



ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ



*Сегодня: пятница, 18
апреля 2014 г.*

Содержание.

- 1. Самоподдерживающаяся цепная реакция деления.**
- 2. Критическая масса ядерных делящихся материалов.**
- 3. Коэффициент размножения в бесконечной системе.**
- 4. Эффективный коэффициент размножения.**



ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ



*Сегодня: пятница, 18
апреля 2014 г.*

Содержание.

4. Ядерный реактор. Общие сведения. Принцип работы.
5. Классификация ядерных реакторов.
6. Реакторы на тепловых нейтронах. Конструкция. Нейтронно-физические особенности.
7. Реакторы на быстрых нейтронах. Конструкция. Нейтронно-физические особенности.

1. Самоподдерживающиеся цепная реакция деления

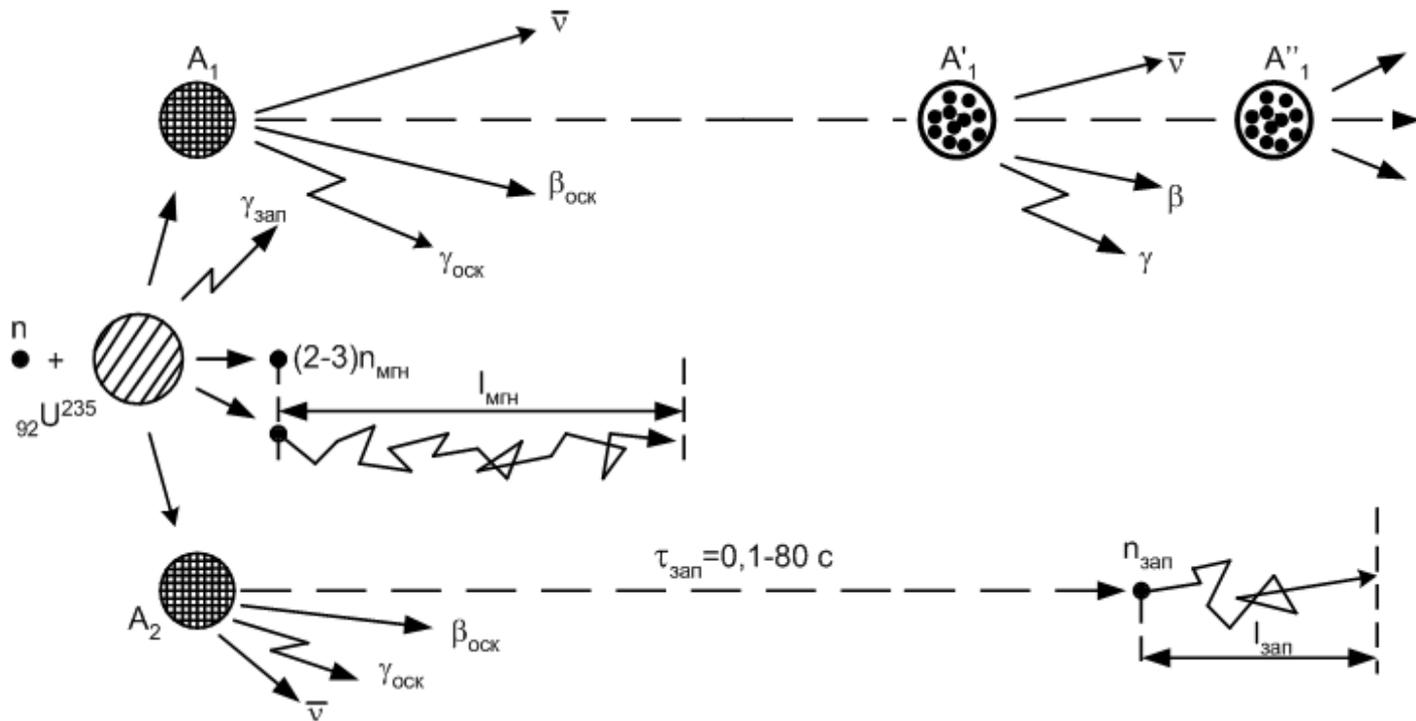


Рис. 1. Схема деления ядра урана

1. Самоподдерживающиеся цепная реакция деления



Табл. 1. Энергетические баланс деления, МэВ.

Продукты деления	U^{235}	Pu^{239}
1. Кинетическая энергия осколков деления	166,0	171,5
2. Кинетическая энергия нейтронов деления	4,9	5,8
3. Энергия мгновенных γ -квантов	7,2	7,0
4. Энергия γ -квантов из продуктов деления	7,2	7,0
5. Кинетическая энергия β -излучения осколков	9,0	9,0
6. Энергия антинейтрино	10,0	10,0
Итого:	204,3	210,3

1. Самоподдерживающиеся цепная реакция деления

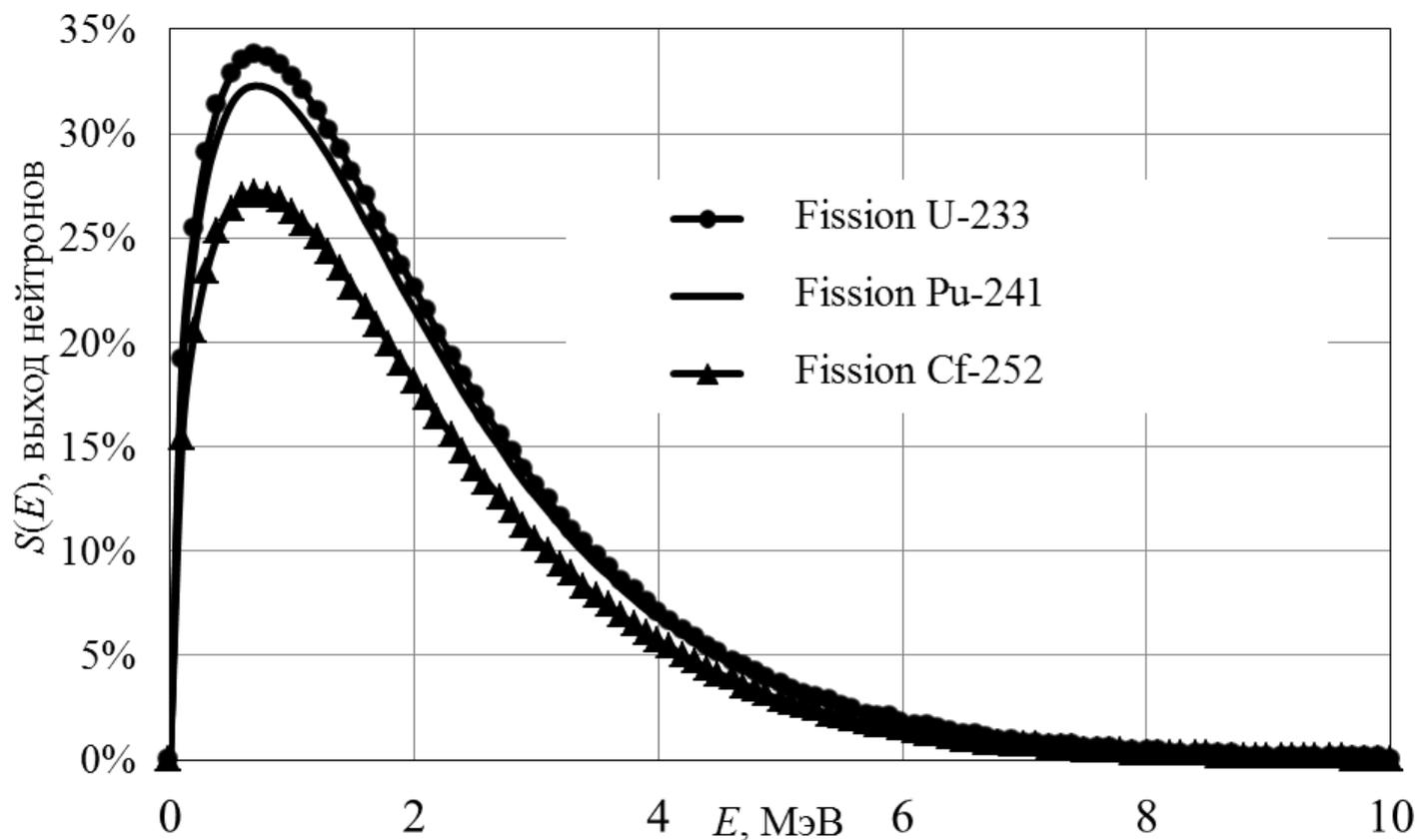


Рис. 2. Спектр нейтронов деления делящихся нуклидов

1. Самоподдерживающиеся цепная реакция деления



Закон изменения числа нейтронов в размножающей системе с течением времени t :

$$\nu_f \rightarrow \nu_f^2 \rightarrow \dots \rightarrow \nu_f^n \rightarrow \dots$$

$$N_n = \nu_f^n \qquad N_n(t) = \nu_f^{t/l}.$$

l – время жизни одного поколения нейтронов, с.

