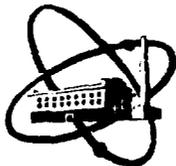


ФЕИ -

ФЭИ-2036



**ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

**В. И. МАТВЕЕВ, С. Б. БОБРОВ, А. И. ЗИНИН,  
А. П. ИВАНОВ, В. Е. КОЛЕСОВ, Г. М. ПШАКИН,  
А. С. СЕРЕГИН**

**Тестовая модель быстрого энергетического  
реактора большой мощности  
в гексагональной геометрии.  
Описание и результаты расчетов**

УДК 621.039.526

**В. И. Матвеев, С. Б. Бобров, А. И. Зинин, А. П. Иванов, В. Е. Колесов,  
Г. М. Пшакин, А. С. Серегин.**

Тестовая модель быстрого энергетического реактора большой мощности в гексагональной геометрии. Описание и результаты расчетов.

ФЭИ-2036. Обнинск, 1989. — 36 с.

В препринте приводится описание трехмерной модели быстрого энергетического реактора большой мощности в гексагональной геометрии. Формулируется ряд задач для проведения тестовых расчетов: определение «подпиточных» обогащений в установившемся режиме перегрузок, определение эффектов реактивности от выгорания топлива, изменения температуры и мощности, определение эффективности органов СУЗ, исследование распределения поля энерговыделения при не-проектном положении компенсаторов выгорания. Для решения этих задач приводится также двумерная модель реактора в  $(R, Z)$  геометрии, полученная из трехмерной путем гомогенизации отдельных зон.

Приведены результаты расчетов этой модели. Расчеты проводились в двумерной  $(R, Z)$  геометрии и в двух- и трехмерной геометрии с гексагональной сеткой в малогрупповом приближении.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие работ по проектированию быстрых энергетических реакторов, развитие международного сотрудничества в этой области, приводит к необходимости стандартизации реакторных расчётов. Стандартизация подразумевает выработку единого подхода и требований к определению реакторных характеристик и их точности. В связи с этим, в разных странах развивается деятельность по обчёту различных тестовых моделей быстрых реакторов. К настоящему времени уже накоплен значительный опыт по сравнительному анализу таких расчётов. Можно отметить, что в результате этой деятельности удалось оценить погрешности различных систем констант и определении основных реакторных характеристик, таких как  $K_{эф}$ , коэффициент воспроизводства, эффективность органов регулирования и др.  $/I/$ . Однако все эти исследования, в основном, базировались на достаточно простых, весьма идеализированных, реакторных моделях. В связи с этим методические составляющие погрешностей расчёта исследованы ещё далеко не в полной мере. Для более глубокого исследования этой проблемы целесообразно продолжить сравнительные расчёты на моделях, более точно учитывающих особенности физических процессов и компоновки быстрого энергетического реактора.

Для этих целей предлагается трёхмерная модель в гексагональной геометрии реактора большой мощности типа БН-1600.

Трёхмерная модель дана в двух модификациях - с топливными и поглощающими (на основе карбида бора естественного обогащения) компенсаторами выгорания. Так как физические расчёты в трёхмерной геометрии являются весьма громоздкими, особенно для задач, в которых приводится частичная оптимизация реакторных характеристик, то наряду с этой трёхмерной моделью, приводится двумерная модель в  $(R, Z)$  геометрии, (также в двух модификациях), полученная из трёхмерной путем гомогенизации отдельных зон и ряда других упрощений. Трёхмерная модель может также использоваться для двумерного расчёта реактора в гексагональной геометрии с заданием аксиальных лапласианов  $(\Delta \rho_z^2)$ .

Основные задачи расчётных исследований предлагаемых моделей заключаются в следующем.

I. Определение "подпиточных" обогащений топлива, обеспечивающих критичность реактора в режиме между двумя перегрузками (в установленном режиме перегрузок) с учётом начального выгорания

ния поля энерговыделения в течение цикла.

2. Определение эффектов реактивности и их составляющих от изменения изотопного состава топлива, от изменения температуры и мощности в указанных диапазонах. Определение эффективности органов СУЗ и эффектов интерференции.

3. Исследования поведения поля энерговыделения при непроектном расположении компенсирующих органов.

### I. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ РЕАКТОРА В ТРЕХМЕРНОЙ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Все особенности конструкции быстрого энергетического реактора невозможно отразить в математической модели, пригодной для практического расчёта. Поэтому в предлагаемой модели имеется ряд упрощений, которые связаны, главным образом, с гомогенизацией различных неоднородностей в шестигранных ячейках, формирующих реактор. В первую очередь это относится к гетерогенной структуре топливных и экранных тепловыделяющих сборок (ТВС), стержней СУЗ и их направляющих гильз. Поэтому все их характеристики выражаются через гомогенные концентрации материалов, входящих в состав той или иной ячейки реактора. Гомогенизация состава различных ТВС проведена исходя из площади эквивалентной ячейки. Концевые части ТВС, органов СУЗ, а также конструкции, прилегающие с внешней стороны к боковому и торцевым экранам (подпор) описываются достаточно условным составом смеси стали и натрия.

Активная зона реактора содержит 499 ячеек. Размер ячейки "под ключ" принят 139 мм, ячейки располагаются с шагом 144 мм.

Для выравнивания поля тепловыделения активная зона разделена по радиусу на две подзоны: зону малого обогащения (ЗМО) и зону большого обогащения (ЗБО). ЗМО содержит 247 ячеек (вместе с ячейками СУЗ), в ЗБО размещаются 252 ячейки, причем во всех ячейках ЗБО находятся ТВС. В качестве топлива используется двуокись урана и плутония ( $UO_2 - PuO_2$ ). Высота активной зоны составляет 1000 мм. Ниже и выше активной зоны располагаются торцевые экраны размером по 400 мм. Нижний и верхний торцевые экраны имеют одинаковые составы.

Торцевой экран представляет собой кольцевую зону и состоит из 264 ТВС. В качестве воспроизводящего материала в экранах

используется двуокись обедненного урана ( $\text{UO}_2$ ).

Боковой и торцевые экраны окружены зоной так называемого подпора, имитирующего внутриреакторные конструкции прилегающие к экранам. Эта зона представляет собой гомогенную смесь из стали и натрия толщиной 400 мм.

Органы СУЗ отличаются по функциональному назначению и конструкции и включают:

- 7 поглощающих стержней аварийной защиты (АЗ);
- 6 поглощающих стержней с совмещенными функциями аварийной защиты и температурной компенсации (АЗ-ТК);
- 22 стержня-компенсатора на основе топливного материала активной зоны или 18 стержней-компенсаторов на основе поглощающего материала ( $\text{B}_4\text{C}$ ) - стержни КС;
- 2 стержня автоматического регулирования (АР).

Стержни АЗ и АЗ-ТК идентичны по конструкции и используют в качестве поглощающего материала карбид бора 60 %-го обогащения по бору-10.

Основная (базовая) модель реактора содержит 22 топливных компенсатора, каждый из которых представляет из себя топливную сборку, состоящую из двух частей: поглощающей части, в которой применяется металлический уран-238 и топливной части, в которой используется топливо состава ЗМО ( $\text{PuO}_2 - \text{MO}_2$ ). В этом случае из 247 ячеек приходящихся на ЗМО, органы СУЗ занимают 37 ячеек (7 АЗ, 6 АЗ-ТК, 22 КВ, 2 АР), в остальных ячейках ЗМО (их 210) размещаются ТВС.

Вторая модификация этой модели предполагает использование КС поглощающего типа; в этом случае используется 18 поглощающих КС на основе карбида бора естественного обогащения. 4 ячейки СУЗ (наиболее близкие к центру активной зоны) в этом варианте заменены ячейками с ТВС ЗМО. Таким образом, эта модификация в целом содержит 33 ячейки СУЗ и 214 ТВС в ЗМО.

Принимается, что стержни АР по своей конструкции и составу полностью идентичны топливным КС. Поперечный разрез (при  $Z = 0$ ) рассматриваемой (базовой) модели реактора представлен на рис. 1. Составы ячеек в аксиальном направлении приведены на рис. 2 и в таблице I.

