

8. Отравяне на реактора от Хе -135 И Sm-149. Изменение на реактивността при пускане, спиране и промяна на мощността

Фрагментите, на които се разпада ядрото при делене, са радиоактивни, с излишък на неутрони, и пораждат вериги от нуклиди при разпадането си до стабилни ядра чрез излъчване на бета-частици. Членовете на тези вериги имат сечения за поглъщане на неутрони при 0.025 eV в диапазона от няколко десети от барна до над два милиона барна. Образуваните при поглъщане на неутрони ядра също на свой ред поглъщат неутрони, следователно детайлното описание на зависимостта на сечението на поглъщане поради натрупване на продукти от делене изисква определянето на концентрациите на стотици нуклиди като функция на времето.

В приетата терминология продуктите на делене (фрагменти от деленето или техни дъщерни ядра) се подразделят на “шлаки” - с относително малки сечения за залавяне на неутрони и на “отровители” - с особено големи сечения за залавяне на неутрони.

Типичен пример на изотоп, отравящ реактора, е ^{135}Xe със сечение на поглъщане за топлинни неутрони $\sigma=2.7.10^6$ барна и период на полуразпадане $T_{1/2}=9.2$ часа. Изотопите, в които се превръща ^{135}Xe след бета-разпадане или поглъщане на неутрон, са с малки сечения за поглъщане на неутрони.

Друг пример за отровител е стабилният изотоп ^{149}Sm със сечение на поглъщане $\sigma=40800$ барна и сравнително висок добив.

ВРЪЗКА МЕЖДУ ОТРАВЯНЕ И РЕАКТИВНОСТ

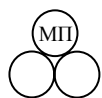
Ефективният коефициент на размножение на реактора може да се запише по следния начин:

$$K_{\text{eff}}=K_{\infty}P_fP_{\text{th}} \quad 8.1$$

където:

$K_{\infty} \equiv \epsilon p f \eta$ е коефициентът на размножение на безкрайна решетка от горивни елементи (т.е. на една елементарна клетка, съставена от гориво и забавител), представен чрез разгледаните по-горе четири множителя. P_f е вероятността за избягване на утечка на бързи неутрони в процеса на забавянето им, а P_{th} е вероятността за избягване на утечка на топлинни неутрони в процеса на дифузията им.

Натрупването на шлаки и отровители не влияе на P_f , защото първо тяхната концентрация е малка и, второ, защото те се натрупват в горивната област, а забавянето на



неутроните става основно в забавителя. Влиянието на шлаките и отровителите върху P_{th} също може да се пренебрегне, тъй като дължината на дифузия на топлинните неутрони (4-5 cm) е пренебрежимо малка спрямо размерите на големите енергетични реактори със забавител вода (≈ 3 m).

От четирите множителя на K_{∞} отравянето влияе само на коефициента на използване на топлинни неутрони $f \equiv \Sigma_F \Phi_1 / (\Sigma_F \Phi_1 + \Sigma_M \Phi_0 + \Sigma_B \Phi_0 + \Sigma_P \Phi_1)$, където $\Sigma_F, \Sigma_M, \Sigma_B, \Sigma_C, \Sigma_P$ са съответно сеченията за поглъщане на топлинни неутрони в горивото, забавителя, системата за управление (регулиращи пръти и борна киселина) и отровителите; Φ_1 е средният поток на топлинните неутрони в горивната област, а Φ_0 е средният поток на топлинните неутрони в забавителя.

Натрупването на шлаки и отровители влияе слабо върху съотношението между Φ_1 и Φ_0 и практически се изразява само чрез изменението на Σ_P .

Нека f е коефициентът на използване на топлинните неутрони за "неотровен реактор" - при някаква фиксирана начална стойност на Σ_P , а f' е коефициентът на използване на топлинните неутрони при съответното "отровено" състояние и равни други условия. K_{eff} и K'_{eff} са съответните коефициенти на размножение. Тогава относителното изменение на K_{eff} поради отравяне на реактора е:

$$\rho_p = \frac{K'_{eff} - K_{eff}}{K_{eff}} = \frac{f' - f}{f} = - \frac{q_p}{1 + q_M + q_B + q_p} \quad 8.2$$

Горният израз е въведената от отровителите реактивност ρ_p (p от poison – отрова). Величините q_{α} са $\Sigma_{\alpha} \Phi_j / \Sigma_U \Phi_1 ; j = 0, 1$. Шлакуването и отравянето обикновено се представят в единици Σ_U , т.е. като q_p . Тъй като величините в знаменателя са малки спрямо единицата, за приблизителни оценки на реактивността причинена от отравяне обикновено се приема, че $\rho_p \cong -q_p$. За приблизителни оценки се приема също така $\Phi_j = \Phi_1$.

