



Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции

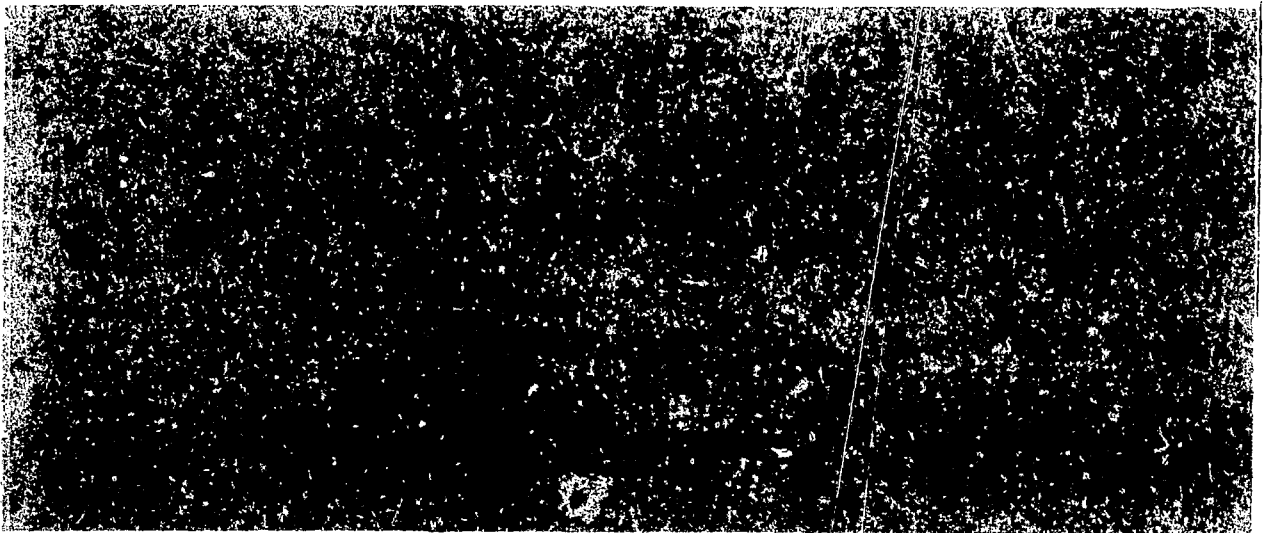
ИНСТИТУТ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

им. И. В. Курчатова

А.С. Каминский, В.А. Павшук,  
В.В. Парамонов, В.М. Талызин,  
А.В. Черепанов

ИАЭ-3883/4

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВТГР  
НА КРИТСТЕНДЕ ГРОГ



Москва 1984

## **РУБРИКАТОР ПРЕПРИНТОВ ИАЭ**

1. Общая теоретическая и математическая физика
2. Ядерная физика
  
3. Общие проблемы ядерной энергетики
4. Физика и техника ядерных реакторов
5. Методы и программы расчета ядерных реакторов
  
6. Теоретическая физика плазмы
7. Экспериментальная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез
8. Проблемы термоядерного реактора
  
9. Физика конденсированного состояния вещества
10. Физика низких температур и техническая сверхпроводимость
11. Радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение
  
12. Атомная и молекулярная физика
13. Химия и химическая технология
  
14. Приборы и техника эксперимента
15. Автоматизация и методы обработки экспериментальных данных
16. Вычислительная математика и техника

Индекс рубрики дается через дробь после основного номера ИАЭ.

Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции  
Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова

А.С. Каминский, В.А. Павшук, В.В. Парамонов,  
В.М. Талызин, А.В. Черепанов

**РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВТГР  
НА КРИТСТЕНДЕ ГРОГ**

Москва

1984

УДК 621.039.51

**Ключевые слова:** высокотемпературный реактор с гелиевым теплоносителем и графитовым замедлителем (ВТГР), критические сборки, моделирование, расчет.

С учетом нейтронно-физических особенностей ВТГР расчетно обоснованы принципы моделирования, позволяющие на сравнительно простых и удобных в эксплуатации критических сборках с традиционно применяемыми материалами осуществить широкую вариацию нейтронно-физических параметров и близость их к исследуемым ВТГР.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разрабатываемые высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы ВТГР с гелиевым теплоносителем и графитовым замедлителем являются новым типом реакторов и обладают рядом особенностей, существенно влияющих на их нейтронно-физические характеристики. Это обуславливает необходимость исследования ВТГР на критических сборках.

При изучении на критических сборках нейтронно-физических характеристик ВТГР возникает потребность исследования систем с широкой вариацией их параметров, обусловленная необходимостью изучения вопросов физики ВТГР, общих для всех модификаций и специфических, учитывающих особенности различных вариантов ВТГР, а также связанных с изменением параметров конкретного варианта в процессе кампании. Основным состоянием ВТГР с принципом ОПАЗ (однократного прохождения активной зоны топливом) является равновесное, при котором в реактор поступают свежие шаровые твэлы, а выходят существенно выгоревшие. Это приводит к большой неоднородности изотопного состава топлива в твэлах и значительной неравномерности нейтронных полей по высоте реактора. Следует также заметить, что параметры переходного и равновесного состояний ВТГР зависят от многих факторов и имеют статистический характер (связаны с засыпкой шаровых твэлов), поэтому при моделировании их на критических сборках существует некоторая неопределенность. Это обуславливает необходимость также обеспечения возможности вариации нейтронно-физических свойств сборок для изучения вопроса влияния отклонений параметров систем на их нейтронно-физические характеристики. Очевидно, практически невозможно осуществить моделирование на сбірках нейтронно-физических характеристик ВТГР, когда полностью сохраняются состав и гео-

метрии натурной и модельной систем. В связи с этим возникает необходимость выработки нового подхода к моделированию данного типа реакторов.

Учитывая нейтронно-физические особенности ВТГР, в работе расчетно обоснованы принципы моделирования, позволяющие на сравнительно простых и удобных в эксплуатации критсборках с традиционно применяемыми материалами осуществить широкую вариацию нейтронно-физических параметров и близость их к исследуемым реакторам.

## 2. МЕТОДИКИ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Исследование выполнено с использованием следующих программ.

Расчет элементарных ячеек проводился по программам WIMS-D [1], НЕКТАР [2] и PIT [3].

Эффективный коэффициент размножения и пространственно-энергетическое распределение нейтронов в ВТГР и сборках определялись по двумерной программе ПЕНАП [4].

Ниже приведено краткое описание данных программ.