Составы ячеек СУЗ приведены для двух положений стержней: стержни полностью выведены из активной зоны и полностью введены в активную зону. При этом нижние концы стержней АЗ и АЗ-ТК в выведенном состоянии находятся на 200 мм выше верхнего края активной

зоны, а стержни КС и АР в выведенном состоянии находятся на уровне верхнего края активной зоны.

Для расчётов используются два состояния активной зоны: "после перегрузки" и "перед перегрузкой". Состояние "после перегрузки" полностью определено. В этом состоянии стержни КС введены в активную зону своими поглощающими частями (для топливных КС это означает, что их топливные части выведены из активной зоны и находятся в нижнем торцевом экране и находящейся за ним зоне подпора). В этом состоянии все стержни АЗ, АЗ-ТК и АР находятся в своих крайних верхних положениях (для АР это означает, что в активной зоне находятся их топливные части).

Состояние активной зоны "перед перегрузкой" характеризуется некоторым выведенным положением стержней КС, которое должно быть определено из расчёта. При этом положение остальных стержней (АР, АЗ и АЗ-ТК) аналогично предыдущему состоянию активной зоны, т.е. стержни АР, АЗ и АЗ-ТК выведены до своих отметок, о которых говорилось выше.

Приведенные исходные данные по составам ячеек СУЗ позволяют определить составы этих ячеек при любом другом положении стержней СУЗ путем замещения соответствующих зон этих ячеек.

В таблице 2 приводятся концентрации материалов, входящих в состав различных ячеек реактора.

## 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ В ДВУМЕРНОЙ (R, Z) ГЕОМЕТРИИ

Двумерная модель получена из трехмерной путем гомогенизации составов в соответствующих расчётных зонах с введением ряда упрощений.

Так, для упрощения расчётов поглотитель введенных стержней АЗ и АЗ-ТК, находящийся в верхней области реактора, не учитывается. В ячейках, где расположены стержни АЗ и АЗ-ТК, учитывается только сталь и натрий одинакового состава по высоте активной зоны и торцевого экрана расчётной модели реактора (гильзы АЗ и АЗ-ТК). Состав торцевого подпора одинаков для всех ячеек активной зоны, является ячейки, в которых размещены все стержни СУЗ.

Геометрические параметры модели приведены на рис. 3. Физические параметры могут быть получены из данных, приведенных при описании трехмерной модели (см. рис. 2, табл. 1 и 2).

Нумерация зон, приведенная на рис. 3 означает:

- 1,4 - активная зона, две зоны разного обогащения топлива  
I - зона малого обогащения (ЗМО); содержит 210 ТВС и 37 ячеек СУЗ (в случае топливных КС) и 214 ТВС и 33 ячейки СУЗ (в случае поглощающих КС).

Ячейки СУЗ:

- топливные КС - (13 ячеек - гильзы под АЗ, АЗ-ТК; 22 КС, 2АР - всего 37 ячеек);  
борные КС - (13 ячеек - гильзы под АЗ, АЗ-ТК; 18 КС, 2АР - всего 33 ячейки).

- 4 - зона большого обогащения (ЗБО); содержит 252 ТВС.  
2 - торцевой экран (ЗМО); содержит 210 ячеек с двуокисью урана и 37 ячеек СУЗ - в случае топливных КС; в случае поглощающих КС эта зона содержит 214 ячеек с двуокисью урана и 33 ячейки СУЗ.

Ячейки СУЗ:

- топливные КС - (13 ячеек - гильзы под АЗ, АЗ-ТК; 22 КС, 2 АР - всего 37 ячеек);  
борные КС - (13 ячеек - гильзы под АЗ, АЗ-ТК; 18 КС, 2АР - всего 33 ячейки).

- 5 - торцевой экран (к ЗБО); содержит 252 ячейки с двуокисью урана.  
6 - боковой экран; содержит 264 ячейки с двуокисью урана.  
3 - торцевой подпор.  
7 - боковой подпор.

### 3. ФОРМУЛИРОВКА РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ, РЕКОМЕНДАЦИИ К РАСЧЕТАМ И ФОРМЕ ПРЕДСТАВЛЕННЫ РЕЗУЛЬТАТОВ

I. Во всех расчетах используется плутоний следующего исходного изотопного состава: плутоний-239/плутоний-240/плутоний-241/плутоний-242 = 56/27/12,5/4,5 % а.т. Принимается:

- максимальное выгорание топлива (в % к тяжелым атомам) составляет 10 %;
- тепловая мощность реактора 4200 МВт;
- кратность перегрузок ТВС активной зоны  $K_{a,z} = 3$ .  
для I-го ряда ТВС бокового экрана (прилегающего к активной зоне)  $K_{b,z} = 4$ , для остальных ТВС бокового экрана  $K_{b,z} = 1$ .  
Для этих параметров время работы между двумя перегрузками  $\tau \sim 150$  суток (более точное значение этого параметра определяется на основании расчета).

Принимается также, что температура активной зоны и экранов на нулевом уровне мощности составляет 350 °С. На номинальном уровне мощности средняя температура конструкционных материалов в активной зоне и экранах составляет 525 °С. Средняя температура натрия в активной зоне и экранах 450 °С, средняя температура топлива в активной зоне 1500 °С, а в экранах - 950 °С.

Все критические состояния определяются при температурах компонент реактора, соответствующих номинальной мощности.

2. Определение подпиточных обогачений производится исходя из обеспечения критического состояния реактора в цикле между двумя перегрузками с учётом движения (извлечения) стержней КС и при условии наилучшего "профиля" распределения поля тепловыделения по радиусу реактора. Последнее означает, что в этой расчётной процедуре минимизируется функционал

$$\left( \frac{\int_0^{\tau} K_v(t) dt}{\tau} \right)_{min}, \quad \text{где}$$

$K_v(t)$  - зависимость объемного коэффициента неравномерности поля тепловыделения от времени;

$\tau$  - величина временного интервала между перегрузками.

Очевидно, что в этих расчётах определяется также крайнее верхнее положение системы КС в состоянии "перед перегрузкой" (предполагается, что все стержни КС движутся одновременно).

Расчёты проводятся для модели в двумерной  $(R, Z)$  геометрии, либо для модели в двумерной гексагональной геометрии. В последнем случае используются аксиальные лапласианы -  $\mathcal{L}_r^2$ , полученные из расчёта реактора в двумерной  $(R, Z)$  геометрии (как средние величины, описывающие аксиальную утечку из различных зон реактора) или малогруппового расчёта трехмерной модели реактора.

3. Расчёты изменения реактивности от изменения изотопного состава топлива в процессе его выгорания проводятся с помощью первого приближения теории возмущений для двух состояний активной зоны: "после перегрузки" и "перед перегрузкой". Рассматривается темп изменения реактивности, т.е. изменение реактивности в единицу времени. В качестве единицы времени предлагается 1 месяц работы реактора на номинальной мощности. Расчёты проводятся для каждого тяжелого изотопа для каждой расчётной зоны реактора.

Эти расчёты рекомендуется провести в двумерной  $(R, z)$  модели. Результаты приводятся покомпонентно (по изотопам и расчётным зонам) и представляются в соответствующей таблице. Отдельно рассчитывается неплунневый эффект реактивности.

Эффективности органов регулирования рассчитываются для двумерной (или трехмерной) модели в гексагональной геометрии, при этом рассчитывается эффективность всей системы КС (для моделей двух модификаций), а также эффективности одиночных стержней КС в присутствии всех остальных. Такие же расчёты проводятся для системы АЗ, АЗ-ТК и стержней АР. В последнем случае (для стержней АЗ, АЗ-ТК, АР) расчёты проводятся для двух состояний реактора: "перед перегрузкой" и "после перегрузки".

