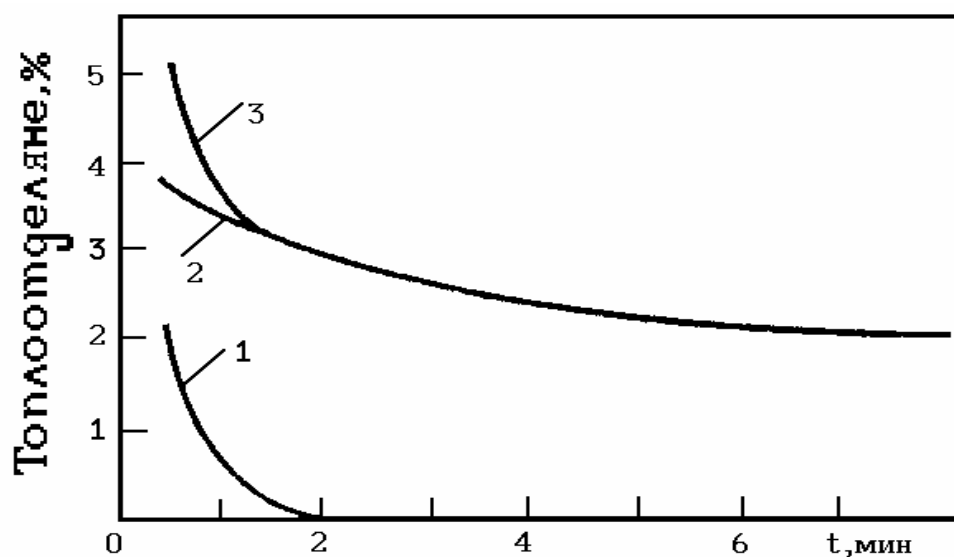


15. Остатъчно топлоотделяне в активната зона и на отработено ядрено гориво**1. Остатъчно топлоотделяне на ядреното гориво-причини**

След прекратяване на верижната реакция в ядрения реактор генерирането на топлина не спада до нула. Теплоотделянето в ядреното гориво продължава поради бета- и гама-излъчването на продуктите на делене и в много малка част от алфа-разпадането на натрупани трансуранови елементи. Остатъчното топлоотделяне спада с времето.

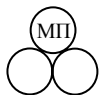
На Фиг.15.1 е представено топлоотделянето в ядрен реактор в проценти от номиналната мощност като функция на времето за първите няколко минути след прекратяването на верижната реакция (графиката е приблизителна). Крива 1 се дължи на генериране на топлина от закъсняващи неутрони, излъчени от някои продукти на делене, които в размножаваща среда предизвикват делене. Влиянието на закъсняващите неутрони в процеса на генериране на топлина се чувства в първите 1.5 - 2 минути след прекратяване на верижната реакция (крива 2).

За ^{235}U групата от закъсняващи неутрони с най-голямо средно време на живот от 80 s е с принос от около 3.5% от общия брой закъсняващи неутрони.



Фиг. 15.1. Спад на топлоотделянето след изключване на реактора. 1 - топлоотделяне от делене със закъсняващи неутрони, 2 - остатъчно топлоотделяне от бета-гама разпадане, 3 - сумарно топлоотделяне. На фигурата не е спазен мащабът по ординатата.

При бета-разпадането енергията изцяло се отделя в горивото или в стените на топлоотделящите елементи. При гама-разпадане над 95 % от гама-лъчите се поглъщат в



ядреното гориво или обвивката на топлоотделящия елемент, откъдето е бил излъчен гама-квантът, или в съседни ТОЕ, като само около 5 % се поглъщат в топлоносителя.

2.Методи за пресмятане на остатъчното топлоотделяне от ядрено гориво

Съществуват три подхода за пресмятане на остатъчно топлоотделяне от ядреното гориво на отделна касета или от активната зона:

- Използуване на алгоритми за пресмятане на кумулативния добив от всеки нуклид (продукти на делене, продукти на активация и трансурани) в процеса на работа на ядрения реактор и последващо пресмятане на отделяната енергия от разпадане от всеки нуклид като функция на времето. Приносът от всички нуклиди се пресмята чрез сумиране на стотици вериги на генериране и разпадане, поради което тези алгоритми, реализирани като компютърни програми, най-често се наричат сумационни кодове. Такава процедура е описана в справочника на Колобашкин и сътр. “Радиационни Характеристики Облученного Ядерного Топлива”. Такъв алгоритъм е реализиран напр. в известния програмен комплекс ORIGEN;
- Използуване на алгоритми за приблизително пресмятане на остатъчното топлоотделяне от ядреното гориво чрез групиране на продуктите на делене по близки периоди на разпадане и с тежест на всяка група, пропорционална на сумата от кумулативните добиви. От този тип са алгоритмите за пресмятане, описани в стандартите ISO 10645 и ANSI/ANS-5.1-1979.
- Приблизителни формули, които пресмятат остатъчното топлоотделяне по два входни параметъра: време на отстояване на ядрено горивото и време на експлоатация. От този тип са формулите на Вигнер - Уей и Унтермайер -Уелс.