Записать этот закон в экспоненциальной форме.

Самоподдерживающаяся цепная реакция деления



- Самоподдерживающейся ЦРД называется незатухающий процесс деления тяжелых нуклидов, в котором каждое последующее деление вызывается нейтронами, полученными при предыдущих делениях.
- Условие протекания СЦРД :
 1. Хотя бы один из ν_f получаемых в акте деления нейтронов обязательно должен вызывать следующее деление нового ядра урана.
 2. Остальные $(\nu_f - 1)$ нейтроны должны быть исключены из процесса деления ядер.

2. Критическая масса ядерных делящихся материалов



- Табл. 2. Критические массы и размеры делящихся веществ.

Материал	$m_{кр}$, кг	$R_{кр}$, см
^{233}U	16	6
^{235}U	48	8,5
^{239}Pu	17	6

2. Критическая масса ядерных делящихся материалов



- **Табл. 4.** Критические массы и размеры делящихся веществ.

Критический параметр	^{235}U	^{233}U	^{239}Pu
Масса сферы, кг	22,8	7,5	5,6
Диаметр бесконечного цилиндра, см	7,8	4,8	4,3
Толщина бесконечной пластины, см	1,5	0,7	0,6

2. Критическая масса ядерных делящихся материалов



Табл. 3. Сечения делящихся нуклидов при $E_n=0,025$ эВ, бн

Нуклид	$\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma$	σ_f
^{233}U	575	530
^{235}U	680	584
^{239}Pu	1011	744
^{238}U	2,7	0
$\text{U}_{\text{ест}}$	7,55	4,17

Табл. 4 Сечение ^{238}U и ^{235}U при $E_n=2$ МэВ, бн

Парциальное сечение	^{238}U	^{235}U
σ_f	0,57	1,32
σ_γ	0,03	0,05
σ_{in}	2,30	1,80
σ_{el}	4,30	7,38
σ_{tot}	7,20	10,55

2. Критическая масса ядерных делящихся материалов

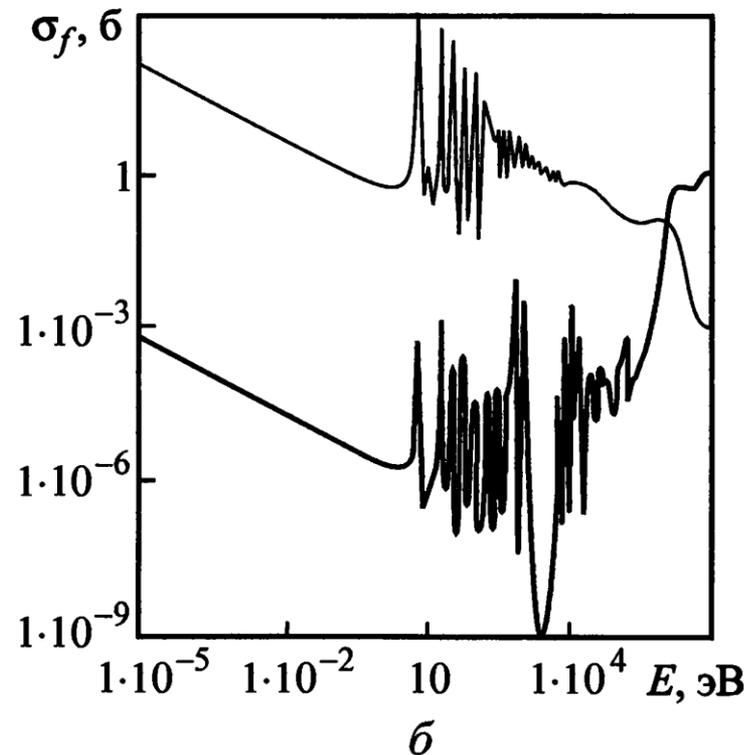
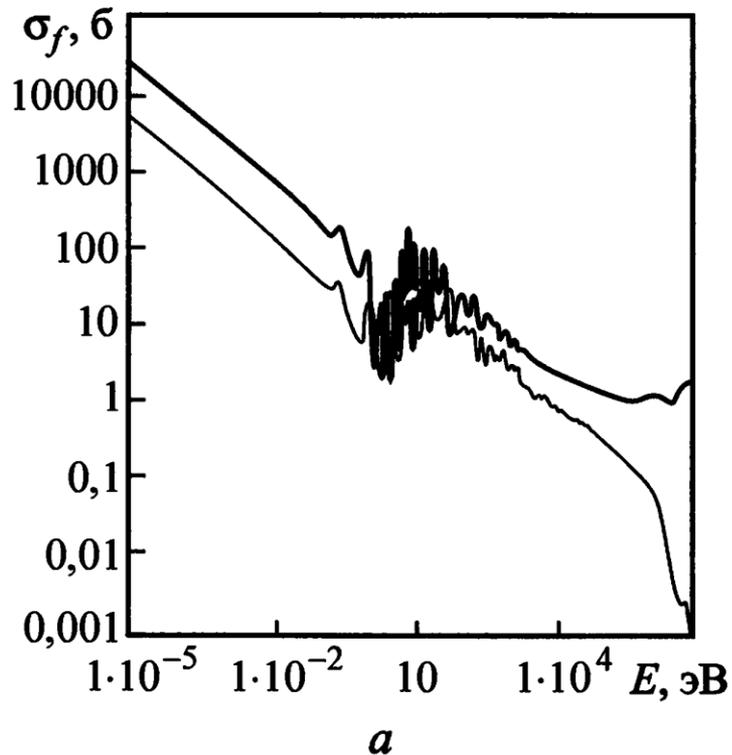


Рис. 3. Зависимость микро сечений реакций деления (—) и радиационного захвата (—) для ядер урана ^{235}U (*a*) и ^{238}U (*б*)

2. Критическая масса ядерных делящихся материалов



- Создание более благоприятных условий для самоподдерживающейся цепной реакции возможно если:
 1. Увеличить макроскопическое сечение деления Σ_f .
 2. Увеличить концентрацию нейтронов в системе за счет снижения потери нейтронов на основе минимизации паразитного поглощения нейтронов материалами среды и утечки нейтронов из системы (реактора).

3. Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде



Важнейшей характеристикой цепной реакции деления служит *коэффициент размножения нейтронов* в бесконечной среде k_∞ :

$$k_\infty = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 \pm \Delta n}{n_1} 1 \pm \frac{\Delta n}{n_1} = 1 \pm \delta k_\infty.$$

$\pm \Delta n = n_2 - n_1$ - изменения количества нейтронов (делений) в очередном поколении.

$\delta k_\infty = k_\infty - 1$ - избыточный коэффициент размножения).

3. Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде



Эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{эфф}$:

$$k_{эфф} = k_{\infty} \cdot P,$$

где P – вероятности для нейтрона избежать утечки в процессе замедления и диффузии.

Если $k_{эфф} > 1$, то число нейтронов в системе непрерывно возрастает; $k_{эфф} = 1$, число нейтронов в каждом последующем поколении остается неизменным; $k_{эфф} < 1$, реакция с течением времени затухает.

4. Ядерный реактор. Общие сведения. Принцип работы



- *Энергетическим ядерным реактором* называют аппарат, в котором осуществляется управляемая СЦРД, выделяющаяся при этом энергия превращается в тепловую энергию и отводится из активной зоны реактора с помощью теплоносителя.
- Первая *критическая сборка*, названная *ядерным реактором*, была построена в 1942 году под руководством Э. Ферми на территории Чикагского университета.