4. Расчёты температурного и мощностного эффектов реактивности проводятся по следующей (упрощенной) схеме с использованием первого приближения теории возмущений:

а) температурный коэффициент  $[\frac{\Delta k}{k} / ^\circ\text{C}]$  реактивности; рассчитываются следующие компоненты температурного эффекта реактивности:

- радиальное расширение активной зоны, обусловленное температурным расширением нижнего коллектора;
- аксиальное расширение активной зоны, обусловленное температурным расширением топливных брикетов (по модели "топливо расширяется независимо от оболочки");
- доплер-эффект на топливе и конструкционных материалах;
- изменение плотности натрия.

Расчёты проводятся в диапазоне температур активной зоны  $300 + 400$   $^\circ\text{C}$ , при этом условно используется модель "горячего состояния" реактора;

б) мощностной коэффициент реактивности  $[\Delta k/k/\text{МВт}]$ ; рассчитываются следующие компоненты мощностного коэффициента реактивности:

- аксиальное расширение топлива (по модели "топливо расширяется независимо от оболочки");
- доплер-эффект на топливе и конструкционных материалах;
- изменение плотности натрия.

Расчёты проводятся в указанных выше диапазонах температур для различных компонент реактора:

для топлива активной зоны  $350^{\circ} - 1500^{\circ}\text{C}$   
для топлива в экранах  $350^{\circ} - 1500^{\circ}\text{C}$   
для конструкционных материалов  $350 - 525^{\circ}\text{C}$   
для натрия  $350^{\circ} - 450^{\circ}\text{C}$ .

В этих расчётах рекомендуется также использовать модель "горячего состояния" реактора.

Расчётные результаты по всем компонентам температурного и мощностного коэффициентов реактивности, включая покомпонентное представление доплер-эффекта по изотопам приводятся в соответствующей таблице.

5. Расчёты распределения поля тепловыделения при непроектном положении стержней КС проводятся для некритического реактора с извлечением одного или трех КС для состояния реактора "после перегрузки". Расчёты проводятся для двух случаев:

- поднят один КС в свое верхнее крайнее положение из внутреннего кольца системы КС;
- подняты три КС до своего крайнего верхнего положения - один из внутреннего кольца системы КС и два - из наружного кольца.

На рис. 1 эти КС помечены точкой.

Расчёты проводятся в двумерной (или трехмерной) модели в гексагональной геометрии.

На основе этих расчётов определяются средние по ячейкам значения удельных энерговыделений ( $\text{Вт}/\text{см}^3$ ) в центральной плоскости реактора и наносятся на соответствующую картограмму, представляющую поперечный размер реактора в центральной плоскости. Для сравнения проводятся также расчёты исходного критического состояния реактора (с полностью погруженной системой КС), результаты которых представляются в аналогичной форме.

Все эти расчёты проводятся для двух модификаций модели реактора - с топливными и поглощающими КС.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчётных исследований этих моделей получены с использованием следующих программ:

1. определение "подпиточных" обогащений и других характеристик реактора по программе в  $(R, Z)$  геометрии;
2. определение основных характеристик реактора -  $K_{\text{эфф}}$ , коэффициентов воспроизводства и полей энерговыделения - для реактора по программе в трехмерной гексагональной геометрии;

3. расчёт изменения реактивности от выгорания топлива ("темп" выгорания) по программе в двумерной  $(R, z)$  геометрии, включая первое приближение теории возмущений;
4. расчёт эффективности органов регулирования по программе в двумерной гексагональной геометрии;
5. расчёты составляющих температурного и мощностного эффекта по программе в двумерной  $(R, z)$  геометрии;
6. расчёты полей энерговыделения при непрямоугольном положении компенсирующих стержней по программе в трёхмерной гексагональной геометрии.

Все расчётные исследования проведены с использованием системы констант БНАБ-78 /2/.

Необходимые пояснения по особенностям решения перечисленных выше задач приводятся при изложении результатов расчётов.

#### 4. I. Расчёты "подпиточных" обогачений и других характеристик реактора в установившемся режиме перегрузок.

Для определения "подпиточных" обогачений использовался специальный комплекс программы РБР-80 /3/. Этот комплекс, в котором в качестве базовой используется 26-ти групповая программа расчёта реактора в диффузионном приближении в  $(R, z)$  геометрии, предназначен для оптимизации физических характеристик быстрого энергетического реактора, в частности, этот комплекс позволяет определить "подпиточные" обогачения для реактора с профилированием поля энерговыделения за счёт зон разных обогачений с установившемся режиме перегрузок по двум состояниям активной зоны - до и после перегрузки. При этом расчёт характеристик реактора в процессе кампании с учётом выгорания и перегрузок проводится в приближении линейной зависимости средних по зонам скоростей реакций от времени за период между перегрузками. "Подпиточные" обогачения определяются, исходя из решения следующей оптимизационной задачи:

$$\begin{aligned} \min h, \\ h \geq q(t, \vec{z}, x), \quad t \in [0, T], \\ \text{коэф. } (l) = 1, \\ \int_V q(t, \vec{z}, x) dV = N, \\ \beta(\vec{z}) + \beta(\vec{z}) = 1, \end{aligned}$$

где  $q$  - плотность энерговыделения;  
 $x$  - "подпиточное" обогащение;  
 $N$  - мощность реактора;  
 $\beta(t)$  - доля объема пакетов - компенсаторов, находящихся  
в момент времени  $t$  в активной зоне реактора;  
 $t = 0, t = T$  - соответственно начало и конец цикла.

При этих условиях, как нетрудно видеть, обеспечивается выравнивание поля энерговыделения.

При проведении расчётов по этому комплексу первый ряд бокового экрана выделялся в отдельную подзону толщиной 13,6 см. Кроме того, для модели с борными КС ЭМО дополнительно разбивалась на две подзоны, "гужная" из которых содержала 156 ячеек (132 ТВС, 18 борных КС, 6 "гильзы").

Результатами этих расчётов являются:

- величина "подпиточных" обогащений топлива для зон ЭМО и ЭБО (ядерные концентрации действующих изотопов), определяемая как

$$x_{Pu} = \frac{\rho_{Pu}}{\rho_{Pu} + \rho_U}$$

- где  $\rho$  - ядерная концентрация соответствующих материалов;
- положение стержней системы КС, соответствующее критическому состоянию реактора в состоянии "перед перегрузкой";
  - основные физические характеристики реактора (Кэфф, распределение поля энерговыделения, коэффициенты воспроизводства) для двух состояний активной зоны (до и после перегрузки).

Расчётные модели в двумерной ( $R, Z$ ) геометрии, которые были использованы в этих исследованиях, приведены на рис. 4. Ядерные концентрации материалов, входящих в состав различных зон реактора в состоянии до и после перегрузки, представлены в таблицах 3 и 4. Результаты расчётов по комплексу РЕР-80 даны на рис. 5 и в таблицах 5, 6, 7, 8 и 9.

#### 4.2. Расчёты характеристик реактора в трёхмерной гексагональной геометрии.

Полученные по комплексу РЕР-80 результаты расчёта критических концентраций в дальнейшем использовались при проведении расчётов в трёхмерной гексагональной геометрии по комплексу программ

**TRIGEX**. Этот комплекс позволяет рассчитать характеристики реактора в геометрии, которая наиболее близка к реальной, т.е. рассчитать реактор с покассетным разбиением, в диффузионном малогрупповом приближении (до 6 энергетических групп). Для получения системы линейных алгебраических уравнений используется конечно-разностный метод. Узлы сетки расположены в центрах тяжести шестигранных призм. Для уменьшения погрешности, обусловленной крупной пространственной сеткой, проводится решение вспомогательных задач небольшой размерности на тонкой сетке. Это позволяет поправить коэффициенты системы линейных алгебраических уравнений таким образом, что точность получаемого решения имеет тот же порядок, что и точность на основе обычного конечно-разностного метода с тремя и более (до шести) узлами в горизонтальной плоскости на каждую шестигранную призму. Более подробно эта методика изложена в работе /4/. Комплекс **TRIGEX** включает в себя блок подготовки малогрупповых констант на основе упрощенного 26-ти группового расчёта реактора в трехмерной гексагональной геометрии /5/.