Основното предимство на сумационните кодове е във високата точност. Оценка на точността може да се прави при сравнение между пресмятане и експеримент, както и между различни кодове. При сравнение на ORIGEN2 с данни за ВВЕР-440 и ВВЕР-1000 се оказва, че най-големите различия по отношение на съдържанието на продукти на делене в ЯГ (g/t) са до ~ 10%, най-големите отклонения за остатъчното топлоотделяне са до ~ 8%. Освен топлоотделяне и активност (или g/t), някои сумационни кодове дават концентрация на актиниди, емисия на неутрони от спонтанно деление на актиниди и емисия на неутрони от (α, n) реакция. В ORIGEN2 са заложили алгоритми и библиотеки, които могат да пресметнат и активността на конструкционни материали на активната зона.

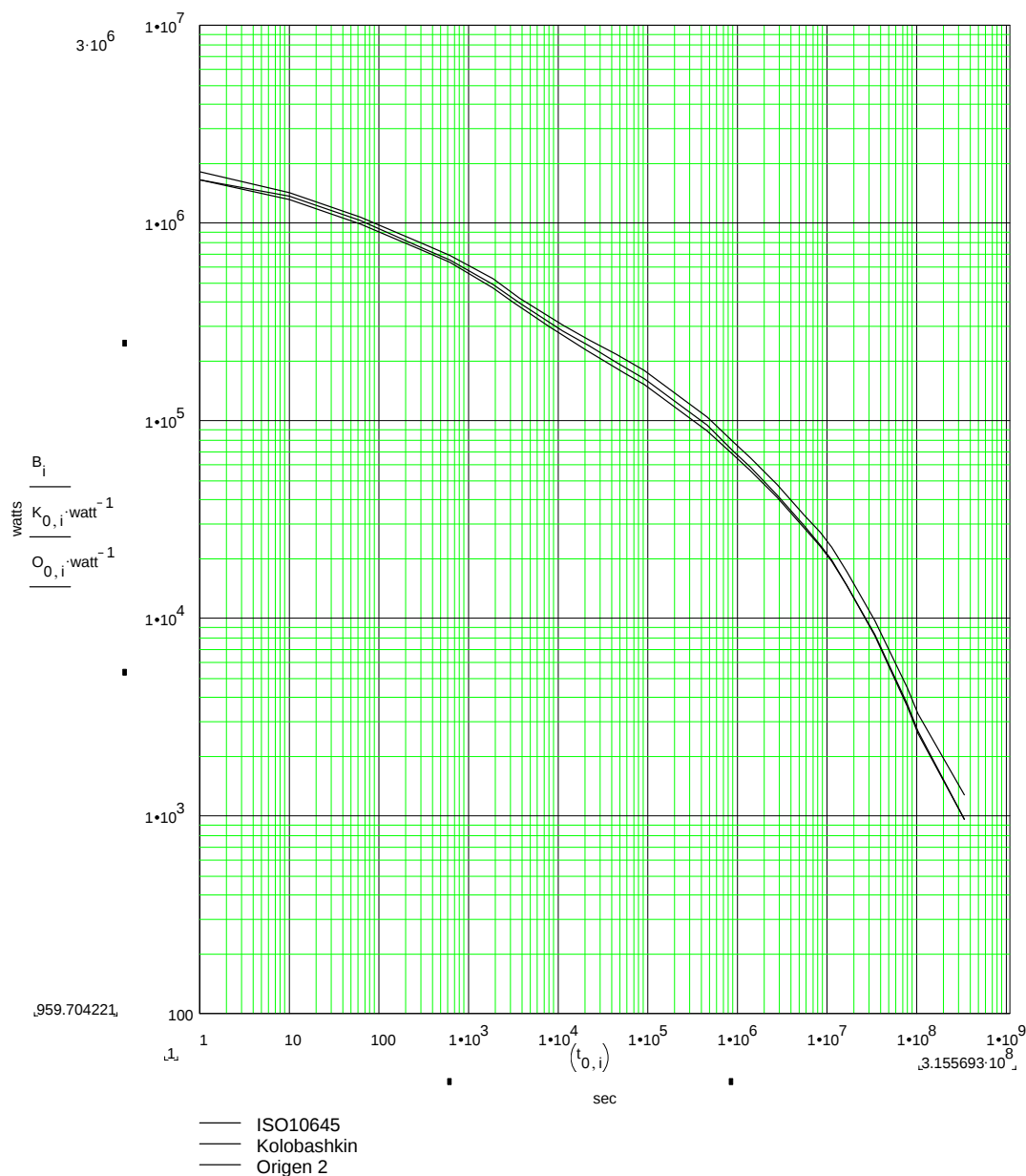
Предимство е също така липсата на ограничение на валидността на резултатите по време. Ако достатъчно точно са пресметнати концентрациите на нуклидите в момента на спиране на реактора, пресмятането на топлоотделянето във времето става чрез пресмятане на експоненти в елементарния случай на разпадане до стабилно ядро или на генетичните вериги при дъщерни радиоактивни изотопи.