Программа WIMS-D проводит нейтронно-физический расчет ячейки для всей области энергий нейтронов. Вначале методом вероятности столкновений решается уравнение переноса в интегральной форме для расчета детального спектра в 69 энергетических группах (42 группы в тепловой области энергий нейтронов и 27 групп в быстрой и промежуточной областях энергий нейтронов) в каждой из зон ячейки. Затем выполняется свертка сечений в заданное число групп, с которыми методом дискретных ординат или методом вероятности столкновений рассчитывается пространственно-энергетическое распределение нейтронов в ячейке, после чего вычисляются гомогенизированные макросечения и различные функционалы. Для расчета резонансного поглощения используются теоремы эквивалентности с уточнением при помощи  $\lambda$ -множителей.

Расчет резонансных эффектов в системах с двойной гетерогенностью выполнялся (с использованием теоремы эквивалентности) по программе НЕКТАР.

Константы тепловых нейтронов определялись также по программе PIT, которая рассчитывает методом Монте-Карло пространственно-энергетическое распределение медленных нейтронов в системах с про-

извольной геометрией с учетом особенностей рассеяния медленных нейтронов на графите.

В программе ПЕНАП проводится многогрупповой конечно-разностный расчет реактора в  $P_1$ -приближении итерационным методом переменных направлений.

### 3. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТГР

Топливный модуль ВТГР включает в себя графитовую матрицу и диспергированные в ней микротвэлы, состоящие из двуокиси (или карбида) урана (для уранового цикла) с несколькими оболочками графита и кремния. Топливный модуль и его графитовое окружение (оболочка или вместе с внутренним вкладышем) образуют твэл ВТГР. Такая композиция твэлов ВТГР обуславливает следующие особенности рассматриваемых систем:

- нейтронно-физические характеристики свежих твэлов ВТГР определяются двуокисью (или карбидом) урана и графитом (наличие в оболочках микротвэлов других элементов практически не влияет на нейтронно-физические свойства твэлов, так как их количество мало);
- отсутствие сильнопоглощающих нейтроны конструкционных материалов и существенная гомогенизация топлива (находится в графитовой матрице) приводят к весьма слабой блокировке нерезонансных нейтронов в топливной зоне;
- использование микротвэлов приводит к двойной гетерогенности топлива для резонансной области энергий нейтронов, при этом резонансные эффекты зависят от размеров ядер микротвэлов, плотности и обогащения по урану-235 топлива и геометрических параметров твэлов.

Исследуем зависимость параметров твэлов в возможном диапазоне их изменения для двух типов рассматриваемых шаровых твэлов: двухслойного и трехслойного<sup>\*)</sup>. Внешний диаметр обоих типов твэлов 6 см. Двухслойный твэл состоит из центрального топливного модуля диаметром 5 см и графитовой оболочки. Трехслойный твэл включает

<sup>\*)</sup> Двухслойный твэл более технологичен в изготовлении по сравнению с трехслойным. Преимущества последнего в том, что он имеет лучшие теплофизические характеристики.

центральный графитовый вкладыш диаметром 3 см и графитовую оболочку с внутренним диаметром 5 см. Между ними расположен топливный модуль. Такой трехслойный твэл рассматривается, в частности, для реактора ВГ-400 [5].

Границы интервалов диаметров ядер микротвэлов  $d_k$  и отношений ядерных концентраций графита и урана в твэлах  $\rho_C/\rho_U$  выбраны соответственно в пределах от 200 до 800 мкм и от 200 до 1000, т.е. указанные диапазоны охватывают практически все возможные варианты топливных загрузок ВТГР.

Из-за квазигомогенности твэлов ВТГР для нерезонансных нейтронов и относительной малости резонансных эффектов на всех изотопах в свежих твэлах ВТГР (кроме урана-238) вероятности избежать захвата на них при замедлении нейтронов до тепловой области энергий практически не зависят от диаметров ядер микротвэлов, геометрических параметров твэлов, а определяются только отношением ядер графита и урана-235. В табл. 1 приведена расчетная зависимость, справедливая для двухслойного и трехслойного шаровых твэлов при диаметрах микротвэлов 200, 500 и 1000 мкм.

Т а б л и ц а 1. Вероятность избежать резонансного захвата при замедлении нейтронов до тепловой области энергий на всех изотопах в свежих твэлах ВТГР (кроме урана-238)

$\rho_C/\rho^{235}U$	1850	3690	6020	9200
$\varphi_{\text{без } 238U}$	0,696	0,815	0,877	0,915

Приведенные на рис. 1 зависимости отношений средних потоков тепловых нейтронов в топливной зоне и графите от параметров твэлов ВТГР показывают слабую блокировку тепловых нейтронов в топливной зоне (не превышает 10%).

Выполненные оценки показывают, что в возможном диапазоне вариации параметров ВТГР относительное изменение коэффициента размножения нейтронов за счет такой блокировки тепловых нейтронов в топливе не превышает 0,5%.

Отсутствие в твэлах ВТГР сильнопоглощающих нейтроны конструкционных материалов и расположение топлива в графитовой матри-



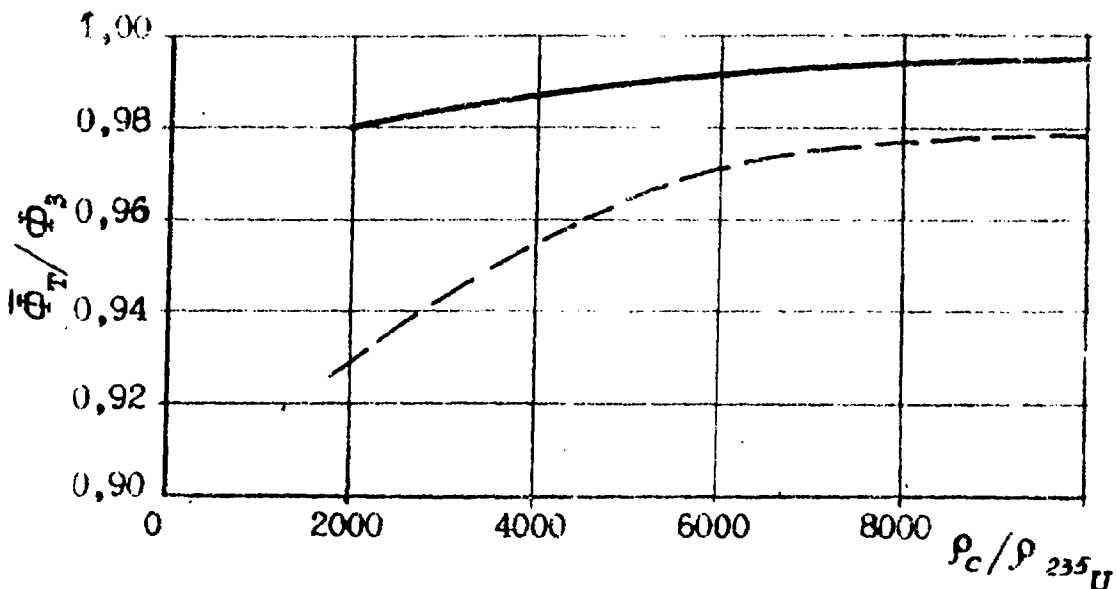


Рис. 1. Зависимость блокировок тепловых нейтронов в топливе ВТГР от отношения ядерных концентраций графита и урана-235: — — — трехслойный твэл; - - - - - двухслойный твэл

це обуславливают зависимость микросечений тепловых нейтронов только от отношений ядерных концентраций графита и урана. Это объясняется следующим. Поскольку поглощающие и замедляющие свойства в твэлах ВТГР определяются ураном и графитом и рассматриваемые системы для тепловых нейтронов являются квазигомогенными, то температура нейтронного газа, зависящая от отношения  $\Sigma_a/\xi\Sigma_s^*$ , определяется значением  $\rho_C/\rho_U$ .