В результате проведенных расчётов получены:

- эффективный коэффициент размножения нейтронов (Кэфф) в состояниях до и после перегрузки реактора, причем положение системы КС в состоянии "перед перегрузкой" было получено из расчётов по комплексу FBR-80;
- коэффициент воспроизводства, который определялся как

$$BG = \sum_j \frac{\sum_i \delta_i (N_c^{i-1} - N_{cf}^i)_j}{(N_f)_p},$$

где:  
 $N_c^i$  и  $N_f^i$  - соответственно числа захватов и деления  $i$ -го изотопа в  $j$ -ой зоне, в реакторе ( $p$ );  
 $\delta_i$  - весовые коэффициенты реактивности для  $i$ -го изотопа;

$$\delta_i = \frac{(\sqrt{\beta_j} - \bar{\beta}_{cf})_i - (\sqrt{\beta_j} - \bar{\beta}_{cf})_g}{(\sqrt{\beta_j} - \bar{\beta}_{cf})_g - (\sqrt{\beta_j} - \bar{\beta}_{cf})_g};$$

- распределение поля энерговыделения и коэффициенты неравномерности, при этом радиальные  $K_{\pm}$  представлены для центральной плоскости для двух случаев - по сечению ТВС активной зоны и по сечению всех ячеек активной зоны (включая ячейки СУЗ); аксиальный коэффициент неравномерности  $K_{\pm}$  определялся для центральной ТВС по высоте активной зоны.

Результаты расчётов приведены в таблицах 7, 8 и 10 и на рис. 6, 7, 8 и 9. Для сравнения в таблицах 7 и 8 даны соответствующие характеристики, полученные по комплексу РБР-80, а в табл. 9 для примера представлены значения весовых коэффициентов реактивности для активной зоны (комплекс РБР-80).

#### 4.3. Расчёты изменения реактивности реактора от выгорания топлива ("темп" выгорания).

Изменение реактивности реактора в процессе выгорания топлива рассчитывалось по комплексам программ ТВК-2Д /6/ и КРАБ-1 /7/. Комплекс программ ТВК-2Д позволяет рассчитать реактор в двумерной (R, z) геометрии в многогрупповом приближении. Эффекты реактивности определяются с помощью первого приближения теории возмущений. При расчёте изменения реактивности от выгорания топлива в рамках теории возмущений учитывается объёмная неравномерность выгорания накопления различных изотопов. Комплекс программ КРАБ-1 позволяет проводить аналогичные расчёты в одномерной (цилиндрической) геометрии в многогрупповом приближении.

В таблице 11 приведены величины "темпа" выгорания за 30 эффективных суток работы реактора, вычисленные по указанным выше программным комплексам.

В таблице 12 приводятся составляющие "темпа" выгорания по различным процессам, определённые на основе одномерного расчёта.

Вклады в "темп" выгорания различных зон реактора представлены в таблице 13.

Все расчёты были выполнены для состояния реактора "после перегрузки".

#### 4.4. Эффективность стержневой регуляции.

Эффективность стержневой регуляции рассчитывалась по двумерной программе в гексагональной геометрии (программа A.LBAR) /8/ в четырехгрупповом приближении. Четырехгрупповые константы получены путем свертки из 26-ти групповых расчётов в диффузионном приближении модели реактора в  $(R, z)$  геометрии. Из этих же расчётов были получены аксиальные лапласианы, которые были необходимы при проведении расчётов в двумерной гексагональной геометрии.

Результаты расчётов эффективности стержневой регуляции для состояния реактора "после перегрузки" приведены в таблице 14.

#### 4.5. Расчёты температурного и мощностного эффектов реактивности.

Расчёты температурного и мощностного эффектов реактивности и их составляющих проводились по теории возмущений первого порядка для одномерной модели реактора в радиальном направлении.

Доплеровская постоянная была рассчитана прямым методом по изменению эффективного коэффициента размножения при изменении температуры от 350 до 1500 °C.

Необходимо отметить, что в мощностном эффекте реактивности все составляющие, в том числе и доплер-эффект, рассчитывались по средним температурам, т.е. без учёта поправок на объёмную неравномерность распределения температуры топлива и конструкционных материалов.

Результаты расчётов представлены в таблице 15.

#### 4.6. Расчёты полей энерговыделения при непроектном положении компенсирующих стержней.

В таблице 16 приведены распределения полей энерговыделения в трехмерных моделях для обоих состояний реактора. Вклад в энерговыделение, обусловленный поглощением  $\gamma$ -квантов, учитывался добавлением величины  $0,035 \Sigma_c$  ( $\Sigma_c$  - макросечение захвата) к макросечению  $\nu \Sigma_f$  генерации нейтронов деления. При этом используется приближение, что  $\gamma$ -кванты поглощаются в тех же точках, в которых они были испущены. Эти распределения

приведены в относительных единицах в направлении оси X (см. рис. 1). Нормировка приведена на условный центр, определяемый как средняя величина из 6 ячеек, окружающих центральную ячейку, в которой размещен стержень АЗ. Средняя величина отнесена к центральной ячейке, которая в таблицах обозначена нулевой. Расчётные точки приведены в кассетах через одну, начиная с центральной, в положительном направлении оси X.

Расчёты полей генерации нейтронов деления при непроектном положении КС проводились по программе в двумерной гексагональной геометрии AMBAR /8/ в четырёхгрупповом приближении для состояния реактора "после перегрузки" для двух случаев:

- воднят один КС в верхнее крайнее положение из внутреннего кольца системы КС;
- водняти три КС в верхнее крайнее положение;
- один из внутреннего кольца системы КС и два - из наружного кольца.

На рис. 1 эти КС помечены точками.

Распределения поля генерации нейтронов деления (также в относительных единицах и при той же нормировке, как и в предыдущем случае), полученные в этих расчётах, представлены в таблицах 17 и 18. Они приведены в направлениях центральной ячейки в положительную и отрицательную сторону по осям X и Y (см. рис. 1). В этом случае, как и ранее, расчётные точки по направлению оси X приведены в кассетах через одну. По направлению оси Y они приведены от центральной кассеты через каждый горизонтальный ряд.

Все расчёты проведены как в случае топливных, так и борных КС.

Таблица I

Состав физических зон (нумерация зон соответствует рис. 2)

Номер зоны Характеристика	I	2	3	4	5	6	7	8	9	Ю
Материал	-	NO <sub>2</sub>	PiO <sub>2</sub> -NO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	-	-	-	PiO <sub>2</sub> -NO <sub>2</sub>	И	-
Эффективная плотность топлива (г/см <sup>3</sup> )	-	9,5	8,5	9,5	-	-	-	8,5	15,0	-
Объемная доля топлива, %	-	45	45	62	-	-	-	35	35	-
Объемная доля натрия, %	55	33	33	18	60	35	35	35	35	20
Объемная доля стали, %	45	22	22	20	40	35	35	30	30	80
Объемная доля В <sub>4</sub> С (80 % по В <sub>2</sub> О), %	-	-	-	-	-	30	-	-	-	-
Объемная доля В <sub>4</sub> С (ест. карбид бора), %	-	-	-	-	-	-	30	-	-	-

Таблица 2

Ядерные концентрации ( $\rho$  .  $10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>) в зонах

	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$^{238}\text{U} + \text{Pu} + \text{оск.}$	-	-	.00653	-	-	-	-	.00664	-	-
$^{238}\text{U} + \text{оск.}$	-	.00954	-	.01310	-	-	-	-	.01330	-
$^9\text{Li}$	-	.01908	.01706	.02620	-	-	-	.01328	-	-
Na	.0120	.00726	.00726	.00396	.01320	.00770	.00770	.00770	.00770	.00440
Fe	.02534	.01239	.01239	.01126	.02252	.01971	.01971	.01690	.01690	.04500
Ni	.00549	.002684	.002684	.00244	.00488	.00427	.00427	.00366	.00366	.00976
Cz	.006615	.003234	.003234	.00294	.00588	.00515	.00515	.00441	.00441	.01176
Mo	.000675	.000330	.000330	.000330	.00056	.00053	.00053	.00045	.00045	.00120
$^{10}\text{B}$	-	-	-	-	-	.02409	.00570	-	-	-
$^{11}\text{B}$	-	-	-	-	-	.00602	.02309	-	-	-
C	-	-	-	-	-	.007528	.00720	-	-	-