Недостатък на сумационните кодове е трудоемкостта при подготовка на входните данни, което може да се преодолее чрез предварително пресмятане на голям брой типични случаи с оценка на грешката при всеки конкретен случай, за който се прави приближение.

Пресмятането на остатъчното топлоотделяне със стандартите ISO 10645 и ANSI/ANS-5.1-1979 се свежда до табулиране на формули. Основното им предимство е, че по замисъл са консервативни. Резултатите по ISO 10645 спрямо резултатите по ORIGEN2 са завишени с 10-20%, ANSI/ANS-5.1-1979 е още по-консервативен. ANSI/ANS-5.1-1979 се използва основно за аварийни анализи.

Формулите на Вигнер - Уей и Унтермайер - Уелс са много прости и поради това оценките могат да се правят дори с калкулатор. Недостатък на формулите е ниската точност, която за някои случаи достига 50%.

На Фигура 15.2 е показано остатъчното енергоотделяне за ОЯГ от реактор ВВЕР-440, W/t, с дълбочина на изгаряне приблизително 30 MWd/kgU. Основно остатъчното топлоотделяне зависи от дълбочината на изгаряне и от времето на отстояване, поради което остатъчното топлоотделяне за ОЯГ от реактор ВВЕР-1000 със същата дълбочина на изгаряне е приблизително същата. Не е показан приносът от делене със закъсняващи неутрони.



Фигура. 15.2. Остатъчно топлоотделяне от ЯГ за ВВЕР-440 с дълбочина на изгаряне 29.75 MW.d/kgU (случай Колобашкин, режим на облъчване А (327 + 38 ППР + 327 + 38 ППР + 327 дни) и 3.6 % начално обогатяване като функция на времето, пресметнато чрез ISO10645 и Origen2 и по данни от справочника на Колобашкин, W/t

От фигурата се вижда, че веднага след прекратяване на верижната реакция остатъчното топлоотделяне е около 7 % от енергоотделянето преди спирането (100 % $N_{\text{ном}}$), $1375 \cdot 10^6 \text{ W}/42 \text{ t} = 32.7 \cdot 10^6 \text{ W/t}$). След 100 s остатъчното топлоотделяне спада 2 пъти, след 1 час остатъчното енергоотделяне спада около 5 пъти, след 1 денонощие спада около 10 пъти спрямо момента на спиране.

Много често за оценки се използват по-прости (но по-неточни) формули като се обединяват гама- и бета- излъчвателите. Остатъчното отделяне на енергия след един акт на делене, дължащо се на бета-лъчение, се апроксимира с формулата:

$$E_{\beta}(t) = 1.4t^{-1.2} \text{ MeV / дел.с} \quad 15.1$$

където t е времето в s след акта на делене.

