля VAR-GM генерации расчетных файлов в многовариантных расчетах MCNP—MONTEBURNS—ORIGEN для варьирования геометрических и материальных параметров активной зоны: Препринт № IBRAE-2011-06. ИБРАЭ, 2011, 25 с.
5. 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, 2009, т. 106, вып.1, с.8—15.
6. Митенков Ф.М., Песков Р.А., Митенкова Е.Ф., Соловьева Е.В. Анализ открытого топливного цикла быстрого реактора типа БН-800 с металлическим топливом на начальном этапе перехода к замкнутому циклу — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып.2, с.73—79.

## Приложение

Оценку накопления вторичного топлива можно проводить с учетом дополнительных факторов, принимая во внимание компоновку активной зоны и ее нейтронно-физические характеристики (радиальное и аксиальное энергораспределение и др.). Кроме того, можно использовать, так называемые, «затратные»

составляющие, зависящие от параметров топлива при эксплуатации (например, продолжительность нахождения ТВС в активной зоне от момента загрузки до выгрузки и др.) и ценовых затрат на производство ТВС с определенным типом топлива заданного обогащения. Для учета указанных факторов можно ввести весовые коэффициенты  $W_j$ , корректное задание которых позволит рассчитывать  $KB^{don}$  в рамках более полной модели для адекватного сравнения коэффициентов воспроизводства в реакторных системах с разным типом топлива.

$$KB^{don} = \sum_j W_j \cdot KB_j^{don}.$$

При этом для  $j$ -ой топливной области коэффициент накопления  $KB_j^{don}$  рассчитывается аналогично формуле (6).

Для уточнения накопления вторичного топлива в реакторе с разным типом топлива в табл. 4, 5 приведены коэффициенты наработки топлива в отдельных зонах реактора типа БН-800.

**Таблица 4. Сравнительные коэффициенты наработки вторичного топлива в отдельных топливных зонах реактора типа БН-800 с металлическим топливом**

Выгорание, Мвт·сут	Накопление топлива (кг)				
	Зона 1 / 1 ТВС $z = 7.3\%$	Зона 2 / 1 ТВС $z = 7.6\%$	Зона 3 / 1 ТВС $z = 7.8\%$	Зона 4 / 1 ТВС $z = 8.2\%$	а.з. $z = 7.8\%$
2.4	4.17 / 0.02	1.04 / 0.009	0.31 / 0.002	-0.26 / -0.001	5.25
19.1	41.39 / 0.22	14.52 / 0.13	10.44 / 0.08	7.53 / 0.03	73.88
50.1	67.84 / 0.36	23.16 / 0.2	17.1 / 0.12	14.8 / 0.06	122.9
59.6	69.04 / 0.37	23.12 / 0.2	17.1 / 0.12	15.75 / 0.06	125.02
83.5	63.59 / 0.34	19.54 / 0.17	13.97 / 0.1	16.15 / 0.06	113.24
100.2	54.76 / 0.29	14.71 / 0.13	9.79 / 0.07	14.51 / 0.06	93.78

**Таблица 5. Сравнительные коэффициенты наработки вторичного топлива в отдельных топливных зонах реактора типа БН-800 с МОКС топливом**

Выгорание, Мвт·сут	Накопление топлива (кг)			
	Зона 1 / 1 ТВС $z = 14.5\%$	Зона 2 / 1 ТВС $z = 14.5\%$	Зона 3 / 1 ТВС $z = 14.5\%$	а.з. $z = 14.5\%$
1.7	-2.02 / -0.01	-2.14 / -0.008	-1.046 / -0.004	-5.21
19.2	2.1 / 0.01	1.15 / 0.0046	1.77 / 0.007	5.02
27.9	2.12 / 0.011	1.14 / 0.0055	2.78 / 0.011	6.29
50.2	-2.23 / -0.012	-1.69 / -0.0067	3.84 / 0.015	-0.08
63.7	-7.09 / -0.038	-5.65 / -0.0227	3.59 / -0.014	-9.15
85.6	-17.54 / -0.094	-14.96 / -0.059	1.84 / -0.007	-30.66