16

Таблица 3

Равномерные ядерные концентрации (яд/см<sup>3</sup> · 10<sup>20</sup>) по зонам реактора при использовании топливных КС (нумерация зон соответствует рис. 4а)

## "после перегрузки"

номер зоны	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Уран-238	70,71	80,41	-	67,94	94,87	129,4	130,6	129,2	130,5	-
Плутоний-239	7,041	0,6538	-	8,853	0,4931	1,351	0,3744	1,601	0,4549	-
Плутоний-240	3,426	0,0141	-	4,338	0,0063	0,0278	0,0026	0,044	0,0040	-
Плутоний-241	1,341	0,0002	-	1,773	-	0,0004	-	-	-	-
Плутоний-242	0,5817	-	-	0,7364	-	-	-	-	-	-
Окс.Рн-239	1,805	0,0550	-	1,658	0,0348	0,1717	0,0154	0,1403	0,0138	-
Кислород	146,1	162,3	-	170,6	190,8	262,0	262,0	262,0	262,0	-
Натрий	76,15	81,48	121,0	72,60	72,60	39,60	39,60	39,60	39,60	44,0
Ваннадий	133,6	139,0	253,4	123,9	123,9	112,9	112,9	112,9	112,9	450,0
Индий	28,94	30,12	54,90	26,84	26,84	24,40	24,40	24,40	24,40	97,6
Хром	34,87	36,30	66,15	32,34	32,34	29,40	29,40	29,40	29,40	117,6
Молибден	3,537	3,644	6,75	3,30	3,30	3,0	3,0	3,0	3,0	12,0

## "перед перегрузкой"

Уран-238	65,10	79,70	-	66,54	94,33	128,4	130,3	128,9	130,4	-
Плутоний-239	7,384	1,272	-	8,771	0,9696	2,202	0,620	1,878	0,5364	-
Плутоний-240	3,637	0,0363	-	4,371	0,0174	0,0583	0,0056	0,056	0,0052	-
Плутоний-241	1,230	-	-	1,580	0,0002	0,0010	-	-	-	-
Плутоний-242	0,6223	-	-	0,7512	-	-	-	-	-	-
Окс.Рн-239	3,528	0,1304	-	3,285	0,0793	0,3169	0,0279	0,1739	0,0169	-
Кислород	150,8	162,3	-	170,6	190,8	262,0	262,0	262,0	262,0	-

Таблица 4

Равномерные ядерные концентрации (яд/см<sup>3</sup>·Ю<sup>20</sup>) по зонам реактора при использовании борных КС (нумерация зон соответствует рис. 4б)

\*после перегрузки"

Имя зоны	I	2	4	5	6	7	8	9	Ю	II
Уран-238	62,79	87,39	58,21	80,28	65,75	94,85	129,1	130,5	128,7	130,4
Плутоний-239	7,76	0,6099	7,156	0,4131	9,824	0,5036	1,654	0,4568	2,037	0,5822
Плутоний-240	3,786	0,0107	3,468	0,0048	4,895	0,0063	0,0412	0,0038	0,0704	0,0065
Плутоний-241	1,501	0,0001	1,415	-	1,993	-	0,0007	-	0,0015	-
Плутоний-242	0,6432	-	0,5886	-	0,8336	-	-	-	-	-
См.Рн-239	1,846	0,0486	1,341	0,0289	2,003	0,0382	0,2482	0,0214	0,0214	0,0215
Кадмород	156,7	176,1	144,4	161,4	170,6	190,8	262,0	262,0	262,0	262,0
Ватрий	77,26	77,17	75,39	78,56	72,60	72,60	39,60	39,60	39,60	39,60
Магний	132,7	131,7	136,2	137,9	123,9	123,9	112,6	112,6	112,6	112,6
Никель	28,74	28,53	29,51	29,86	26,84	26,84	24,40	24,40	24,40	24,40
Хром	34,63	34,37	35,57	35,99	32,34	32,34	29,40	29,40	29,40	29,40
Молибден	3,503	3,477	3,619	3,639	3,30	3,30	3,0	3,0	3,0	3,0
Бор-Ю	-	-	6,577	-	-	-	-	-	-	-
Бор-II	-	-	26,64	-	-	-	-	-	-	-
Углерод	-	-	8,307	-	-	-	-	-	-	-

Продолжение таблицы 4

"перед перегрузкой"

Номер зоны	I	2	4	5	6	7	8	9	Ю	II
Уран-238	61, Ю	86,73	56,98	79,83	64,29	94,31	127,8	130,2	128,2	130,3
Плутоний-239	7,759	1,192	7,168	0,8131	9,541	0,9901	2,682	0,7556	2,384	0,6862
Плутоний-240	3,839	0,0294	3,498	0,0131	4,906	0,0175	0,0858	0,0081	0,0966	0,0083
Плутоний-241	1,309	0,0005	1,262	-	1,762	-	0,0019	-	0,0021	-
Плутоний-242	0,6593	-	0,601	-	0,8489	-	-	-	-	-
Оск. Рн-239	3,661	0,1133	2,664	0,0657	3,951	0,0865	0,4604	0,0390	0,2805	0,0265
Кислород	156,7	176,1	144,4	161,4	170,6	190,8	262,0	262,0	262,0	262,0
Бор-Ю	-	-	3,139	-	-	-	-	-	-	-
Бор-II	-	-	12,71	-	-	-	-	-	-	-
Углерод	-	-	3,965	-	-	-	-	-	-	-

Ядерные концентрации торцевого и бокового подпоров (зоны 3 и II) соответствуют зонам 3 и Ю (см. табл. 3).

Таблица 5

Обогащение "подпиточного" топлива по зонам (в %)

Обогащение	Топливные КС	Борные КС
$X_{з\text{мо}}$	17,05	17,63
$X_{з\text{бо}}$	18,68	21,18
$X_{з\text{бо}}/X_{з\text{мо}}$	$\sim 1,1$	$\sim 1,2$

Таблица 6

Крайнее верхнее положение системы КС в состоянии "перед перегрузкой" ( $Z_0$  - расстояние от нижнего края активной зоны)

Координата границ	$Z_0$ , см
Граница между топливной и поглощающей частями (в случае топливных КС)	56,43
Граница между поглощающей частью и натрием (в случае борных КС)	52,28

Таблица 7

Значения Коэф в состояниях "после перегрузки" ( $t = 0$ ) и "перед перегрузкой" ( $t = 150$  сут.) по комплексам РБР-80 и TRIGEX

а) комплекс КС

Состояние реактора	РБР-80	TRIGEX
"после перегрузки" $t = 0$	0,9998	1,0004
"перед перегрузкой" $t = 150$ суток	1,0002	1,0032

б) комплекс КС

Состояние реактора	РБР-80	TRIGEX
"после перегрузки" $t = 0$	1,0000	1,0172
"перед перегрузкой" $t = 150$ суток	0,9999	1,0080

Таблица 8

Коэффициент воспроизводства (БК)

а) комплекс TRIGEX

Зона	топливные КС		бонные КС	
	$t = 0$	$t = 150$	$t = 0$	$t = 150$
Активная зона	-0,062	-0,099	-0,222	-0,188
Зона воспроизводства	0,437	0,417	0,430	0,417
Реактор	0,375	0,318	0,208	0,229

б) комплекс РБР-80

Зона	топливные КС		бонные КС	
	$t = 0$	$t = 150$	$t = 0$	$t = 150$
Активная зона	-0,070	-0,093	-0,230	-0,196
Зона воспроизводства	0,433	0,399	0,438	0,406
Реактор	0,363	0,306	0,208	0,211