Вышеизложенные результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что твэлы ВТГР можно рассматривать квазигомогенными системами для всех изотопов, кроме урана-238, имеющего сильные резонансы в эпитепловой области энергий нейтронов.

Рассмотрим теперь в твэлах ВТГР резонансные эффекты на уране-238. На рис. 2 приведены средние эффективные резонансные интегралы урана-238 в топливной зоне в зависимости от параметров твэлов ВТГР. Наблюдаемая слабая зависимость эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе от геометрии твэлов (для малых значений  $\rho_C/\rho_{235U}$   $I_{эф}$  практически не зависит от геометрии твэлов), поэтому полученные ре-

\*) Отношение эффективной температуры нейтронного газа  $T_n$  и температуры среды  $T_0$  для уран-графитовых систем может быть определено соотношением:  $T_n/T_0 = 1 + 1,84 \Sigma_a/\xi\Sigma_s$

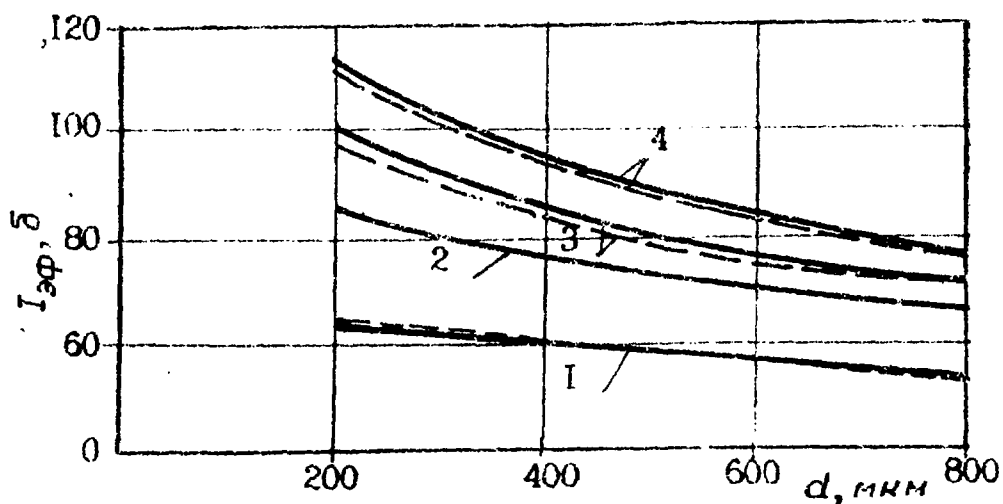


Рис. 2. Зависимость эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливной зоне ВТГР от диаметра микротвзлов: — — — — — трехслойный твэл; - - - - - двухслойный твэл;  $\rho_C/\rho_{235U}$ : 1 — 205; 2 — 410; 3 — 670; 4 — 1025

зультаты можно распространить на все возможные геометрические варианты твзлов.

На основании данных, приведенных на рис. 2, получена зависимость диапазона изменения эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе от отношения ядерных концентраций графита и урана-238 (в возможной для ВТГР области изменения), которая представлена на рис. 3. Для сравнения здесь же приведена зависимость  $I_{эф}$  урана-238 в топливе от  $\rho_C/\rho_{235U}$  для гомогенной среды.

Как показывает анализ результатов расчетов, эффективный резонансный интеграл урана-238 в топливе практически не зависит от обогащения топлива по урану-235. Поэтому приведенные зависимости эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе являются характерными для любых обогащений топлива по урану-235, рассматриваемых в ВТГР.

#### 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВТГР СО СВЕЖИМИ ТВЗЛАМИ

Рассмотренные выше нейтронно-физические особенности ВТГР позволяют сформулировать основные требования моделирования ВТГР со свежими твэлами, обеспечивающие идентичность (или удовлет-

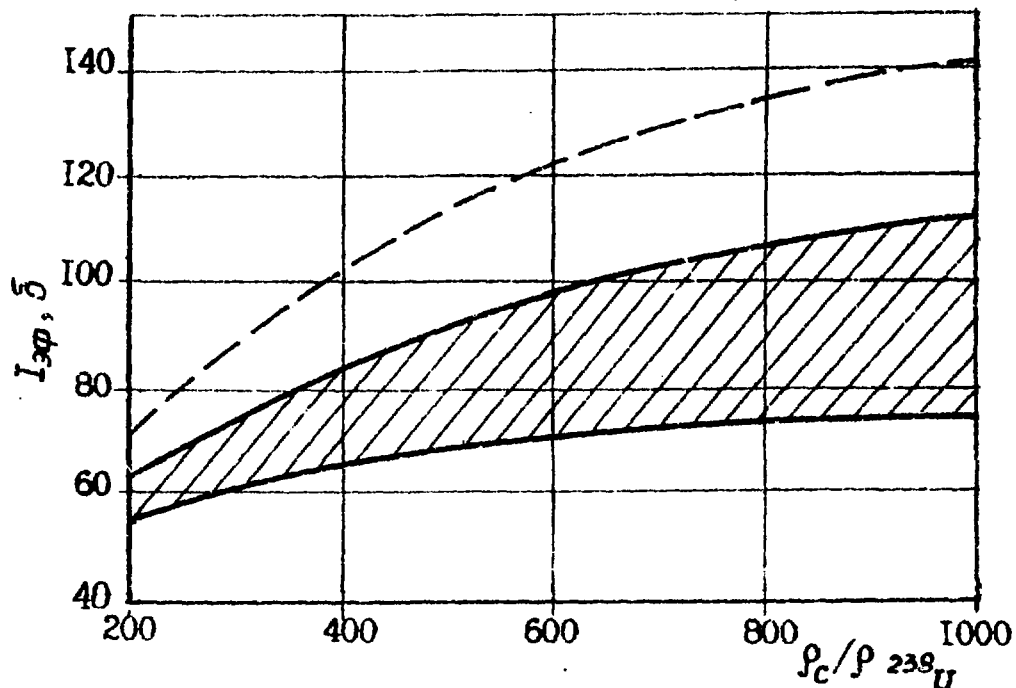



Рис. 3. Зависимость эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе от отношения ядерных концентраций графита и урана-238:  — в ВТГР; — — — — в однородной среде