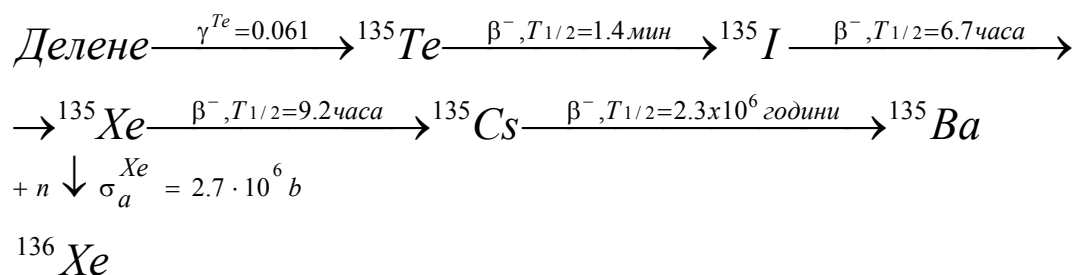
Тези оценки обаче са не съвсем точни при голям принос на q_B , както е в началото на кампанията (големи концентрации на борна киселина) или при спрян реактор (въведени в активната зона ОР СУЗ). В такива случаи q_B е съизмеримо с q_p и истинската стойност на ρ_p е по-малка от $-q_p$. В сила е и обратното - ефективността на системата за регулиране при отровен реактор е по-малка, отколкото при неотровен. Тези явления се наричат *интерференция* и имат място и между различните компоненти на системата за регулиране - борната киселина и регулиращите пръти, както и между самите регулиращи пръти. В

последното има принос и изменящото се пространствено и енергетично разпределение на неутронния поток: при въвеждане в активната зона на съсредоточен поглъtitел (ОР СУЗ). В неговата околност потокът Φ на топлинните неутрони намалява. Ако в същата околност бъде въведен друг поглъtitел, скоростта на поглъщане на неутрони в него $\Sigma\Phi$ ще бъде по-ниска, отколкото при самостоятелното му действие.

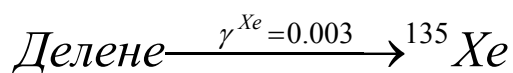
ОТРАВЯНЕ от ^{135}Xe

От гледна точка на критичността и управлението на реактора ^{135}Xe е най-важен от всички продукти на деленето. Той има голям резонанс на сечението на поглъщане с максимум при $E=0.082$ eV, поради което сечението за поглъщане е около $2.7 \cdot 10^6$ барна при 0.025 eV. Ксенон-135 се образува от разпадането на йод-135 (период на полуразпадане 6.7 часа) и на свой ред е също радиоактивен (период на полуразпадане 9.2 часа). Той е член на показаната на долната фигура верига, където добивите (вероятности за получаване при едно деление) γ^{Te} и γ^{Xe} са за делене на ^{235}U с топлинни неутрони. Сеченията за поглъщане на другите членове на веригата (с изключение на ^{135}Xe) са пренебрежимо малки. ^{135}Xe се разпада до ^{135}Cs или при поглъщане на неутрон се превръща в ^{136}Xe (стабилен). ^{135}Cs е с период на полуразпадане $2 \cdot 10^6$ г и се разпада до стабилния изотоп ^{135}Ba .

Основната верига на получаване на ^{135}Xe е следната:

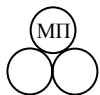


С около 20 пъти по-малка вероятност ^{135}Xe се получава директно при делене без да преминава през телур и йод:



Получаването и унищожаването на ^{135}Xe има две важни особености:

- ^{135}Xe се получава от ^{135}I със закъснение от около 9 часа. Това означава, че промените в мощността на реактора (промените в скоростта на делене) се проявяват върху получаването на Xe със значително закъснение;



- Трансформирането на ^{135}Xe се извършва по два канала: чрез разпадане до ^{135}Cs и чрез поглъщане на неутрон, превръщайки се в ^{136}Xe . Промяната на мощността на реактора влияе мигновено върху втория канал.