Таблица 9  
Весовые коэффициенты реактивности (комплекс РЕР-80)

Тип КС сост. р-ра. зона	топливные КС				борные КС						
	"после пере- грузки"		"перед пере- грузкой"		"после пере- грузки"			"перед пере- грузкой"			
	$t = 0$		$t = 150$		$t = 0$			$t = 150$			
$\delta_i$	ЗМО	ЗБО	ЗМО	ЗБО	ЗМО с КС	ЗМО	ЗБО	ЗМО с КС	ЗМО	ЗМО	ЗБО
$\delta_{40}$	0,13	0,15	0,13	0,15	0,14	0,15	0,17	0,14	0,16	0,14	
$\delta_{41}$	1,48	1,44	1,48	1,45	1,46	1,44	1,41	1,47	1,42	1,46	
$\delta_{42}$	0,06	0,08	0,06	0,08	0,07	0,08	0,09	0,07	0,09	0,07	

Таблица 10  
Коэффициенты неравномерности поля энерговыделения по активной  
зоне (комплекс TRIGEX )

а) топливные КС

Состояние реактора	"после перегрузки"	"перед перегрузкой"
$K_2$ ТВС акт.зона	1,285	1,423
$K_2$ ТВС + лч.С/З акт.зона	1,367	1,460
$K_2$ по высоте акт.зона для центр.ТВС	1,244	1,244

б) борные КС

Состояние реактора	"после перегрузки"	"перед перегрузкой"
$K_2$ ТВС акт.зона	1,271	1,239
$K_2$ ТВС + лч.С/З акт.зона	1,319	1,324
$K_2$ по высоте акт.зона для центр.ТВС	1,256	1,225

Таблица II  
"Темп" выгорания в реакторе (%  $\Delta k/k/30$  эфф. суток)

Комплекс программ	Топливные компенсаторы	Борные компенсаторы
КРАБ-I одномерная геометрия, теория возмущений	0,451	0,509
ТВК-2Д, двумерная геометрия, теория возмущений	0,426 <sup>*)</sup>	0,673 <sup>*)</sup>
ТВК-2Д, двумерная геометрия, прямой расчёт	0,423	0,676

\*) Рассчитано с учётом распада плутония-241, образования америция-241 и непутийевого эффекта.

Таблица IZ  
Вклад различных изотопов в "темп" выгорания в реакторе  
(нормировка на I)  
расчёт в одномерной геометрии

а) топливные КС

Номер зоны <sup>*)</sup>	I	4	6	8
	ЗЮ	ЗЮ	Бок. экран	Бок. экран
Толщина зоны, см	118,9	50,1	13,6	26,4
Уран-235	0	0	0	0
Уран-238	0,2061	0,06983	0 <sup>3</sup> 5766	0 <sup>4</sup> 4360
Плутоний-239	0,1500	-0,06147	0,03376	0 <sup>2</sup> 3460
Плутоний-240	0 <sup>2</sup> 8901	0 <sup>2</sup> 2104	0 <sup>4</sup> 6800	0
Плутоний-241	-0,4975	-0,2273	0 <sup>4</sup> 2891	0
Плутоний-242	0 <sup>3</sup> 5775	0 <sup>3</sup> 5405	0	0
Уран-236	0	0	0	0
Осколки	-0,4926	-0,1967	-0 <sup>3</sup> 3335	-0 <sup>4</sup> 1854

Продолжение таблицы 12

б) борные КС

Номер зоны <sup>*)</sup>	1 З.Ю	4 З.Ю с КС	6 З.Ю	8 Бок. экран	10 Бок. экран
Толщина зона, см	72,17	46,73	50,1	13,6	26,4
Уран-235	0	0	0	0	0
Уран-238	0,05326	0,08183	0,06379	0 <sup>3</sup> 6923	0 <sup>4</sup> 5872
Плутоний-239	0,01472	0,02811	-0,2026	0,03505	0 <sup>2</sup> 3679
Плутоний-240	0 <sup>2</sup> 1955	0 <sup>2</sup> 3044	0 <sup>3</sup> 5175	0 <sup>4</sup> 8558	0
Плутоний-241	-0,1289	-0,2045	-0,2252	0 <sup>4</sup> 4297	0
Плутоний-242	0 <sup>3</sup> 1102	0 <sup>3</sup> 1633	0 <sup>3</sup> 5086	0	0
Уран-236	0	0	0	0	0
Осколки	-0,1285	-0,1965	-0,2020	-0 <sup>3</sup> 4211	-0 <sup>4</sup> 2776

\*) Нумерация зон в случае топливных КС соответствует рис. 4а, в случае борных КС - рис. 4б.

Таблица 13

Вклад различных зон реактора в "тепл" выгорания (в процентах)

Топливные КС			Борные КС		
Номер зоны <sup>*)</sup>	Зона	Величина	Номер зоны <sup>*)</sup>	Зона	Величина
1	З.Ю	-42,65	1	З.Ю	-20,05
4	З.Ю	-70,64	4	З.Ю с КС	-14,01
6	Бок. экраны	+ 4,00	6	З.Ю	-75,00
8	Бок. экран	+ 0,31	8	Бок. экран	+ 4,74
2	ТЭ к З.Ю	+ 6,09	10	Бок. экран	+ 0,39
5	ТЭ к З.Ю	+ 2,82	2	ТЭ к З.Ю	+ 1,14
7	Бок. экран- -торц. часть	+ 0,07	5	ТЭ к З.Ю	+ 0,78
9	Бок. экран- -торц. часть	0	7	ТЭ к З.Ю	+ 1,91
			9	Бок. экран- -торц. часть	+ 0,08
			11	Бок. экран- -торц. часть	0

\*) Нумерация зон в случае топливных КС соответствует рис. 4а, в случае борных КС - рис. 4б.

Таблица 14  
Эффективность стержней регулирования (%  $\Delta k/k$ )

Стержни СУЗ	Топливные КС	Борные КС
Система КС	3,98(22 КС)	4,35(18 КС)
Стержень КС (из внутреннего кольца - помечен точкой /I/ )	0,20	0,24
3 стержня КС (помечены точками /I/)	0,79	1,34
1 стержень АР	0,18	0,18
2 стержня АР	0,37	0,34
7 стержней АЗ, АЗ-ТК(один центральный и 6 стержней внутреннего кольца системы АЗ, АЗ-ТК)	2,45	0,88
6 стержней АЗ, АЗ-ТК (периферийное кольцо системы АЗ, АЗ-ТК)	2,45	2,59
Суммарная эффективность 6 периферийных стержней системы АЗ, АЗ-ТК и двух стержней АР	2,84	2,94
Суммарная эффективность системы АЗ, АЗ-ТК (13 стержней) и 2 стержня АР	6,00	3,95

Таблица 15  
Температурный мощностной эффекты реактивности

Составляющие эффекта	Температурный $\Delta k/k/^\circ\text{C} \times 10^{-5}$	Мощностной $\Delta k/k \times 10^{-5}$
Радиальное расширение	-0,49	- 86
Аксиальное расширение (свободное расширение топлива)	-0,07	- 78
Изменение плотности натрия	+0,48	+ 48
Доплер-эффект	на топливе	-1,19
	на стали	-0,09
Суммарный эффект	-1,36	-844

\* При 300 °С.