Ядерный реактор. Общие сведения. Принцип работы



- Для реализации СЦРД необходимы следующие *ядерные материалы*: ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{232}Th и *нейтроны*.
- *Ядерными материалами* называют материалы, содержащие *делящиеся вещества* или вещества способные их воспроизвести.
- *Делящиеся ядерные материалы* (делящиеся вещества, делящиеся нуклиды) – материалы, способные делиться спонтанно или вынужденно, а также при определенных условиях способны образовывать **критическую массу**.

4. Ядерный реактор. Общие сведения. Принцип работы

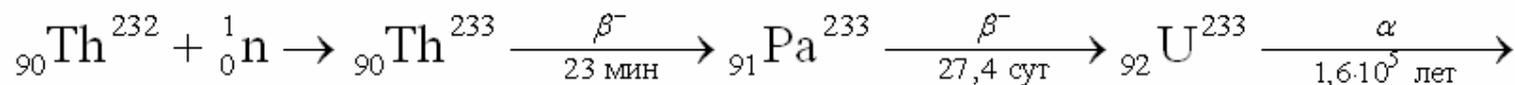
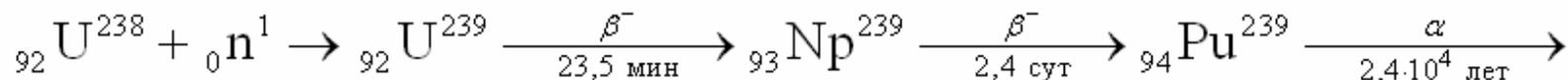


- *Делящиеся ядерные материалы* – четно-нечетные нуклиды (^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu), способные к беспороговому делению. Их называют так же *ядерным горючим*.
- Четно-четные нуклиды (^{238}U , ^{232}Th) – тепловыми нейтронами не делятся и являются **сырьевыми нуклидами**.
- *Природный уран* состоит из трех изотопов: ^{238}U , ^{235}U и ^{234}U (99,28; 0,714 и 0,00548 % соответственно).

4. Ядерный реактор. Общие сведения. Принцип работы



- В любом ядерном реакторе, в топливе которого содержится ^{238}U и ^{232}Th , будет возникать ^{233}U , ^{239}Pu :



^{235}U – является первичным ядерным горючим;

^{233}U , ^{239}Pu – вторичным ядерным горючим.



4. Ядерный реактор. Общие сведения. Принцип работы



- *Ядерное горючее* – это делящиеся нуклиды (о них мы говорили выше).
- *Ядерное топливо* – это матрица из неделящегося вещества, содержащая в себе делящиеся нуклиды.
- $(U,Pu)O_2$ – *смешанное оксидное топливо (mixed oxide – MOX-топливо)*.
- Оксидное, мононитридное, монокарбидное ЯТ – UO_2 , UC, UN.
- $(U,Pu)N$, $(U,Pu)C$ – смешанное карбидное, нитридное топливо.
- **Теплофизические характеристики ЯТ – самостоятельно.**

4. Ядерный реактор. Общие сведения. Принцип работы

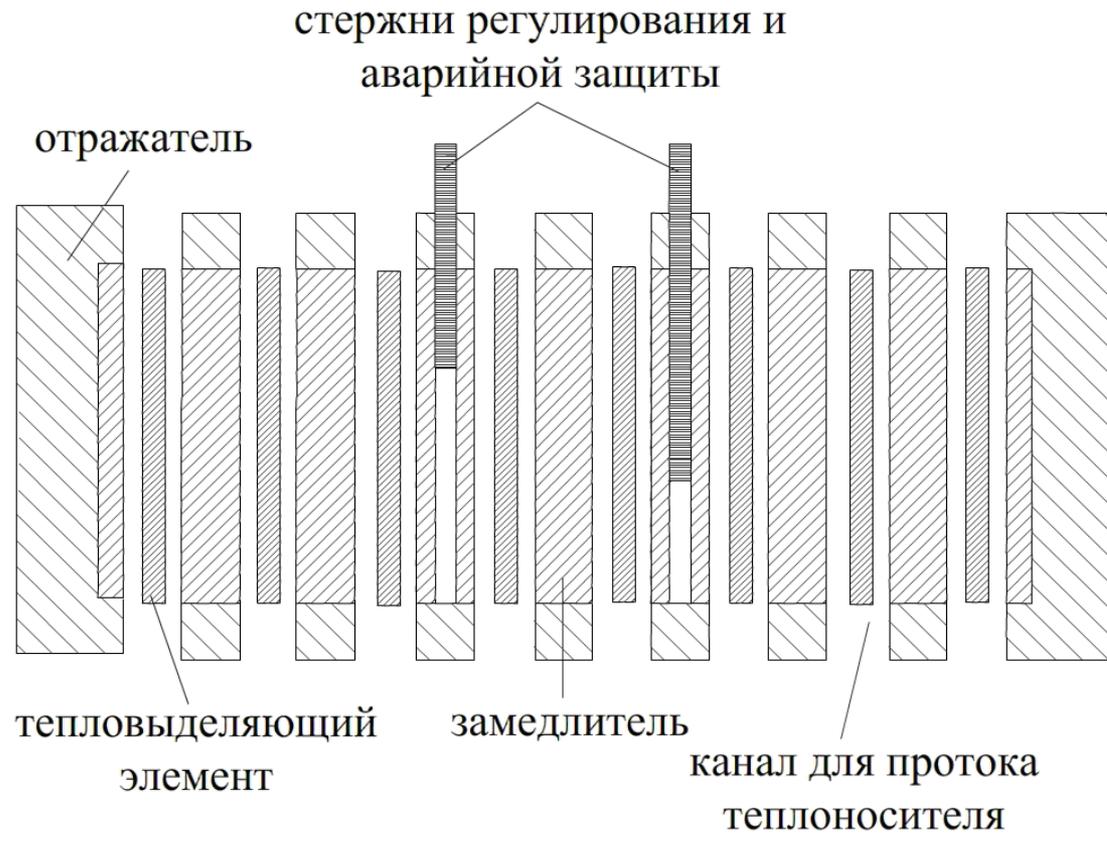


Рис. 4. Схема активной зоны гетерогенного ядерного реактора

4. Ядерный реактор. Общие сведения. Принцип работы

1. Топливный сердечник.
2. Фиксатор топлива.
3. Трубчатая оболочка.
4. Нижняя концевая заглушка.
5. Верхняя концевая заглушка.
6. Нижний сварочный шов.
7. Верхний сварочный шов.

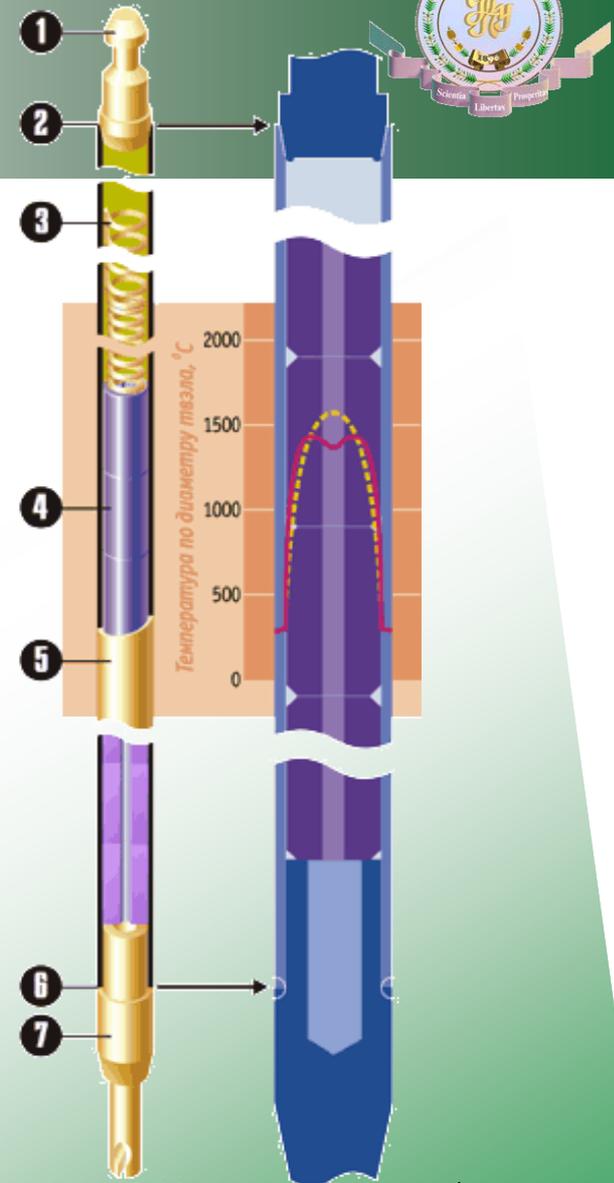


Рис. 5. Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ)

4. Ядерный реактор. Общие сведения. Принцип работы



Рис. 6. Тепловыделяющая сборка (ТВС) реактора ВВЭР–1000.