ворительную близость) нейтронно-физических характеристик натурной (н) и модельной (м) систем:

— модельная система должна иметь такие же основные изотопы и отношение ядерных концентраций, как и в натурной системе, т.е.

$$\rho_C^M : \rho_{235\text{U}}^M : \rho_{238\text{U}}^M = \rho_C^H : \rho_{235\text{U}}^H : \rho_{238\text{U}}^H ; \quad (1)$$

— модельная система должна быть близка к однородной для нерезонансных нейтронов (блокировка в топливе не более 10%); это может быть обеспечено при наличии топливного модуля, содержащего вместе топливо и замедлитель;

— в модельной системе должны быть обеспечены необходимые резонансные эффекты.

Покажем, что реализацию такого моделирования можно осуществить, используя три типа элементов:

— топливный, состоящий из однородной смеси графита и двуокиси урана с максимальным обогащением по урану-235 из исследуемого диапазона;

- топливный, состоящий из гомогенной смеси графита и двуокиси урана естественного состава (или обедненного по урану-235);
- графитовый.

Плотность урана выбирается из условия обеспечения минимального из исследуемого диапазона эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе.

При определенной комбинации таких элементов может быть обеспечено необходимое соотношение ядерных концентраций графита, урана-235 и урана-238. Требуемые резонансные эффекты в модельной системе могут быть достигнуты за счет различной гетерогенности размещения топливных элементов среди графитовых. При этом должно быть выполнено условие, что блокировка нерезонансных нейтронов в топливе не превышает 10%.

Для подтверждения возможности обеспечения с помощью данных элементов нейтронно-физических характеристик ВТГР при широкой вариации их параметров был выполнен комплекс нейтронно-физических расчетов. Анализ результатов исследований показывает, что требуемые нейтронно-физические характеристики обеспечиваются, в частности, при использовании элементов (в виде пластин или цилиндров) со следующими параметрами:

- толщина 5 мм, остальные линейные размеры  $\sim 50$  мм;
- плотность двуокиси урана в топливном модуле  $0,5$  г/см<sup>3</sup>.

Приведенные на рис. 4 зависимости эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе от толщин топливных пластин для разных отношений ядерных концентраций графита и урана-238 (т.е. при различных толщинах графитовых пластин) показывают, что диапазон изменения эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе даже перекрывает требуемый диапазон (см. рис. 3). Однако для максимальных значений  $\rho_c/\rho_{235} \approx U$  при большой толщине топливных пластин блокировка тепловых нейтронов в топливе превышает 10%. При обеспечении блокировки тепловых нейтронов меньше 10% в рассматриваемой модельной системе диапазон изменения эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе несколько сужается. В то же время он в основном перекрывает диапазон изменения эффективного резонансного интеграла в ВТГР при возможной вариации их параметров, что иллюстрируется на рис. 5. Слабое различие диапазонов изменения эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе для ВТГР и рассматриваемой модельной системы при крайних значениях  $\rho_c/\rho_{235} \approx U$

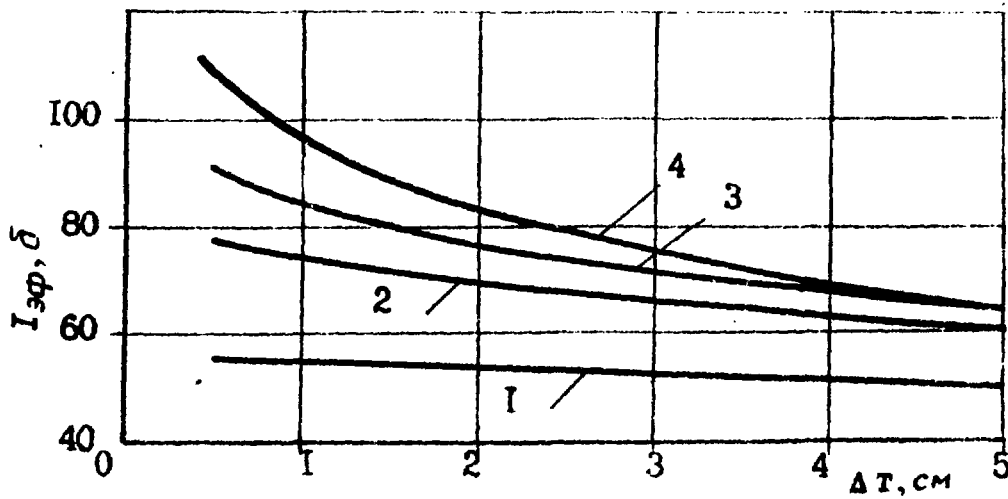


Рис. 4. Зависимость эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе от толщины топливного модуля ( $\gamma_{\text{UO}_2} = 0,5 \text{ г/см}^3$ ): 1 -  $\rho_C/\rho_{238\text{U}} = 166$ ; 2 -  $\rho_C/\rho_{238\text{U}} = 332$ ; 3 -  $\rho_C/\rho_{238\text{U}} = 500$ ; 4 -  $\rho_C/\rho_{238\text{U}} = 925$

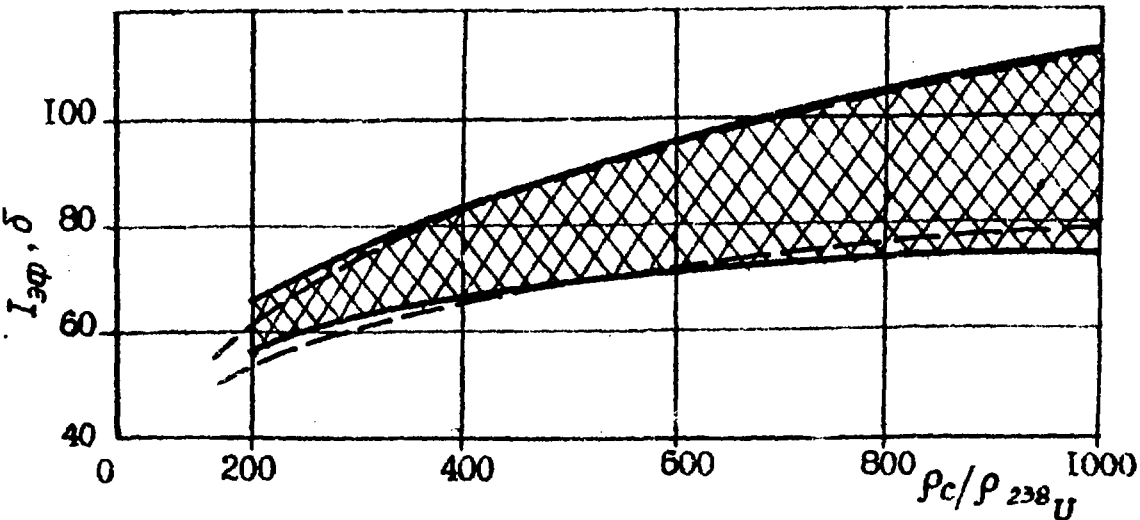




Рис. 5. Зависимость эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе от отношения ядерных концентраций графита и урана-238:  - в ВТГР;  - в модельной системе