Остатъчното отделяне на енергия, дължащо се на гама-лъчение, се апроксимира с формулата:

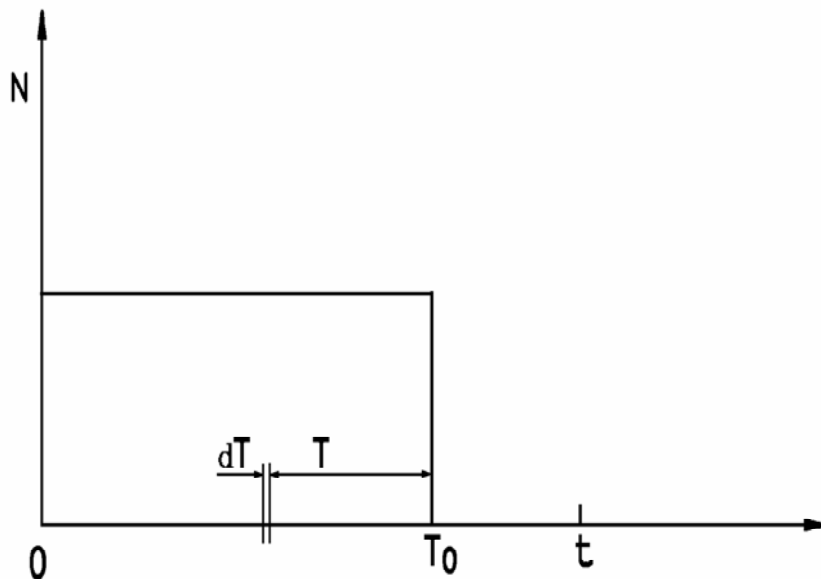
$$E_{\gamma}(t) = 1.5t^{-1.2} \text{ MeV / дел.с} \quad 15.2$$

Общото енергоотделяне от гама- и бета-излъчването е:

$$E(t) = 2.9t^{-1.2} \text{ MeV / дел.с} \quad 15.3$$

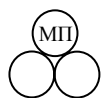
Зависимостите 15.1-3 са получени по емпиричен път.

Формули 15.1-3 са валидни при импулсно делене, например ако актовете на делене стават в продължение на не повече от 1 s, подобно на ядрен взрив. Ако ядреният реактор е работил продължително време в режим 1 деление/s, например T_0 , продуктите на делене се натрупват и разпадат за целия период - Фиг. 15.3



Фиг. 15.3. Илюстрация към извеждане на формулата на Вигнер-Вей за остатъчното топлоотделяне от реактор, работил време T_0

Реакторът е работил време T_0 , търси се топлоотделянето в момент t след изключване на реактора.



Остатъчното енергоотделяне в момент t след прекратяване на верижната реакция поради актове на делене в интервал dT и време T преди спиране на верижната реакция е:

$$dE = 2.9(T + t)^{-1.2} dT \quad 15.4$$

При интегриране по T от 0 до време T_0 се получава:

$$\begin{aligned} E(t, T_0) &= 2.9 \int_0^{T_0} (T + t)^{-1.2} dT \\ &= 14.5 \left(t^{-0.2} - (T_0 + t)^{-0.2} \right) \text{ MeV/s} \end{aligned} \quad 15.5$$

или във ватове при мощност на реактора 1 W ($1 \text{ W} \approx 3.1 \times 10^{10}$ дел/с):

$$q(t, T_0) = 0.00496 \cdot E(t, T_0) = 7.2 \cdot 10^{-2} \left(t^{-0.2} - (T_0 + t)^{-0.2} \right) \text{ W} \quad 15.6$$

Ако топлинната мощност на реактора преди спирането е била Q_0 , топлинната мощност се определя от формулата:

$$Q(t, T_0) = 7.2 \cdot 10^{-2} Q_0 \left(t^{-0.2} - (T_0 + t)^{-0.2} \right) \quad 15.7$$

Това е т.н. формула на Вигнер-Уей. Нейната точност е $\pm 25 \%$ в диапазона от 10 до 10^5 s и $\pm 50 \%$ в диапазона 10^{-1} до 10^8 s.

В началния период след изключване на реактора $t \ll T_0$ и с достатъчна точност мощността се определя от формулата:

$$Q(t) = 7.2 \cdot 10^{-2} Q_0 t^{-0.2} \quad 15.8$$

Съществуват и други формули, например формулата на Унтермайер-Уелс:

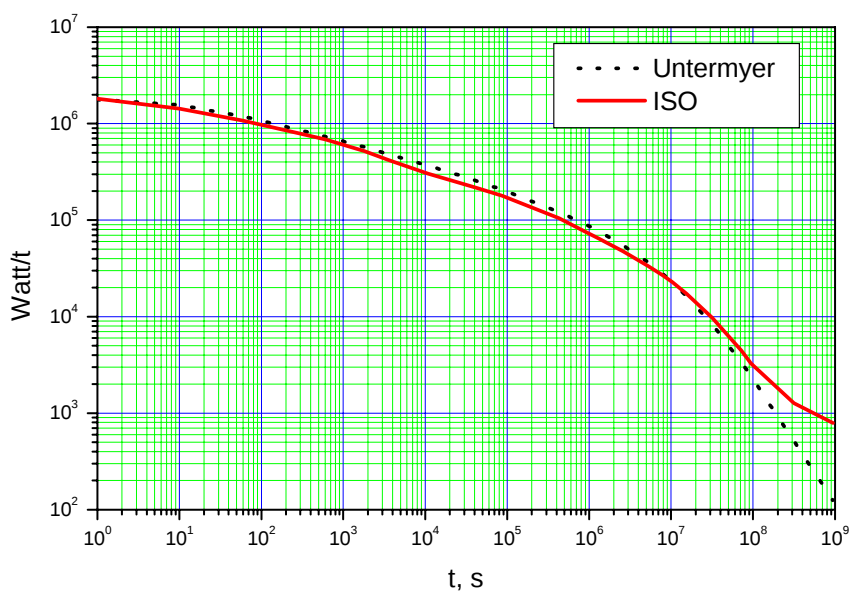
$$\frac{U(t, T)}{P_0} = 0.1 \left\{ \left[(t+10)^{-0.2} - (t+T+10)^{-0.2} \right] - 0.87 \left[(t+2 \times 10^7)^{-0.2} - (t+T+2 \times 10^7)^{-0.2} \right] \right\} \quad 15.9$$

където $U(t, T)$ е топлинната мощност от разпадания, P_0 е топлинната мощност на ядреното гориво преди прекратяване на експлоатацията, t е времето след прекратяване на експлоатацията на ядреното гориво (време на разпад), s, T е периодът на експлоатация, s

Унтермайер и Уелс оценяват точността на формулата, която е валидна до 3 години, така:

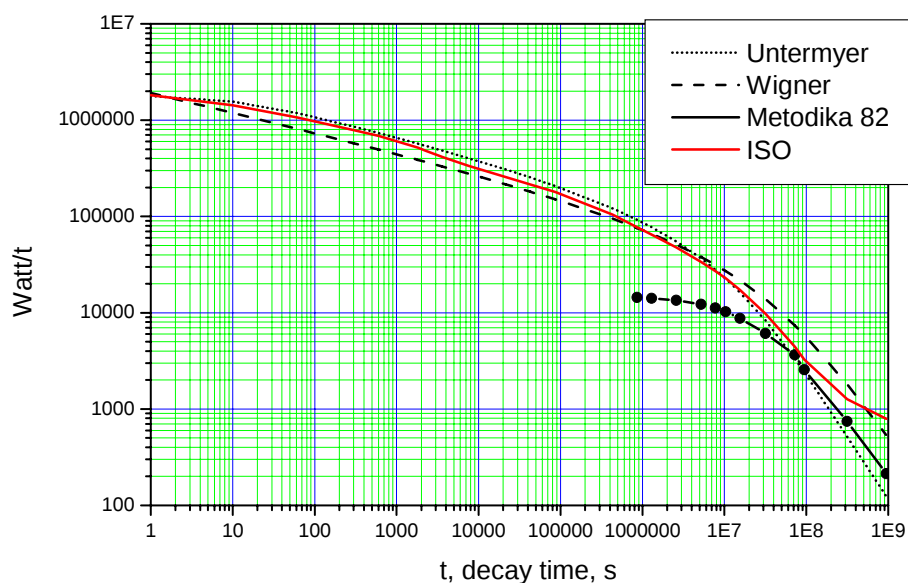
- $\pm 50 \%$ за $1 \leq t \leq 10^2$;
- $\pm 30 \%$ за $10^2 \leq t \leq 10^4$;
- $\pm 10 \%$ за $10^4 \leq t \leq 10^6$;
- $\pm 50 \%$ за $10^6 \leq t \leq 10^8$.

На Фиг. 15.4 са показани за сравнение зависимостите във времето на остатъчното топлоотделяне пресметнати чрез ISO10645 и формулата на Унтермайер-Уелс (опция 1).



Фигура 15.4. Остатъчно топлоотделяне за случай на дълбочина на изгаряне 29.75 MWd/kgU, режим на работа (327 + 38 ППР + 327 + 38 ППР + 327 дни) за ВВЕР-440 според ISO 10645 и Унтермайер-Уелс, W/t

На Фиг. 15.5 са показани за сравнение зависимостите във времето на остатъчното топлоотделяне, пресметнати чрез ISO 10645, Унтермайер - Уелс, Вигнер - Уей и методиката от 1982 г, W/t. (опция 2).