4. Ядерный реактор. Общие сведения. Принцип работы

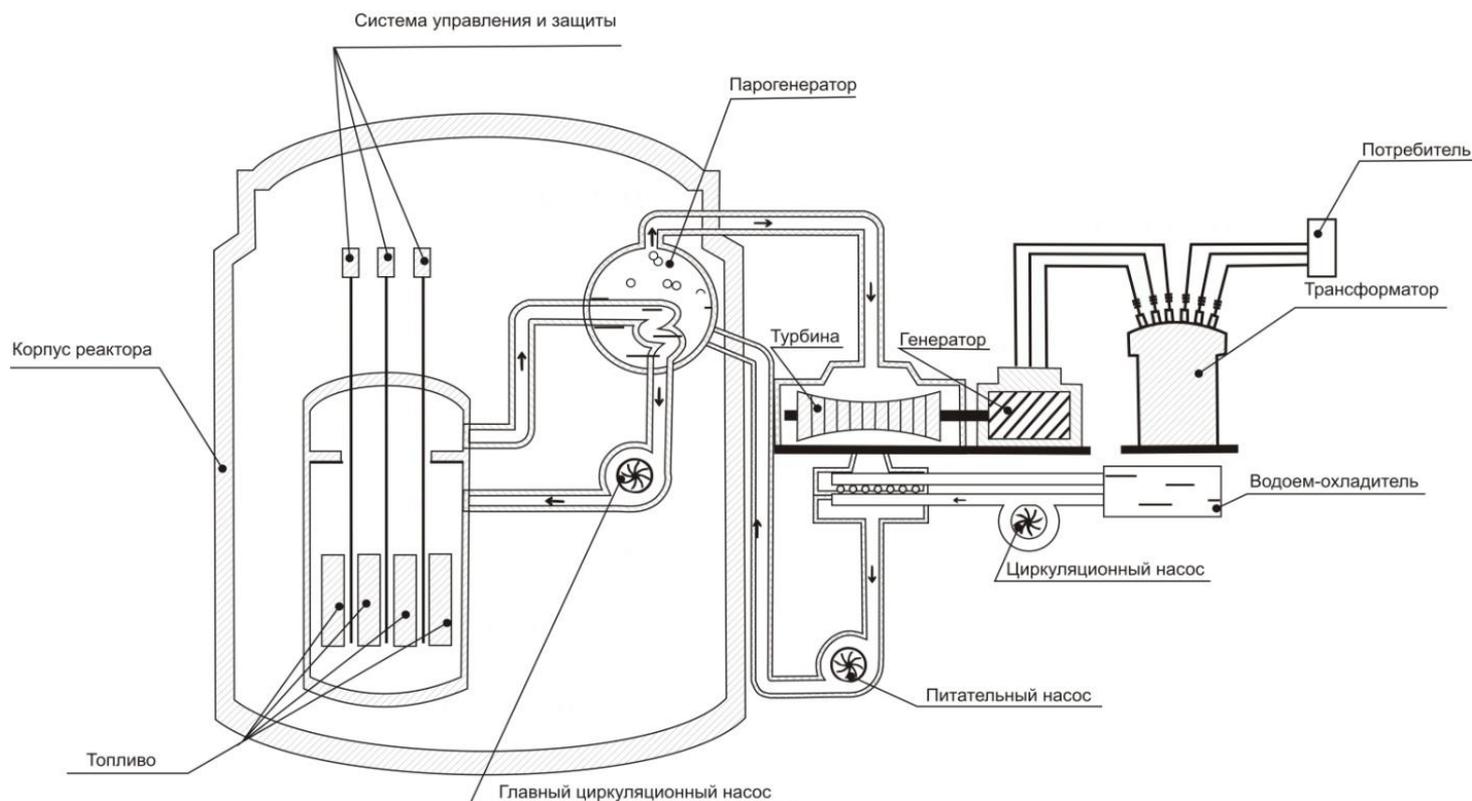


Рис. 7. Схема ядерного энергоблока реактора ВВЭР–1000.

5. Классификация реакторов



- По физическим признакам различают реакторы:

1. На *быстрых нейтронах* со средней энергией $E < 100$ кэВ;

2. На *промежуточных нейтронах* (1 эВ $< E < 10$ кэВ);

3. На *тепловых нейтронах* ($E = kT$).

5. Классификация реакторов



Реакторы часто классифицируют по роду замедлителя: водяные, графитовые, тяжеловодные, бериллиевые.

или по *роду теплоносителя*: кипящие, газовые, натриевые, свинцовые.

Классификация по материалу замедлителя:

- с природной водой H_2O ; с тяжелой водой D_2O .

5. Классификация реакторов



Классификация по материалу замедлителя:

- водо-водяные реакторы: ВВЭР, РWR, водо-водяные реакторы с кипящей водой - РБМК, ВВРК, ВWR.
- Реакторы на тяжелой воде называют **тяжеловодными**. Водо-водяной ядерный реактор (CANDU).
- Реакторы с графитовым замедлителем и газовым/водяным теплоносителем называются соответственно **газо-графитовыми (AGR)** и **графитоводяными (РБМК)**.

5. Классификация реакторов



Классификация по *роду теплоносителя*: водяные, кипящие, газовые, с жидкометаллическим теплоносителем.

- реакторы с водяным теплоносителем: **H₂O, D₂O**;
- реакторы с газовым теплоносителем: **углекислый газ, воздух, азот, гелий**;
- реакторы с жидко-металлическим теплоносителем: **свинец (реактор БРЭСТ), натрий (реакторы на быстрых нейтронах РБН), калий, литий и эвтектика (Na, K)**.

5. Классификация реакторов



- Реакторы на тяжелой воде называют **тяжеловодными**. **Водо-водяной ядерный реактор (CANDU)**.
- Реакторы с графитовым замедлителем и газовым/водяным теплоносителем называются соответственно **газо-графитовыми (AGR)** и **графитоводяными (РБМК)**.

5. Классификация реакторов



По назначению различают реакторы:

1. исследовательские реакторы;
2. промышленные реакторы;
3. энергетические реакторы;
4. реакторы для транспортных двигателей;
5. реакторы для медицинских целей;
6. и другие.