и  $d_k$  может быть устранено за счет дополнительного использования топливных элементов с отличной от  $0,5 \text{ г/см}^3$  плотностью двуокиси урана. Это подтверждают приведенные на рис. 6 зависимости эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе от  $\rho_C/\rho_{238\text{U}}$  для систем пластин с плотностями двуокиси урана в топливном элементе  $0,5$  и  $1 \text{ г/см}^3$ .

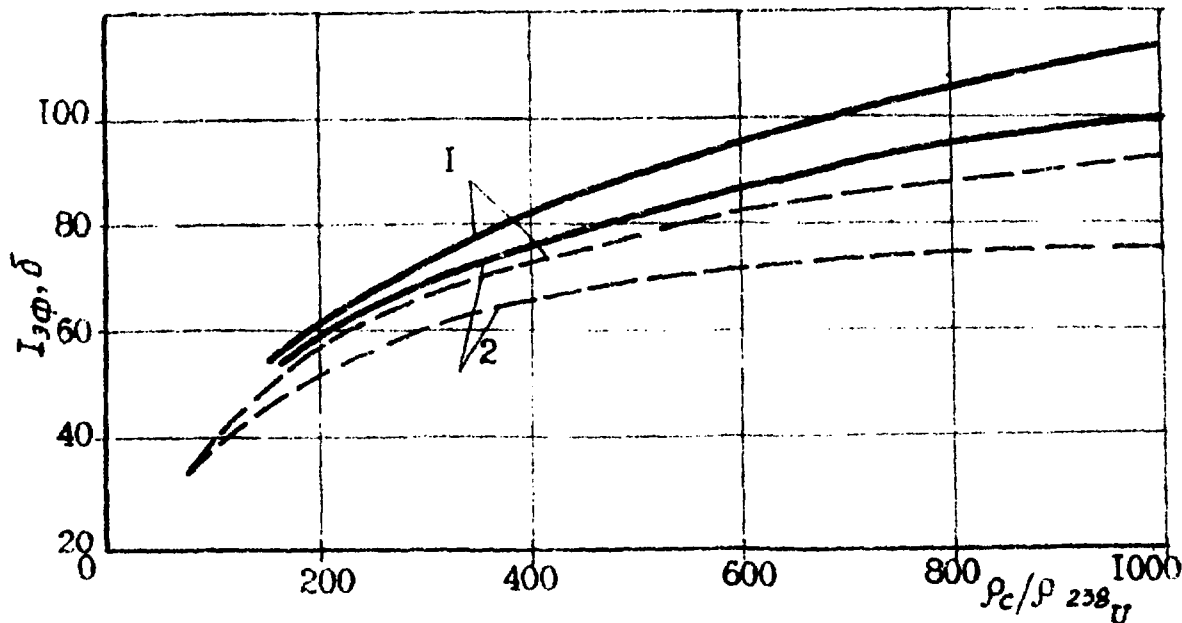


Рис. 6. Зависимость эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе от отношений ядерных концентраций графита и урана-238 для системы пластин: —  $\gamma_{\text{UO}_2} = 0,5 \text{ г/см}^3$ ; — — —  $\gamma_{\text{UO}_2} = 1 \text{ г/см}^3$ ; толщина топливной пластины: 1 — 5 мм; 2 — 10 мм

Такая концепция моделирования использована на сборках стенда ГРОГ [6], созданного для исследования физики ВТГР. С целью удобства эксплуатации при широкой вариации параметров практическая реализация моделирования на сборках стенда ГРОГ осуществляется следующим образом.

Как известно, в твэлах ВТГР графитовая матрица с топливом находится в графитовом окружении. Поэтому в сборках стенда ГРОГ топливные и графитовые элементы помещаются в каналы графитовой кладки. Последняя состоит из блоков с поперечным сечением 25 x 25 см. Графитовые блоки имеют 9 отверстий диаметром 5,5 см, расположенных в узлах квадратной решетки с шагом 8,35 см. В качестве топливных элементов используются:

- универсальные физические имитаторы (УФИ<sub>н</sub>), содержащие гомогенную смесь замедлителя и двуокиси урана с 10%-ным обогащением по урану-235 ( $\gamma_{\text{UO}_2} = 0,5 \text{ г/см}^3$ );

- универсальные физические имитаторы (УФИ<sub>е</sub>), содержащие гомогенную смесь замедлителя и двуокиси урана естественного состава ( $\gamma_{\text{UO}_2} = 0,5 \text{ и } 1 \text{ г/см}^3$ ).

Топливные и графитовые элементы представляют собой цилиндры диаметром 5 см и толщиной 1, 2,5 и 5 см. Для создания нужной пористости имеются также графитовые элементы в форме колец. Комбинации элементов в графитовой кладке позволяют моделировать необходимые нейтронно-физические характеристики ВТГР при широкой вариации их параметров, что следует из изложенных ниже результатов нейтронно-физических расчетов.

Сравнение зависимостей блокировок тепловых нейтронов в топливе для ВТГР иборок стенда ГРОГ (см. рис. 1 и 7) показывает их удовлетворительное совпадение. Это обуславливает удовлетворительное согласие вероятностей взаимодействия нейтронов тепловой области энергий для рассматриваемых ВТГР и моделирующих ихборок стенда ГРОГ.