Таблица 16

Распределение поля энерговыделения по ячейкам (в относительных единицах) от центра активной зоны в положительном направлении оси X

Комплекс TRIGEX

Номер ячейки	В активную зону полностью введены поглощающие части топливных КС ("после перегрузки")	Частичное извлечение из активной зоны поглощающих частей топливных КС ("перед перегрузкой")	В активную зону полностью введены борные КС ("после перегрузки")	Частичное извлечение из активной зоны борных КС ("перед перегрузкой")
0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	0,926	0,972	0,958	0,985
4	0,914	0,926	0,782	0,865
6	0,856	0,852	0,619	0,762
8	0,842	0,768	0,756	0,843
10	0,738	0,601	0,917	0,863

Таблица 17

Распределение поля энерговыделения по ячейкам (в относительных единицах)  
от центра активной зоны в положительном и отрицательном направлениях оси X

## Программа AMBAR

Номер ячейки	В активную зону полностью введены поглощающие части топливных КС	Извлечен один топливный КС из внутреннего кольца	Извлечены три топливных КС один из внутреннего и две из наружного кольца	В активную зону полностью введены борные КС	Извлечен один борный КС из внутреннего кольца	Извлечены три борные КС - один из внутреннего и две из наружного кольца
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	0,982	0,983	1,084	0,980	1,00	1,237
4	0,952	1,026	1,283	0,920	0,980	1,397
6	0,902	0,992	1,453	0,669	0,822	1,601
8	0,896	0,950	1,445	0,868	0,970	1,884
10	0,800	0,834	1,175	1,078	1,176	1,944
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
2	0,982	0,902	0,831	0,980	0,923	0,799
4	0,952	0,850	0,726	0,920	0,734	0,552
6	0,902	0,789	0,634	0,669	0,568	0,358
8	0,896	0,773	0,595	0,868	0,704	0,376
10	0,800	0,686	0,517	1,078	0,866	0,442

Таблица 18

Распределение поля энерговыведения по ячейкам (в относительных единицах) от центра активной зоны в положительном и отрицательном направлениях оси  $Y$

Номер ячейки	В активную зону полностью введены поглощающие части топливных КС	Извлечен топливный КС из внутреннего кольца	Извлечены три топливных КС один из внутреннего и два из наружного кольца	В активную зону полностью введены борные КС	Извлечен один борный КС из внутреннего кольца	Извлечены три борные КС - один из внутреннего и два из наружного кольца
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1	1,081	1,010	1,068	0,957	0,932	0,888
2	1,063	0,976	1,063	0,823	0,778	0,696
3	0,962	0,870	0,953	0,652	0,591	0,484
4	0,926	0,827	0,903	0,730	0,630	0,452
5	0,989	0,875	0,941	1,270	0,968	0,658
6	0,737	0,650	0,693	0,999	0,841	0,560
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
-1	1,081	1,039	0,972	0,957	0,965	1,001
-2	1,063	1,021	0,907	0,823	0,824	0,868
-3	0,962	0,915	0,781	0,652	0,631	0,652
-4	0,926	0,874	0,717	0,730	0,687	0,699
-5	0,989	0,923	0,742	1,270	1,054	1,033
-6	0,737	0,686	0,544	0,999	0,914	0,880

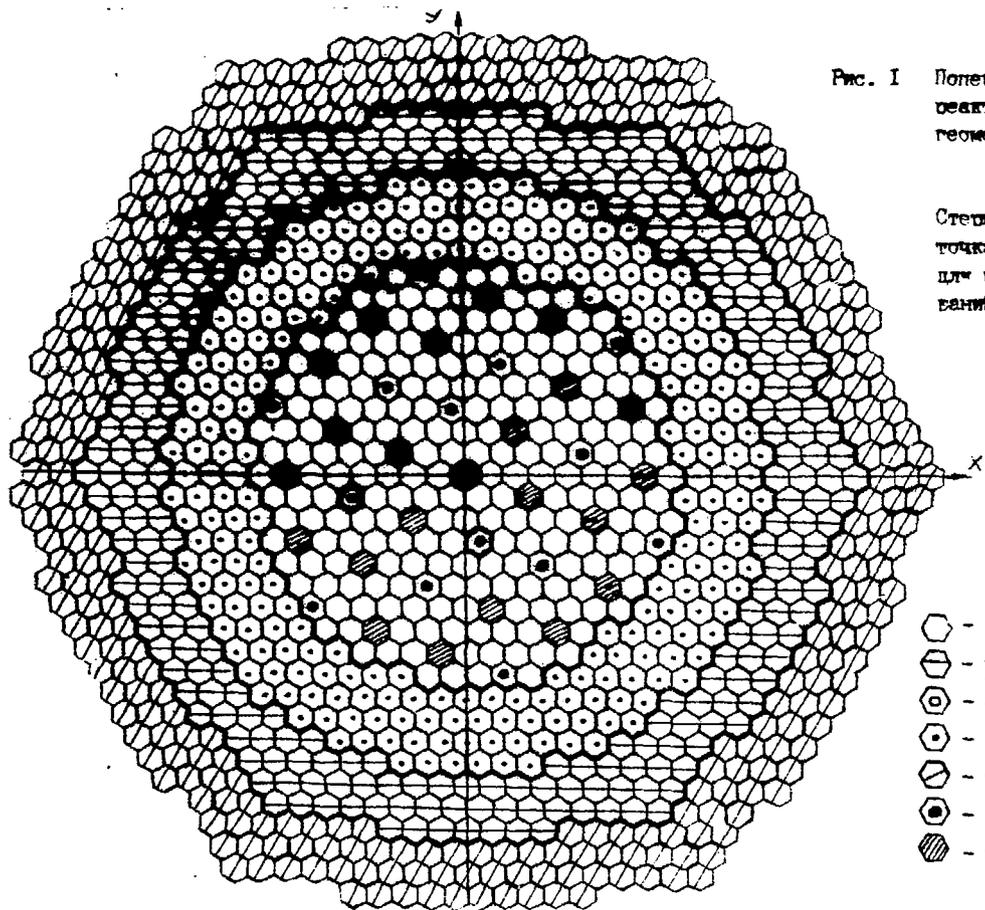


Рис. 1 Поперечный разрез модели реактора в гексагональной геометрии (при  $Z = 0$ ).

Стержни КС, помеченные точками, использованы для проведения исследований по п. 5 раздела 3

- - топливная ячейка ГМО (210)
- ◐ - топливная ячейка бокового яруса (214)
- ⊙ - стержни АР (2)
- ⊕ - топливная ячейка ЗЕО (252)
- ◑ - ячейка бокового подпора (324)
- ⊗ - стержни АЗ (7)  
АЗ-ТК (8)
- ⊠ - пакет КС (28)

№ п/п	верхний		активная зона					верхний		верхний	
	тощ. слой	подпол	180	160	140	120	100	80	тощ. слой	подпол	
I	1		2		3				1		
II	1				4					1	
III		5			5						
IV		5			5				5		
V		5			5					8	
VI		9			8				5		
VII		5			7				5		
VIII		7			5						
IX		9			8				5		
X		5			5					8	
XI					10						

Рис. 2. Дифференциация пород в разрезе

Пояснения к рисунку 2

- I - ячейка зон малого и большого обогащений топлива (ЗМО и ЗБО);
- II - ячейка бокового экрана;
- III - ячейка стержней аварийной защиты и температурной компенсации (АЗ и АЗ-ТК) - стержни выведены из активной зоны;
- IV - ячейка стержней аварийной защиты и температурной компенсации (АЗ и АЗ-ТК) - стержни введены в активную зону;
- V - ячейка компенсирующих стержней (КС) на основе топливного материала активной зоны - состояние реактора "после перегрузки";
- VI - ячейка компенсирующих стержней (КС) на основе топливного материала активной зоны - состояние реактора "перед перегрузкой";
- VII - ячейка компенсирующих стержней (КС) на основе поглощающего материала - карбида бора - состояние реактора "после перегрузки";
- VIII - ячейка компенсирующих стержней (КС) на основе поглощающего материала - карбида бора - состояние реактора "перед перегрузкой";
- IX - ячейка стержня автоматического регулирования (АР) - стержень введен в активную зону;
- X - ячейка стержня автоматического регулирования (АР) - стержень выведен из активной зоны;
- XI - ячейка бокового подпора.

Составы зон для отдельных ячеек приведены в табл. I.