5. РЕАКТОРЫ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

Классификация по **конструкционно-схемным** признакам:

- **корпусные,**
- **канальные,**
- **с гомогенной или гетерогенной активной зоной.**

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



- *Активная зона* энергетического ядерного реактора (АЗ ЯЭР) - это та часть объёма ЯР, в которой конструктивно организованы условия для осуществления непрерывной СЦРД ядерного топлива и отвода тепла с помощью теплоносителя.
- *Ядерное топливо.* Основной характеристикой ядерного топлива является его начальное обогащение (C_5), под которым понимается *доля (или процентное содержание) ядер ^{235}U среди всех ядер урана.*

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



- Если в ЯР используется уран, обогащенный до величины C_5 , тогда обогащение равно:

$$C_5 = \frac{N_5}{N_U}.$$

- где N_U - концентрация урана в объеме топливной композиции, с учетом ее разбавления другими элементами.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ

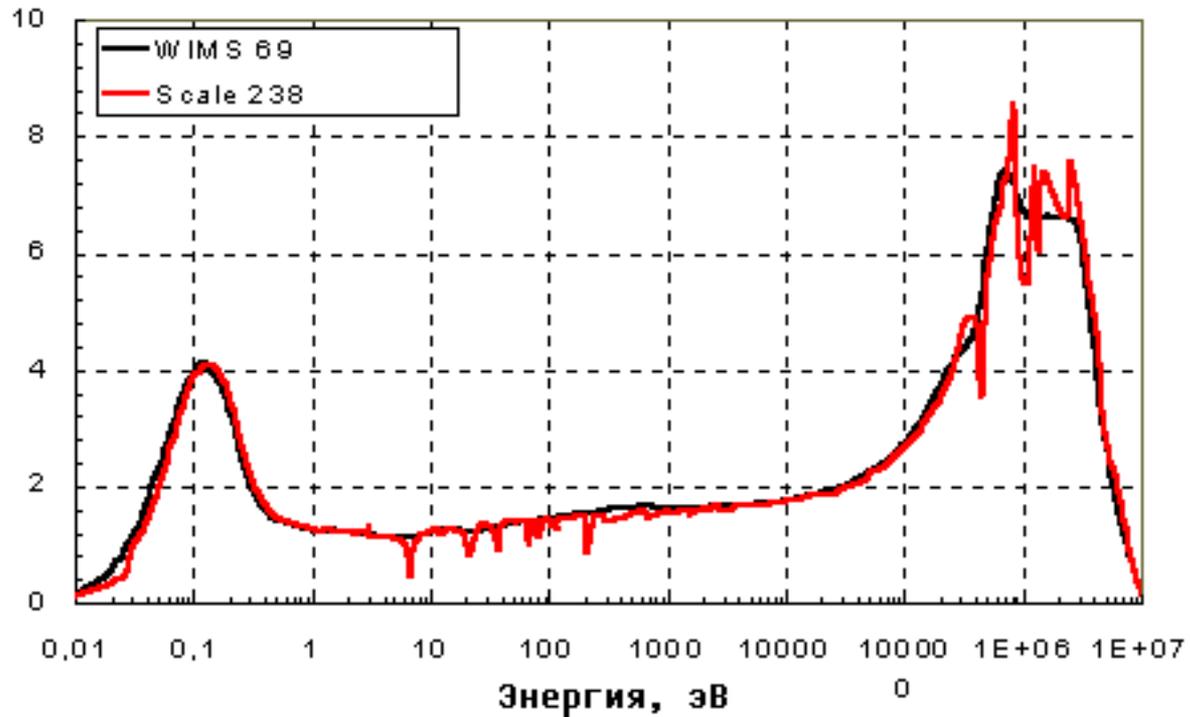


- В тепловых ЯР АЭС используется уран низкого обогащения от 1,8 % до 5,0 %.
- Наиболее распространенной топливной композицией в энергетических ЯР АЭС является *диоксид урана* UO_2
- Температура плавления диоксида ($2800\text{ }^{\circ}\text{C}$) и рабочая температура до $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ А3 ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



Нормированный
поток нейтронов



Спектр потока нейтронов АЗ теплового реактора, рассчитанный с помощью SCALE и WIMS

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ А3 ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



Замедлитель.

- обладает высокими замедляющими свойствами;
- имеет малое макросечение поглощения тепловых и резонансных нейтронов.
- в АЗ замедлитель должен обладать:
 - химической, термической и радиационной стойкостью;
 - не иметь при радиационном захвате таких дочерних продуктов, которые являлись бы более сильными поглотителями нейтронов.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



- **Реакторный теплоноситель** - это жидкое или газообразное вещество, предназначенное для отвода генерируемого в реакторе тепла с целью его дальнейшего использования.
- К теплоносителю предъявляется те же нейтронно-физические требования, что и к замедлителю.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



- К теплоносителю предъявляются «обычные» теплофизические требования:
- высокая удельная теплоёмкость c_p при рабочих температурах;
- малый коэффициент динамической вязкости теплоносителя μ_T при рабочих средних температурах в активной зоне;
- высокий коэффициент теплопроводности теплоносителя λ_T

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



СТРУКТУРА АЗ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЯР

Основной конструктивный элемент гетерогенной АЗ энергетических ЯР является ТВЭЛ:

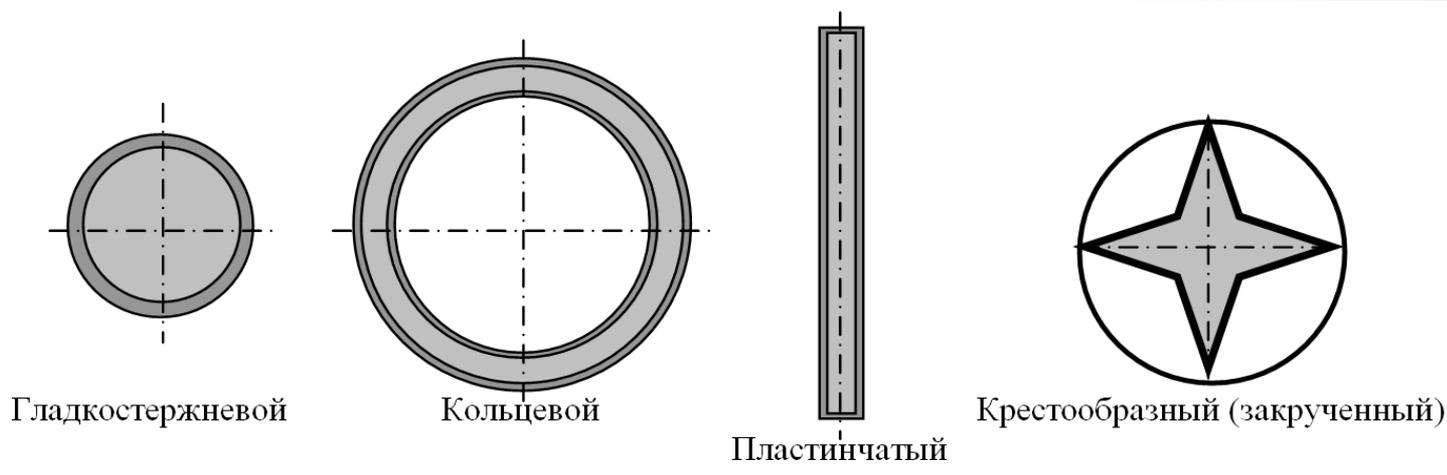


Рис. 8. ТВЭЛ различной геометрической формы

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



СТРУКТУРА АЗ ГЕТЕРОГЕННЫХ ЯР

ТВЭЛы объединяют в более крупные конструктивные узлы – *тепловыделяющие сборки (ТВС)*.

Каждая ТВС представляет собой некоторое определённое количество дистанционированных ТВЭЛ.

ТВС энергетических реакторов могут быть *кожуховыми и бескожуховыми*.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ

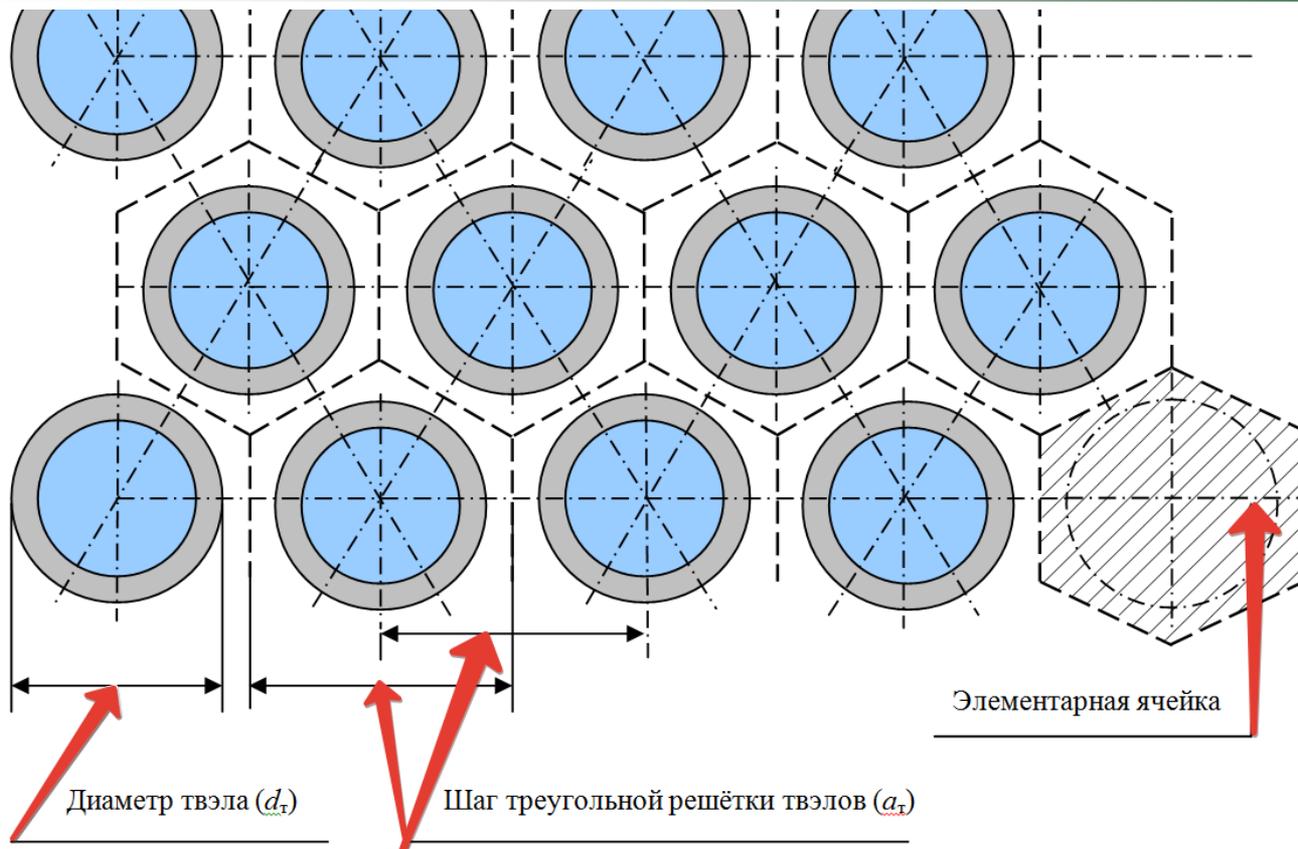


Рис. 9. Регулярная структура треугольной решётки твэл в ТВС реакторы типа ВВЭР

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



Параметр	3-х годичная кампания	4-х годичная кампания
Длина, мм	3837	3842
Длина топливного сердечника, мм	3530	
Наружный диаметр оболочки, мм	9,1	
Толщина стенки оболочки, не менее, мм	0,63	
Материал оболочки	Zr+1%Nb	
Топливо	Таблетки из UO_2 с центральным отверстием	Таблетки из $UO_2/UO_2+5\%Gd_2O_3$ с центральным отверстием
Диаметр отверстия таблетки, мм	2,35	1,5
Масса урана в топливе, г	1270	1386/1292
Обогащение топлива при перегрузках, %	1,6; 3,3; 3,6; 4,4	3,0; 3,6; 4,0; 4,4/3,3
Фиксатор топливного сердечника	Пружина из хромоникелевого сплава	
Нижний сварной шов	Электронно-лучевая сварка	
Верхний сварной шов	Контактно-стыковая сварка	

Рис. 9.1. ТВС для ВВЭР-1000

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ

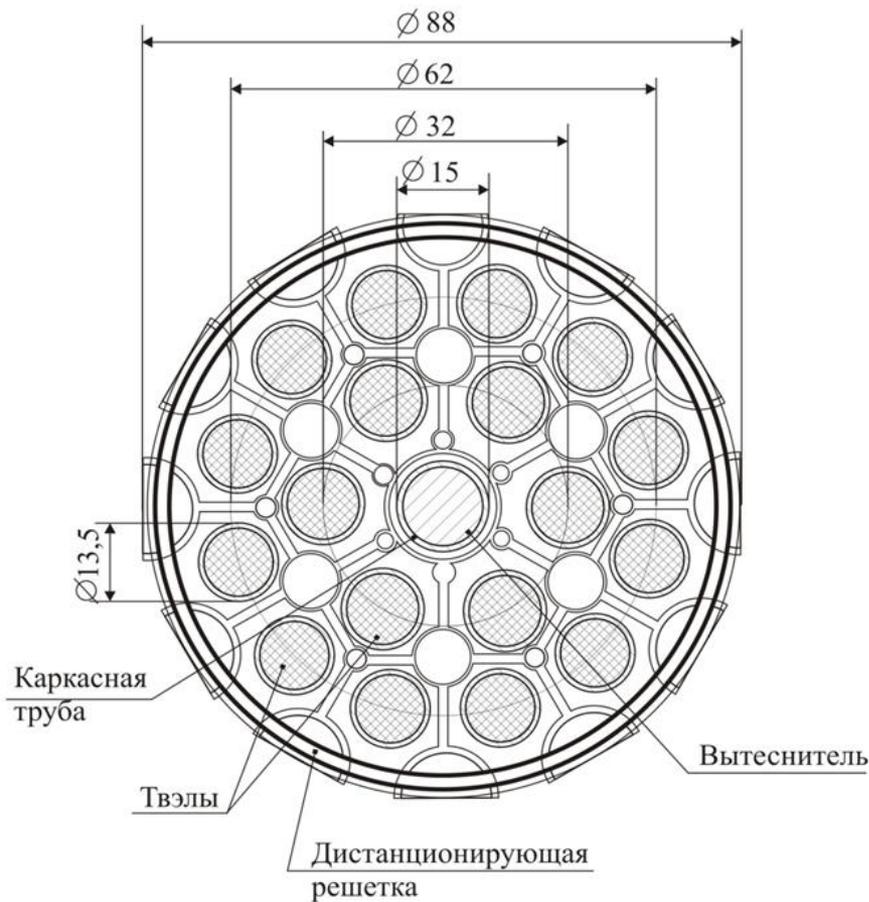
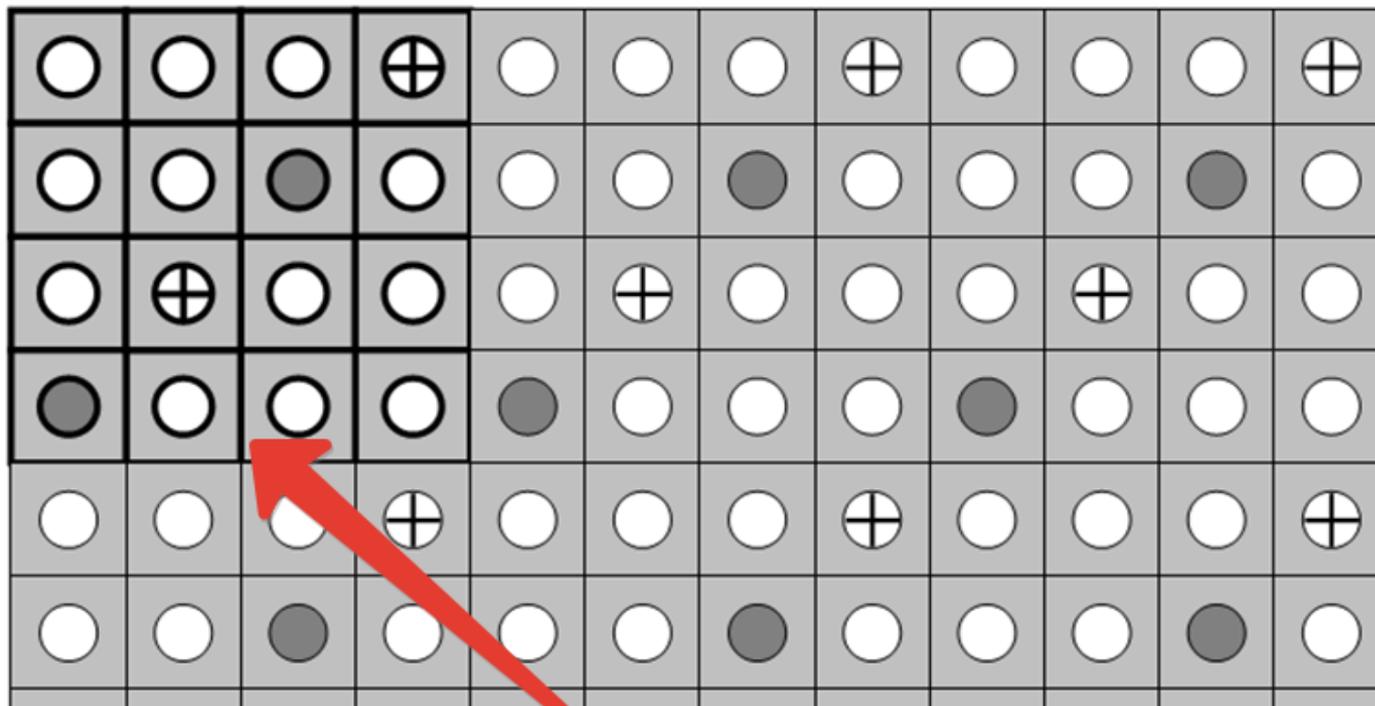


Рис. 10. Поперечное сечение ТВС реактора РБМК-1000.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



Полиячейка

Рис. 11. Участок поперечного сечения активной зоны реактора РБМК-1000.