Принятая для удешевления изготовления элементов и удобства эксплуатации стенда минимизация количества и дискретности элементов не позволяет полностью перекрыть диапазон изменения эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе ВТГР при возможной вариации их параметров на сборках стенда ГРОГ (рис. 8). Однако для рассматриваемых в настоящее время оптимальных вариантов ВТГР (вблизи  $d_k \approx 500$  мкм и  $\rho_C/\rho_U \sim 50$ ) на сборках стенда ГРОГ обес-

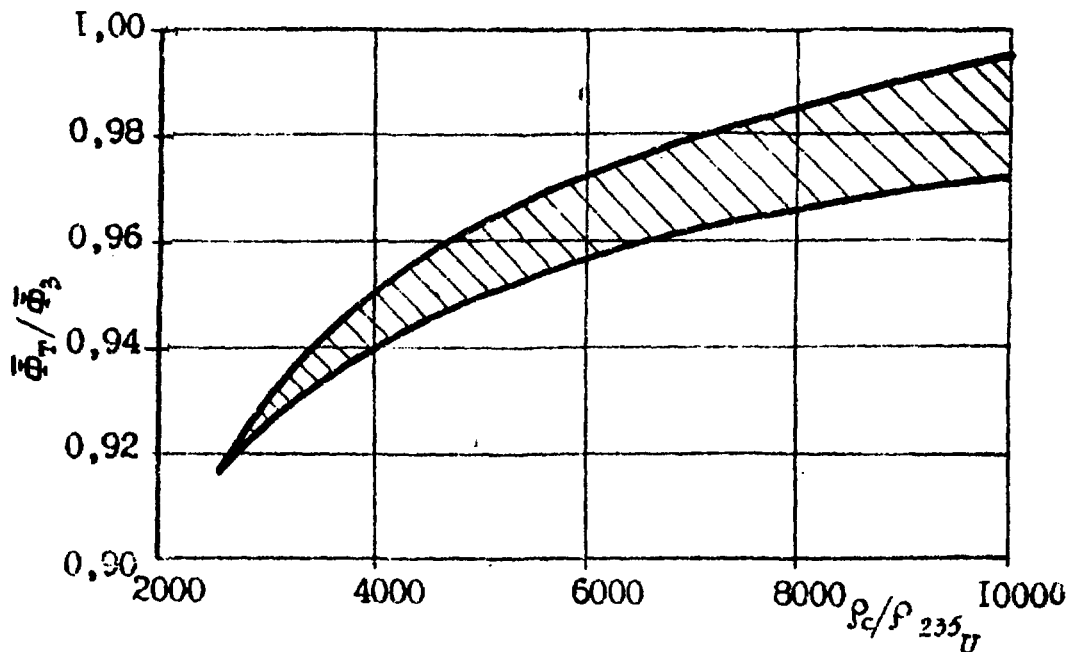


Рис. 7. Зависимость блокировок тепловых нейтронов в УФИ от отношения ядерных концентраций графита и урана-235

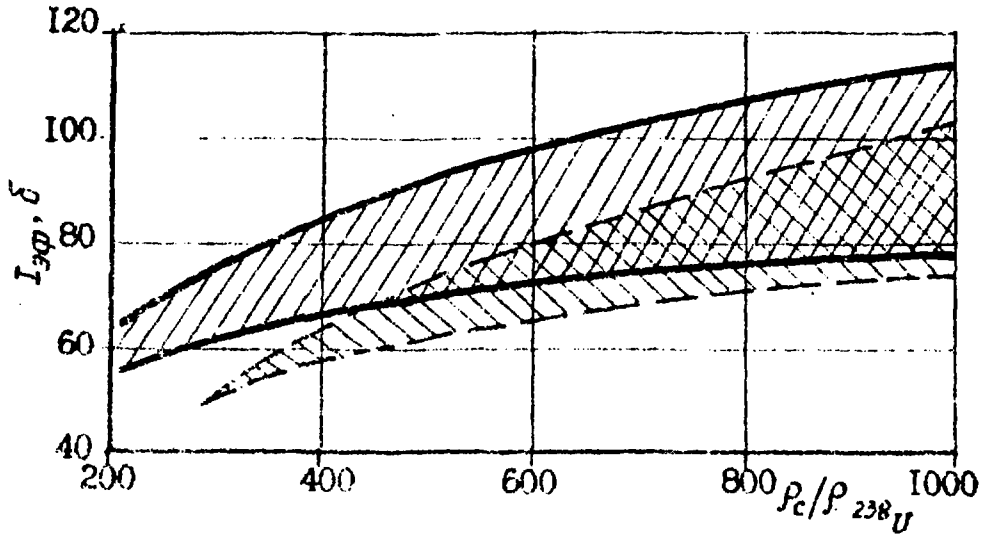




Рис. 8. Зависимость эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе от отношения ядерных концентраций графита и урана-238:  — в ВТГР;  — в сборках стенда ГРОГ

печиваются необходимые резонансные эффекты. С другой стороны, на сборках стенда ГРОГ требуемые резонансные эффекты могут быть достигнуты постановкой дополнительного количества урана-238 (УФИе), так как блокировка резонансных нейтронов на стенде ГРОГ при имитации некоторых вариантов ВТГР оказывается больше требуемой (см. рис. 8). Необходимое количество урана-238 выбирается из условия обеспечения на сборках стенда ГРОГ требуемых резонансных эффектов, т.е.

$$\rho_{238U}^M \cdot I_{эф}^M = \rho_{238U}^H \cdot I_{эф}^H \quad (2)$$

Поскольку отличие соответствующих значений эффективного резонансного интеграла урана-238 в топливе ВТГР и на сборках стенда ГРОГ незначительное, то, как следует из результатов расчетов, добавка на сборках стенда ГРОГ дополнительного количества урана-238 слабо сказывается на другие нейтронно-физические характеристики (в частности, вносимая реактивность не превышает 0,2%).

Следует отметить, что слабое отличие нейтронно-физических свойств натурной и модельной систем не играет существенной роли,



поскольку эффекты, обусловленные таким различием, можно изучать на небольшом количестве натуральных элементов, помещаемых в модельную систему. При близости нейтронно-физических свойств натурной и модельных систем граничные эффекты будут практически отсутствовать, поэтому нейтронно-физические характеристики в центре зоны с небольшим количеством натуральных элементов, помещенных в модельную систему с близкими нейтронно-физическими свойствами, будут идентичны свойствам большой натурной системы.

Возможность широкой вариации на сборках стенда ГРОГ нейтронно-физических свойств позволяет также рассмотреть вопрос отклонений параметров, что дает возможность подкорректировать данные на возможные небольшие различия модельной и натурной систем.

## 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫГОРАНИЯ

Поскольку затруднено использование на критических сборках продуктов взаимодействия топлива с нейтронами, рассмотрим возможность моделирования выгорания с помощью традиционно применяемых на сборках изотопов.

Продукты взаимодействия урана с нейтронами имеют сложную энергетическую зависимость сечений и моделирование их представляет определенные трудности. Следует, однако, отметить два обстоятельства:

- ВТГР являются реакторами на тепловых нейтронах;
- значение ядерной концентрации урана-238, имеющего большие резонансы, больше значений ядерных концентраций изотопов, появляющихся при выгорании топлива, поэтому в быстрой и промежуточной областях энергий нейтронов влияние урана-238 на сечения захвата будет существенным.

В связи с этим исследуем возможность моделирования топлива и продуктов взаимодействия его с нейтронами с помощью урана-235, урана-238, бора и кадмия.