Разпадането на ^{135}Te е толкова бързо, а на ^{135}Cs - толкова бавно (период на полуразпадане 2.3 милиона години), че за практически цели може да се приеме, че ^{135}I се образува направо при делене с добив $\gamma^I=0.061$, а веригата се прекъсва с превръщането на ^{135}Xe чрез β -разпадане или залавяне на неутрон. Ако $I(t)$ и $Xe(t)$ са концентрациите на I и Xe в активната зона на реактора, то уравненията за зависимостта на тези концентрации от времето при поток $\Phi(t)$ в приближение за една група неутрони по енергия и независимост от пространствени координати са:

$$\begin{aligned}\frac{dI(t)}{dt} &= \gamma^I \Sigma_f \Phi(t) - \lambda^I I(t) \\ \frac{dXe(t)}{dt} &= \gamma^{Xe} \Sigma_f \Phi(t) + \lambda^I I(t) - [\sigma_a^{Xe} \Phi(t) + \lambda^{Xe}] Xe(t)\end{aligned}\tag{8.3}$$

Тук $\lambda=0.693/T_{1/2}$.

Първият член от първия ред на системата описва скоростта на генериране на йод поради делене, вторият член описва скоростта на разпадане на йода. Аналогични са първите два члена от втория ред на системата, членът след знака минус описва скоростта на намаление на ксенон поради поглъщане на неутрон и поради разпадане. В стационарно състояние изменението е нула (производните са нула) и решенията са:

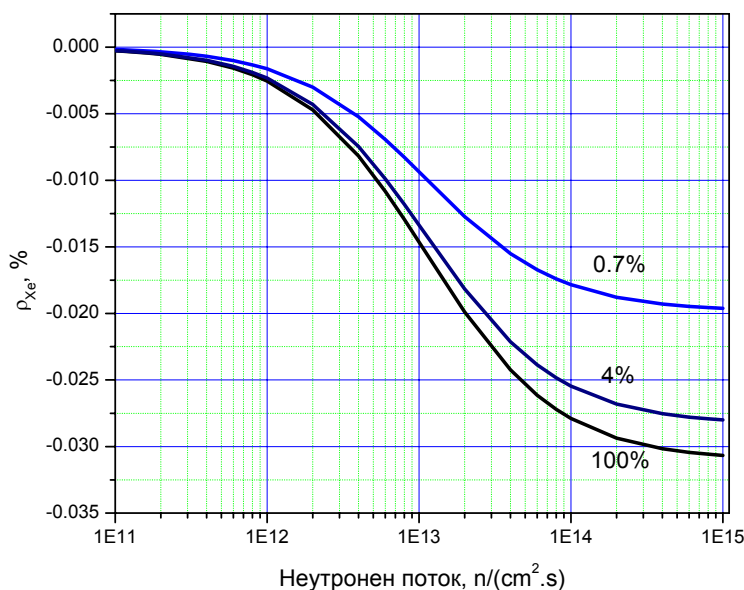
$$Xe_{\infty} = \frac{(\gamma^I + \gamma^{Xe}) \Sigma_f \Phi}{\sigma_a^{Xe} \Phi + \lambda^{Xe}}; \quad I_{\infty} = \frac{\gamma^I \Sigma_f \Phi}{\lambda^I}$$

Съответната загуба на реактивност от стационарно отравяне от Xe е

$$\rho_{Xe} \cong - \frac{(\gamma^I + \gamma^{Xe}) \Phi}{\sigma_a^{Xe} \Phi + \lambda^{Xe}} \cdot \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}\tag{8.4}$$

където Σ_a е пълното макроскопично сечение на горивото за поглъщане на неутрони.

Ако $\sigma_a^{Xe} \Phi \ll \lambda^{Xe}$, стационарното отравяне зависи линейно от неутронния поток (мощността), ако $\sigma_a^{Xe} \Phi \gg \lambda^{Xe}$, стационарното отравяне е достигнало насищане. Обогащаването влияе на стационарното отравяне чрез отношението Σ_f/Σ_a .