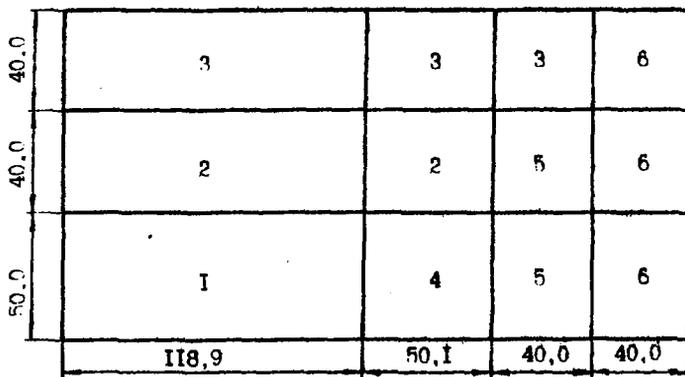
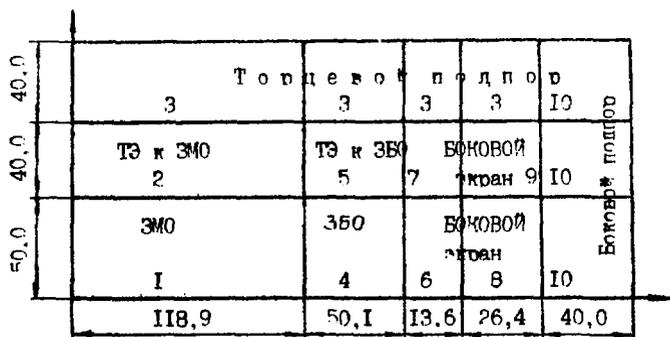


Рис. 3 Расчетная модель реактора в R,Z геометрии (симметрично относительно оси Z )

Все размеры указаны в см

а) топливные КС



б) борные КС

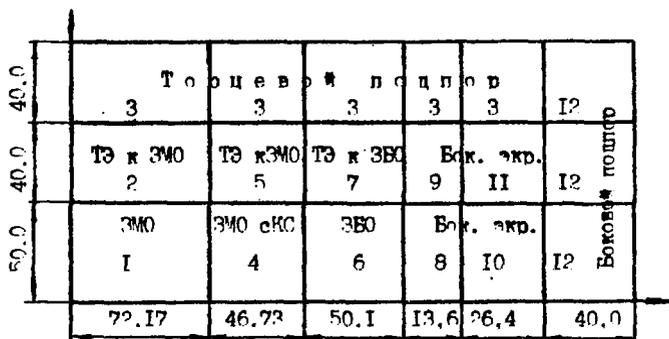


Рис. 4 Расчетные модели в двумерной (R, Z) геометрии (комплекс РВР-80).

Все размеры указаны в см

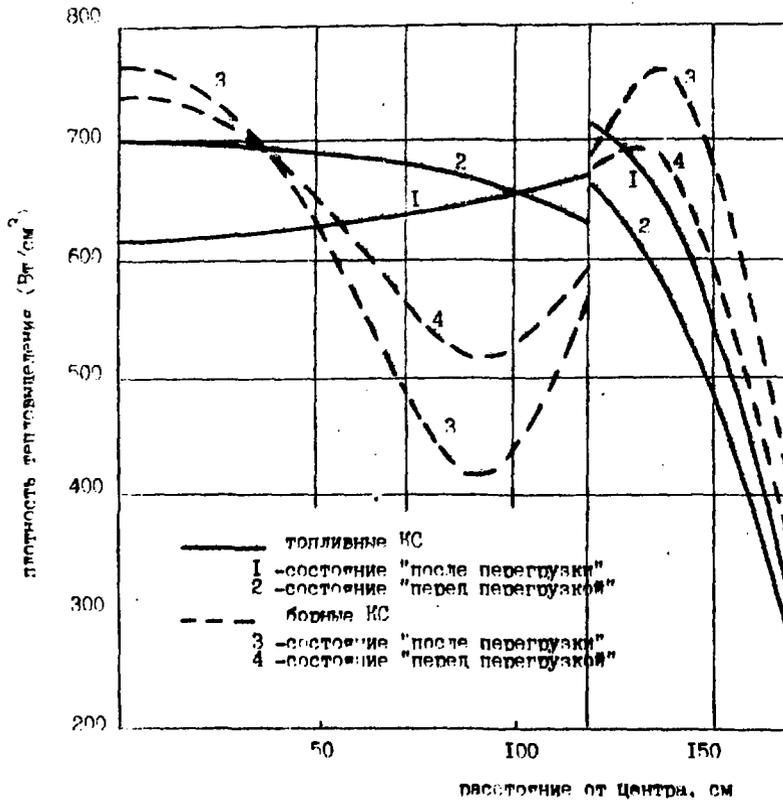


Рис. 5 Распределение поля тепловыделения по радиусу активной зоны

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Воропаев А.М. и др. Сравнение расчётов двумерной модели быстрого реактора. - Атомная энергия, 1980, т. 48, вып. 6, с. 335.
2. Абагян Л.П. и др. Групповые константы для расчёта реакторов и защиты. Москва, Энергоиздат, 1981.
3. Зинин А.И. и др. Математическая модель активной зоны быстрого реактора. В сб. "Вопросы атомной науки и техники". Серия "Физика и техника ядерных реакторов". Вып. 7(29), 1982.
4. Серёгин А.С. Об одном подходе к повышению точности решения малогрупповой задачи диффузии на крупной сетке в трехмерной гексагональной геометрии. Препринт ФЭИ-1521, Обнинск, 1984.
5. Пивоваров В.А., Серёгин А.С. Подготовка малогрупповых констант для расчёта реакторов в трехмерной гексагональной геометрии, Препринт ФЭИ-1517, Обнинск, 1984.
6. Алексеев П.Н. и др. Комплекс программы ТВК-2Д. В сб. "Вопросы атомной науки и техники". Серия "Физика и техника ядерных реакторов". Вып. 4(33), 1983.
7. Савоськин М.М. и др. Аннотация пакета программ КРАБ-1. В сб. "Вопросы атомной науки и техники". Серия "Физика и техника ядерных реакторов". Вып. 4(43), 1984.
8. Серёгин А.С. Аннотация программы ALBAR для малогруппового нейтронно-физического расчёта реактора в двумерной гексагональной геометрии. В сб. "Вопросы атомной науки и техники". Серия "Физика и техника ядерных реакторов", вып. 4(33), 1983.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
В В Е Д Е Н И Е . . . . .	I
1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ РЕАКТОРА В ТРЕХМЕРНОЙ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ . . . . .	2
2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ В ДВУМЕРНОЙ (R, Z) ГЕОМЕТРИИ . . . . .	4
3. ФОРМУЛИРОВКА РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ, РЕКОМЕНДАЦИИ К РАСЧЕТАМ И ФОРМЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ . . . .	5
4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ _ . . . . .	8
4.1. Расчёты "поштучных" обогачений и других характеристик реактора в установившемся режиме перегрузок . . . . .	9
4.2. Расчёты характеристик реактора в трехмерной гексагональной геометрии . . . . .	10
4.3. Расчёты изменения реактивности реактора от выгорания топлива ("тепл" выгорания) . . . .	12
4.4. Эффективность стержней регулирования . . . . .	13
4.5. Расчёт температурного и мощностного эффектов реактивности . . . . .	13
4.6. Расчёты полей энерговыделения при непроектном положении компенсирующих стержней . . . . .	13
ТАБЛИЦЫ И РИСУНКИ . . . . .	15
Л И Т Е Р А Т У Р А . . . . .	35
С О Д Е Р Ж А Н И Е . . . . .	36

Технический редактор Н. П. Герасимова

---

Подписано к печати 30.11.1989 г. ТБ-02992 Бумага писчая № 1  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub> Усл. п. л. 2,25 Уч.-изд. л. 1,5 Тираж 110 экз.  
Цена 30 коп. Индекс 3624 ФЭИ-2036

---

Отпечатано на ротапринтере.  
249020, г. Обнинск Калужской обл., ФЭИ.

**30 коп.**

**Индекс 3624**

**Тестовая модель быстрого энергетического реактора большой мощности в гексагональной геометрии. Описание и результаты расчетов.  
ФЭИ-2036. 1989. 1-36.**