Концентрации изотопов на сборке при моделировании ВТГР выбираются из условия сохранения для натуральных и модельных систем интегралов деления

$$\int_0^{\infty} \nu(E) \Sigma_f(E) \Phi(E) dE = \text{const} , \quad (3)$$

поглощения

$$\int_0^{\infty} \Sigma_a(E) \Phi(E) dE = \text{const} , \quad (4)$$

в том числе совпадения в тепловой области энергий нейтронов макроскопического сечения поглощения

$$\Sigma_a^T = \frac{\int_0^{E_{grp}} \Sigma_a(E) \Phi(E) dE}{\int_0^{E_{grp}} \Phi(E) dE} , \quad (5)$$

и наилучшего приближения сечений поглощения в промежуточной и быстрой областях энергий нейтронов.

Выполненные расчетные исследования позволяют сделать вывод о том, что достигается хорошее совпадение нейтронно-физических свойств ВТГР для различных вариантов и режимов работы и критсборок при моделировании на них топлива и продуктов взаимодействия его с нейтронами с помощью урана-235, урана-238, бора и кадмия (допустимо также моделирование без использования кадмия, так как нейтронно-физические свойства системы практически не изменяются). При совпадении коэффициента размножения нейтронов максимальное различие многогрупповых потоков нейтронов не превышают 10%, хотя различия групповых макроскопических сечений поглощения более существенны.

На сборках стенда ГРОГ такое моделирование может быть выполнено путем различной комбинации универсальных физических имитаторов, содержащих естественный уран и уран с 10%-ным обогащением по урану-235, и дополнительных поглотителей, содержащих естественный бор. Последние становятся между УФИ. Набор из четырех типов дополнительных поглотителей, отличающихся содержанием бора, позволяет плавно варьировать количество бора в сборках.

Для иллюстрации сравним нейтронно-физические свойства характерного фрагмента ВТГР, содержащего твэлы с наибольшим выгоранием, и его модели. Ядерные концентрации основных изотопов в натуральных и модельных системах представлены в табл. 2.

Групповые макроскопические сечения поглощения и отношения потоков нейтронов для модельной и натурной систем приведены на рис. 9.

Т а б л и ц а 2. Ядерные концентрации изотопов  $\times 10^{24}$

Изотоп	Натурная система	Модельная система
$^{235}\text{U}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$1,62 \cdot 10^{-6}$
$^{238}\text{U}$	$5,25 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^{-4}$
$^{236}\text{U}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$	—
$^{239}\text{Pu}$	$1,89 \cdot 10^{-7}$	—
$^{240}\text{Pu}$	$3,16 \cdot 10^{-7}$	—
$^{241}\text{Pu}$	$1,28 \cdot 10^{-7}$	—
$^{242}\text{Pu}$	$2,37 \cdot 10^{-7}$	—
$^{135}\text{Xe}$	$2,32 \cdot 10^{-11}$	—
$^{149}\text{Sm}$	$2,83 \cdot 10^{-10}$	—
Шлаки	$8,37 \cdot 10^{-6}$	—
С	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$
В	—	$5,4 \cdot 10^{-7}$

Анализ выполненного рассмотрения показывает, что при этом достигается хорошее моделирование на критической сборке поля энерговыделения и спектральных характеристик даже в сильно неоднородной системе, какой является ВТГР в равновесном состоянии (максимальные отличия энерговыделения не превышают 2%). Отличия статистических весов различных изотопов в натурной и модельной системах не превышают 1%.

Приведенные на рис. 10 и 11 кривые иллюстрируют влияние дифференциальных эффектов на распределение энерговыделения и спектральные характеристики при моделировании на сборке нейтронно-физических свойств натурного реактора.

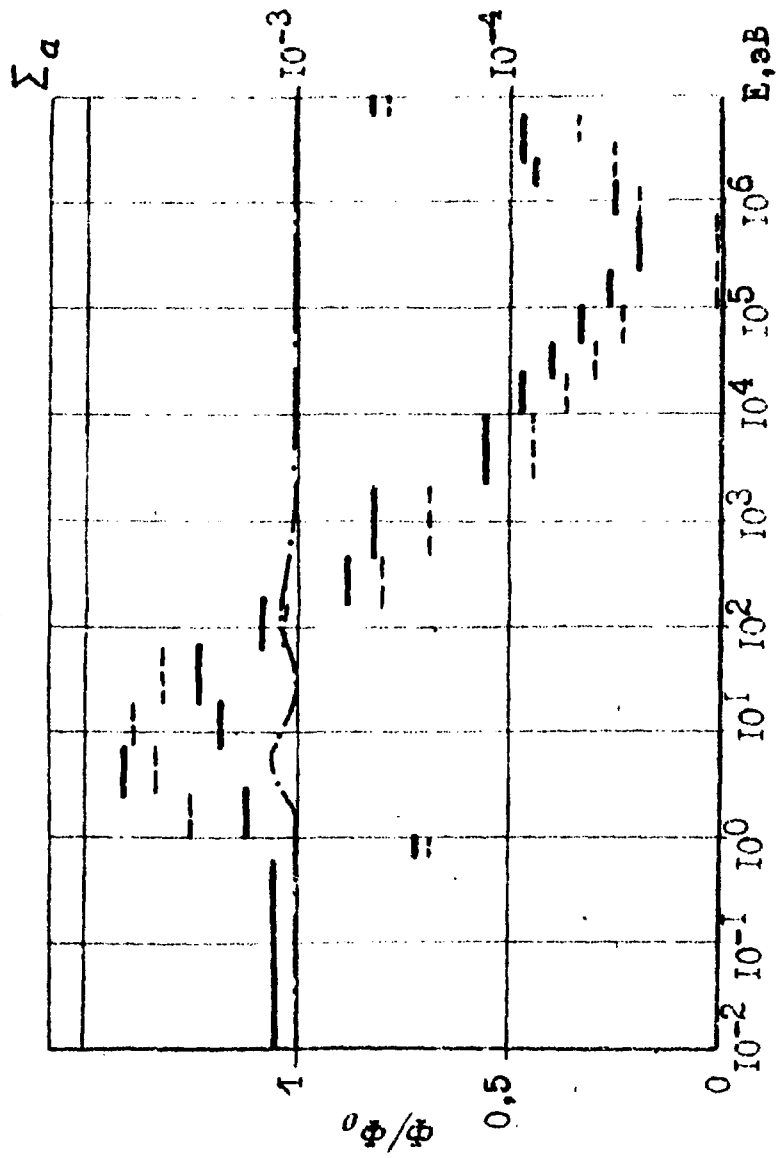


Рис. 9. Энергетическая зависимость сечений поглощения и отношения потоков нейтронов в модельной и натурной системах: — — — сечения поглощения в натурной системе; — — — сечения поглощения в модельной системе; — — — отношение потоков нейтронов в модельной и натурной системах  $\Phi_0/\Phi$