5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ АЗ ТЕПЛОВЫХ РЕАКТОРОВ



Характеристики	Значения характеристик для реакторов		
	ВВЭР-440	ВВЭР-1000	РБМК-1000
1. Тип твэлов	Цилиндрический	Цилиндрический	Цилиндрический
2. Наружный диаметр твэла, мм	9.1	9.1	13.6
3. Толщина оболочки твэла, мм	0.65	0.65	0.85
4. Материал оболочки твэлов	сплав <u>Zr + 1% Nb</u>	сплав <u>Zr + 1% Nb</u>	сплав <u>Zr + 1% Nb</u>
5. Топливная композиция	диоксид UO_2	диоксид UO_2	диоксид UO_2
6. Диаметр топливной таблетки, мм	7.6	7.6	11.5
7. Обогащение топлива, %	3.3	4.4	1.8 – 2.3
8. Тип решётки твэлов в ТВС	Треугольная	Треугольная	-
9. Шаг решётки твэлов в ТВС, мм	12.2	12.75	-
10. Число твэлов в одной ТВС, шт.	126	312	18
11. Тип решётки ТВС в активной зоне	Треугольная	Треугольная	Квадратная
12. Шаг решётки ТВС, мм	147	236	250
13. Тип ТВС	Кожуховая	Бескожуховая	Бескожуховая
14. Форма кожуха	Шестигранная	-	-
15. Число ТВС в активной зоне	349	163	1693

Табл. 5
Некоторые характеристики гетерогенных структур реакторов типа ВВЭР и РБМК.

6. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АЗ ЯР С ПОМОЩЬЮ ППП SCALE 5/0

MOX Fuel

Fuel Type:

Heavy Metal (g): (Pu + U + Am)

% (Pu + Am) / Heavy Metal:

% Am / (Pu + Am):

Burnup (MWd/MTHM):

Cycles:

Libraries: Per Cycle

Cooling Time:

Moderator Density (g/cc):

Reference Date:

Loading Date:

Power History

100% Up

Average Power: MW/MTU

Heavy Metal Distribution

Wt % Grams

Name	Isotope	Total
Pu	238	
	239	60
	240	30
	241	10
	242	
U	234	
	235	0.2
	236	
	238	99.8

Рис. 12. Главное окно программы Scale 5.0 (MOX Express Form)

6. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АЗ ЯР С ПОМОЩЬЮ ППП SCALE 5/0

Heavy Metal Distribution

Wt % Grams

Name	Isotope	Total
Pu	238	
	239	60
	240	30
	241	10
	242	
U	234	
	235	0.2
	236	
	238	99.8

Heavy Metal Distribution

Wt % Grams

Name	Isotope	Total
Pu	238	
	239	1.84992e+006
	240	924960
	241	308320
	242	
U	234	
	235	125034
	236	
	238	6.23918e+007
Am	241	

Рис. 13. Панель “The heavy metal distribution”

6. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АЗ ЯР С ПОМОЩЬЮ ППП SCALE 5/0

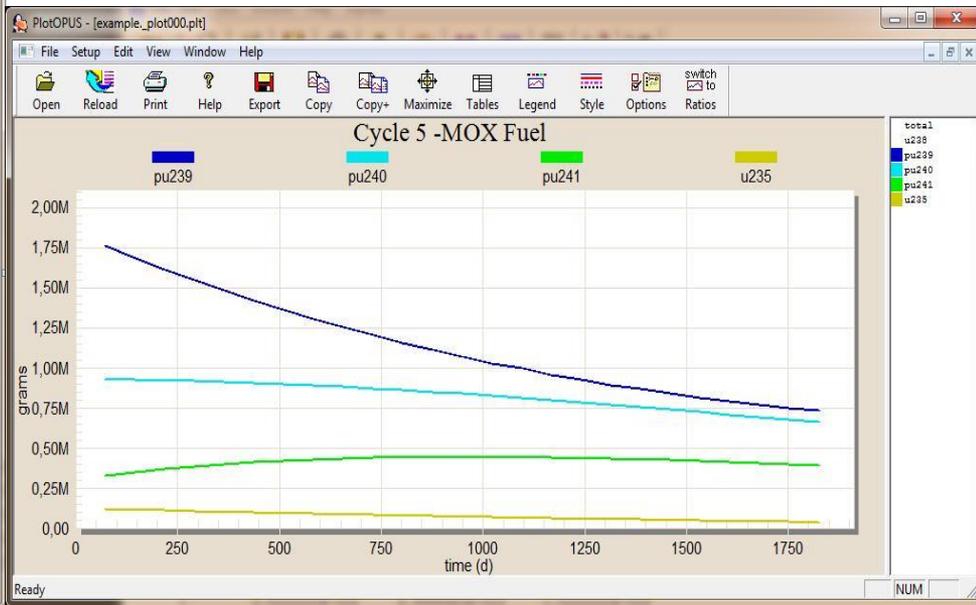
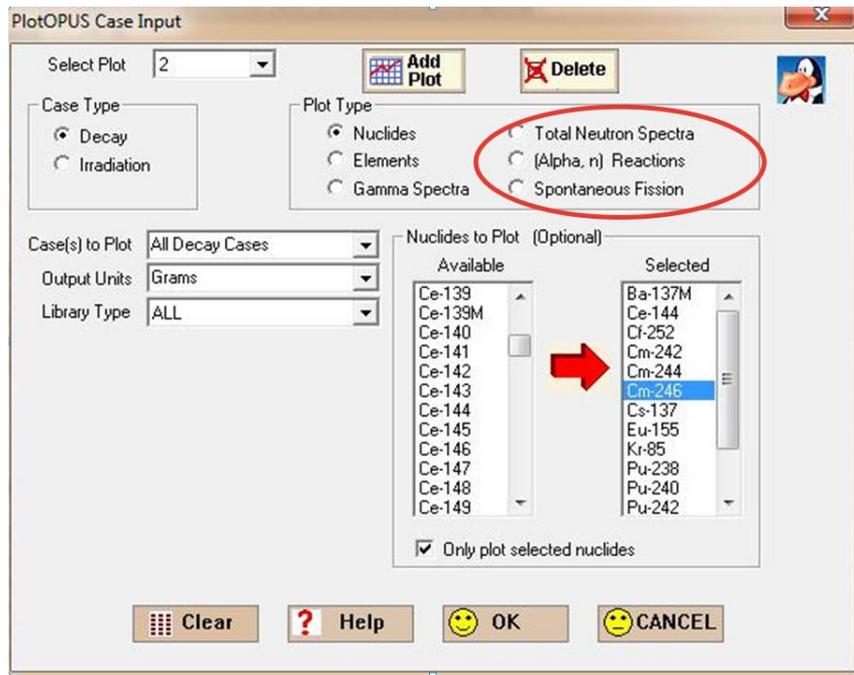