Фигура 15.5. Остатъчно топлоотделяне за дълбочина на изгаряне 29.75 MWd/kgU, режим на работа А (327 + 38 ППР + 327 + 38 ППР + 327 дни) за ВВЕР-440 според ISO 10645, Унтермайер-Уелс, Вигнер-Уей и методиката от 1982 г, W/t

От фигурата се вижда, че:

- Формулата на Унтермайер-Уелс може да се използва за приблизителни оценки.
- Методиката от 1982 г., използвана в Козлодуй (блокове 1-4) за пресмятане на остатъчно топлоотделяне, *е крайно неточна и дава силно занижени стойности*;
- След 3 години ($\sim 10^9$ s) започва да става значимо топлоотделянето от алфа-разпадане. Тъй като периодите на разпадане на алфа-лъчителите са много големи, спадането на топлоотделянето във времето след периоди на отстояване над 20 г. е много бавно ($T_{1/2}$ за $^{239}\text{Pu} = 24400$ г., $T_{1/2}$ за $^{241}\text{Am} = 450$ г.).

За остатъчното топлоотделяне са валидни следните приблизителни закономерности.

а) Веднага след спирането на реактора мощността на остатъчното енергоотделяне зависи само от топлинната мощност, на която е работил реакторът;

б) Веднага след спирането на реактора (след ~ 1 мин.) мощността на остатъчното енергоотделяне е около 7 % от топлинната мощност, на която е работил реакторът.

Полезно е да се запомни, че след 1 час остатъчното топлоотделяне спада приблизително 2 пъти спрямо топлоотделянето 100 s след момента на спиране, след 1 денонощие остатъчното енергоотделяне спада около 5 пъти спрямо топлоотделянето 100 s след момента на спиране.

За водно-водни реактори под налягане активността и остатъчното топлоотделяне при дълбочина на изгаряне $\approx 30 \text{ GWd/tU}$ са приблизително следните:

Таблица 15.1. Остатъчно топлоотделяне на ОЯГ, 30 GWd/tU

Отстояване	Активност, Ci/kg	Топлоотделяне, W/kg
150 дни	$4.6 \cdot 10^3$	24.3
1 г.	$2.3 \cdot 10^3$	10.4
10 г.	$3.2 \cdot 10^2$	1.3

Остатъчното топлоотделяне и активност на една касета при дълбочина на изгаряне съответно 40 GWd/tU (ВВЕР-1000) и 30 GWd/tU (ВВЕР-440) са:

Таблица 15.2. Топлоотделяне, kW/касета, точност 10%:

Отстояване	0.5 г.	1 г.	2 г.	3 г.	10 г.
ВВЕР-1000	10.5	5.7	2.8	1.7	0.6
ВВЕР-440	2.0	1.1	0.6	0.3	0.12

В зависимост от дълбочината на изгарянето, ОЯГ излъчва неутрони от натрупаните трансуранови елементи приблизително $(2-5) \cdot 10^5 \text{ n.s/kgU}$.

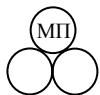
ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ

1. Имат ли забележим принос в генерирането на топлина закъсняващите неутрони след спиране на реактора в следните моменти:

- а) 1 секунда;
- б) 1 минута;
- в) 1 час;
- г) 1 денонощие.

2. Колко е остатъчното топлоотделяне на реактор ВВЕР-440 и реактор ВВЕР-1000 веднага след спирането от номинална мощност без да се отчитат закъсняващите неутрони:

- а) около 0.95 MW , около 2.1 MW
- б) около 9.5 MW , около 21 MW ;
- в) около 95 MW , около 210 MW ;
- г) около 950 MW , около 2100 MW .



Остатъчно топлоотделяне на ядреното гориво

НФП-
440,1000

3. Оценете остатъчното топлоотделяне за реактор ВВЕР-440 и реактор ВВЕР-1000 веднага след спирането от номинална мощност, 1 минута, 30 минути, 1 час, 1 денонощие след спирането.
4. При каква стойност на t грешката по формулата на Унтермайер-Уелс е 10 %?
5. Оценете приноса на остатъчното топлоотделяне при намаляване на мощността на реактора (напр. 100 % - 50 %).
6. Има ли принос от остатъчното топлоотделяне при работа на реактора?
7. Оценете остатъчното топлоотделяне на касети след 1, 3, 5, 10 г.
8. Направете оценка на остатъчното топлоотделяне в БОК.
9. Направете оценка на остатъчното топлоотделяне в транспортен контейнер.