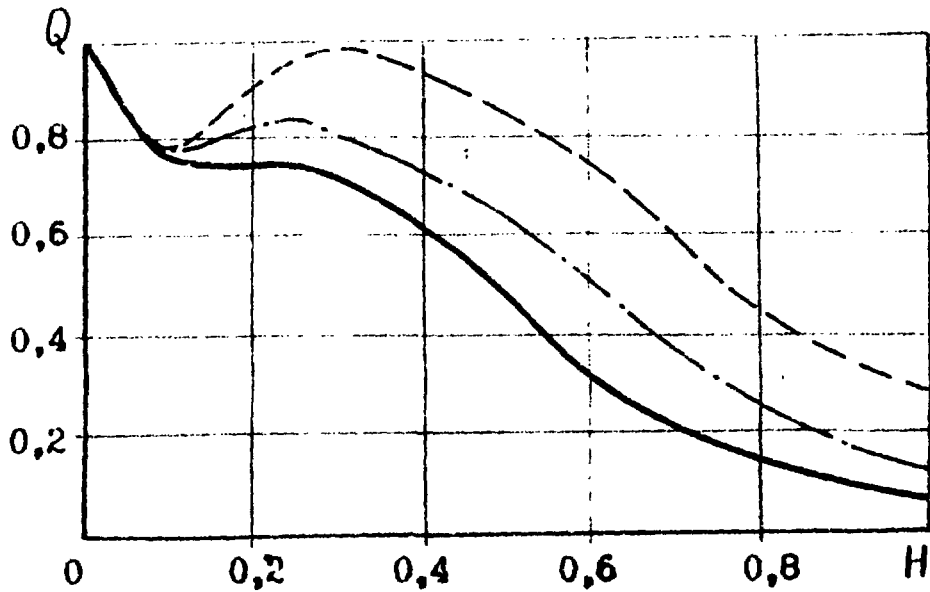


Рис. 10. Распределение энерговыделения по высоте активной зоны: - - - моделирование только делящихся свойств; - · - моделирование делящихся свойств и поглощения по закону  $1/v$  продуктов взаимодействия топлива с нейтронами; — — в натурной и предлагаемой модельной системах

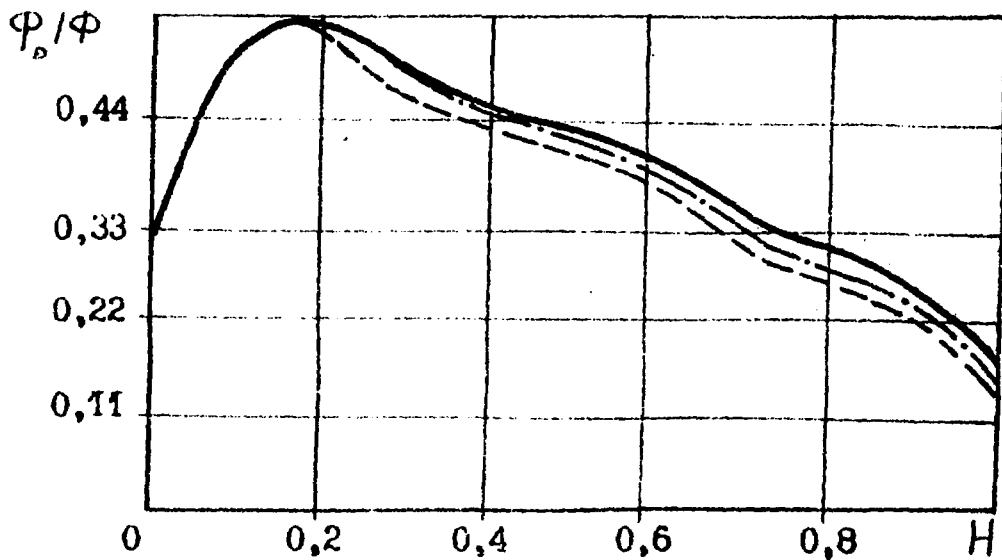


Рис. 11. Распределение отношения потоков резонансных и тепловых нейтронов по высоте активной зоны: - - - моделирование только делящихся свойств; - · - моделирование делящихся свойств и поглощения по закону  $1/v$  продуктов взаимодействия топлива с нейтронами; — — в натурной и предлагаемой модельной системах

## 6. ВЫВОДЫ

1. С учетом рассмотренных особенностей нейтронно-физических свойств ВТГР сформулированы основные принципы моделирования ВТГР, обеспечивающие близость нейтронно-физических характеристик натурной и модельной систем.

2. Показана возможность моделирования выгорания топлива с помощью традиционно применяемых на сборках изотопов.

3. Расчетно обоснована возможность осуществить на сборках широкую вариацию нейтронно-физических параметров и близость их к исследуемым ВТГР с помощью следующих типов элементов:

— топливного, содержащего гомогенную смесь замедлителя и топлива с максимальным из исследуемого диапазона обогащения по урану-235;

— топливного, содержащего гомогенную смесь замедлителя и топлива естественного состава;

— графитового;

— содержащего естественный бор.

## Список литературы

1. Askew J.R. et al. A general description of the lattice code WIMS. — BNES, 1966, v. 5, № 4, p. 564.
2. Гольцев А.О., Карпов В.А. НЕКТАР — программа расчета физических характеристик графитовых реакторов с учетом термализации нейтронов и выгорания топлива. Препринт ИАЭ-2795. М., 1977.
3. Каминский А.С., Майоров Л.В. Программа расчета пространственно-энергетического распределения медленных нейтронов в системах с произвольной геометрией (PIT). Препринт ИАЭ-2777. М., 1977.
4. Алексеев П.Н., Зарицкий С.М., Усачев Л.Н., Шишков Л.К. Комплекс программ ТВК-2Д. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1983, вып. 4 (33), с. 32 — 35.
5. Комаров Е.В. и др. Атомная энерготехнологическая установка ВГ-400. Возможные конструкции активной зоны. — Атомная энергия, 1979, т. 47, вып. 2, с. 79 — 83.
6. Богомолов А.М., Каминский А.С., Молодцов А.Д. и др. Основные характеристики критического стэнда ГРОГ и задачи изучения физики ВТГР. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомная энергетика и технология, 1981, вып. 3 (10), с. 17 — 21.

Редактор Л.И. Кирюхина  
Технический редактор Н.И. Мазаева  
Корректор Г.Я. Кармадонова

Т-17325. 29.07.83. Формат 60x90/16. Уч.-изд.л. 1,4  
Тираж 145. Индекс 3624. Заказ 331

Отпечатано в ИАЗ