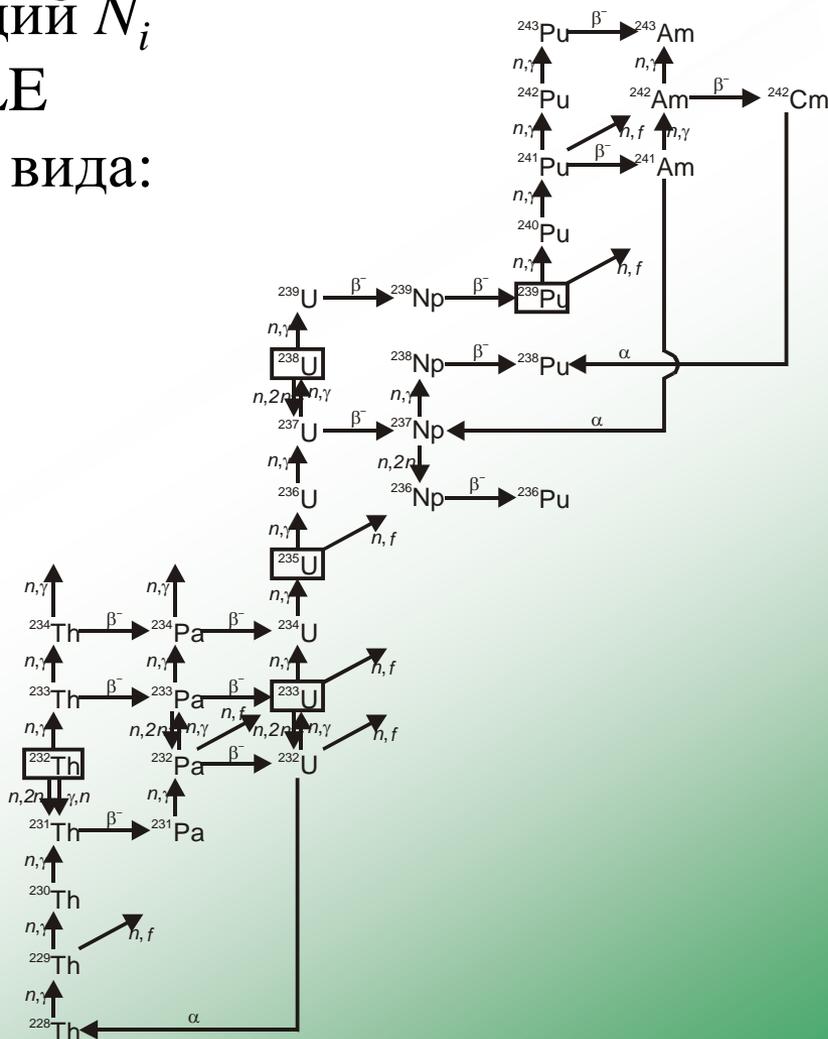
Рис. 14. Панель “Setup Plot”.

6. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АЗ ЯР С ПОМОЩЬЮ ППП SCALE 5/0

Накопление и убыль концентраций N_i нуклидов в ОЯТ решается SCALE посредством системы диф.ур-ов вида:

$$\frac{dN_i}{dt} = -\omega_i N_i + \sum_{j=i+1}^I \omega_{ji} N_{ji}$$

где $\omega_i = \lambda_i + \sigma_i \Phi$, $\omega_{ji} = \lambda_{ji} + \sigma_{ji} \Phi$, Φ — эффективная плотность потока нейтронов.



6. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АЗ ЯР С помощью ППП SCALE 5/0

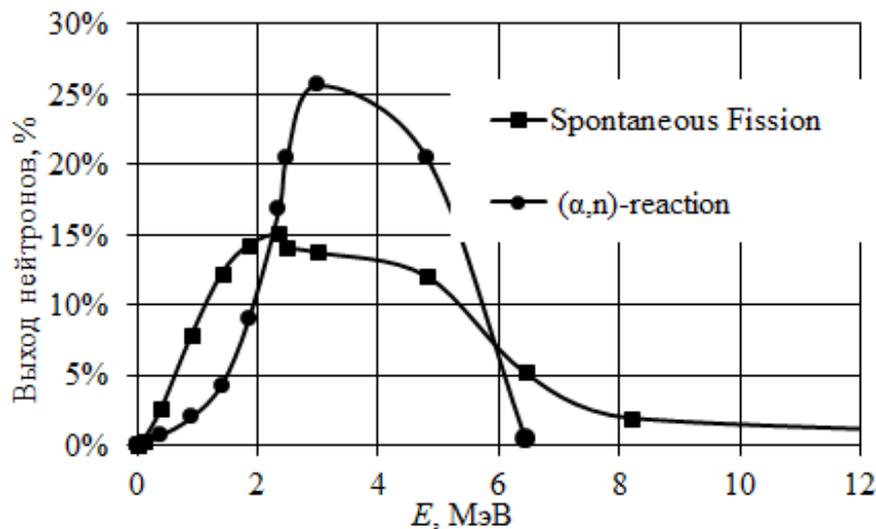


Рис. 15. Спектры нейтронов облученного штатного топлива теплового водородного реактора.

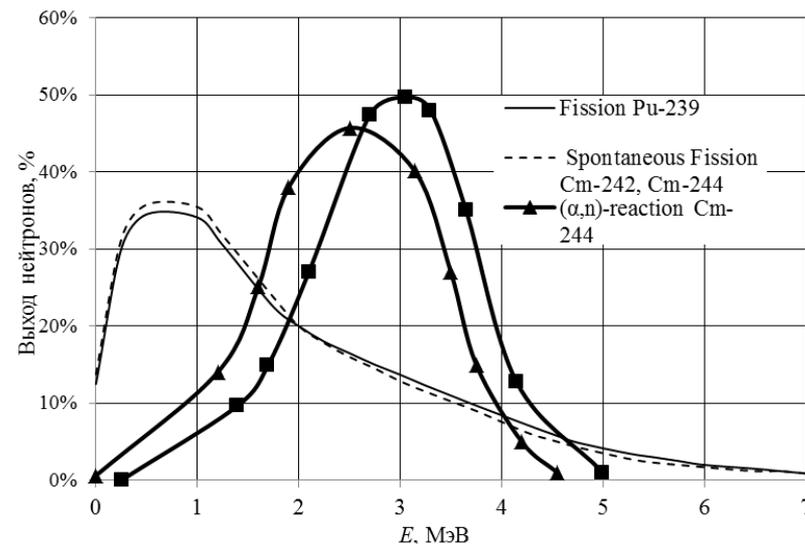


Рис. 16. Спектр нейтронного излучения облученной двуокиси плутония.

6. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ АЗ ЯЭУ С ПОМОЩЬЮ MSU-5/0



```
SU_95TH_2 — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
* физический модуль
PIN 1 0
TEMPR 300
**суммарный изотоп,изотопы не входящие в этот список рассчитываются по упрощенной схеме
SINOT
U235 U236 U238 TH32
PU39 PU40 PU41 PU42
CM42 CM44 CM46 CF52
XE35 SM49
SR90 Y90 RH06 CS34 CS37 BA CE44 PR144 KR SR90 SB25 EU54 EU55
H O ZR HE
**материальный состав ячейки
MATR 1 BUR=F
U235 1.089E-3 MODS=T BLOCK=4
U238 5.732E-5 MODS=T BLOCK=4
TH32 2.102E-2 MODS=T BLOCK=4
O 0.0459
MATR 2
HE 0.0048 MODS=G
MATR 3
ZR 0.043
MATR 4
H 0.0669 MODS=H2OK
O 0.0335
END
**управляющие параметры физ.модуля
NEUT 1
EGRC 1.0E+5, 1., 0.
FINISH конец физ.модуля
* геометрический модуль,геометрия ячейки
HEAD 1 0 500
CONT T T M M M M M M
HEX C 0,0,0 1.407,0,350
RCZ FU1 0,0,0 350 0.10
RCZ FU2 0,0,0 350 0.15
RCZ FU3 0,0,0 350 0.20
RCZ FU4 0,0,0 350 0.25
RCZ FU5 0,0,0 350 0.30
RCZ FU6 0,0,0 350 0.35
RCZ FU7 0,0,0 350 0.40
RCZ ZA 0,0,0 350 0.41
RCZ CL 0,0,0 350 0.475
END
**регистрационные зоны в ячейке
```

Метод суммарного изотопа

Материальный состав ячейки

Геометрический модуль

Рис. 17. Расчетный код, используемый программой MSU