Фиг.8.1. Стационарно отравяне от Хе за естествен уран, обогатяване по ^{235}U 4% и обогатяване 100%

За независещ от времето поток Φ решението на горните уравнения е:

$$\begin{aligned}
 I(t) &= I_{\infty} [1 - \exp(-\lambda' t)] + I_0 \exp(-\lambda' t), \\
 Xe(t) &= Xe_0 \cdot \exp[-(\sigma_a^{Xe} \Phi + \lambda^{Xe}) t] \\
 &\quad + Xe_{\infty} [1 - \exp[-(\sigma_a^{Xe} \Phi + \lambda^{Xe}) t]] \\
 &\quad - \frac{\lambda' (I_1 - I_0)}{\lambda' - \lambda^{Xe} - \sigma_a^{Xe} \Phi} [\exp[-(\sigma_a^{Xe} \Phi + \lambda^{Xe}) t] - \exp(-\lambda' t)]
 \end{aligned}
 \tag{8.5}$$

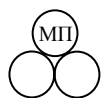
където $\gamma \equiv \gamma^I + \gamma^{Xe}$.

Xe(t) след пускане на реактора

Ако даден реактор, който в началото не съдържа ^{135}Xe или ^{135}I , бъде пуснат в момента $t=0$ с поток Φ_1 и работи при такъв поток достатъчно дълго време, горните решения добиват вида:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{\gamma^I \Sigma_f \Phi_1}{\lambda^I}, \\
 Xe_1 &= \frac{\gamma \Sigma_f \Phi_1}{\sigma_a^{Xe} \Phi_1 + \lambda^{Xe}}
 \end{aligned}
 \tag{8.6}$$

От изразите за $I(t)$ и $Xe(t)$ следва, че времето, за което се постига равновесното състояние, зависи от $\lambda^I = 2.87 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ и $\sigma_a^{Xe} \Phi_1 + \lambda^{Xe} = 2.7 \cdot 10^{-18} \Phi_1 + 2.09 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, поради което е около 10^5 s (≈ 30 часа) даже и при малък поток Φ_1 . Физическата причина за това е, че



ксенонът е нестабилен и условието за равновесие е равенство на скоростта на генерация и на изчезване на ксенон, което се постига за време от мащаба на неговия период на ефективен период на полуразпадане и периода на полуразпадане на ^{135}I . Ако към естественото разпадане на ксенона се прибави неговото разграждане поради залавяне на неутрони, $\text{Xe}(t)$ ще достигне равновесната си стойност по-бързо. Минималното време за достигане на равновесие все пак се определя от периода на полуразпадане на ^{135}I - 6.7 часа. При безкрайно голям неутронен поток времето за достигане на равновесна концентрация на ксенон ще бъде равно на времето за достигане на равновесна концентрация на йод - около 3 периода на полуразпадане на йод-135. Следователно 25-30 часа е добра оценка за времето за достигане на равновесна концентрация на ^{135}Xe или поне на 90% от стойността ѝ.

Величината $T_{1/2} = 0.693/(\sigma_a^{Xe}\Phi_1 + \lambda^{Xe})$ може да се приеме за ефективен период на полуразпадане на Xe.

При $\Phi_1 = 10$ неутрона/($\text{cm}^2.\text{s}$) макроскопичното сечение на ксенона ($\Sigma_a^{Xe} \equiv \sigma_a^{Xe} X_e$) е едва около $9.10^{-7}\Sigma_f$, т.е. в реактор с много ниска мощност ксенонът е пренебрежим "конкурент" на горивото при поглъщането на неутрони. Ако обаче $\sigma_a^{Xe}\Phi_1 \approx \lambda^{Xe}$, то Σ_a^{Xe} доближава $\gamma\Sigma_f$ ($=0.067\Sigma_f$). Например, при $\Phi_1 = 5.10^{13}$ неутрона/($\text{cm}^2.\text{s}$) $\Sigma_a^{Xe} = 0.058\Sigma_f$. Скоростта на поглъщане на неутрони от ^{135}Xe в топлинен реактор с такъв неутронен поток (типичен за ВВЕР) е напълно сравнима със скоростта на поглъщане на неутрони от забавителя или конструкционните материали. Ако не бъде предвидено допълнително гориво за компенсиране на отравянето от ксенон в такъв реактор, би било невъзможно да се поддържа критичност за повече от няколко часа работа в енергетичен режим.

Съответното отравяне от ^{135}Xe е:

$$Xe_1 = \frac{\gamma\Phi_1}{\sigma_a^{Xe}\Phi_1 + \lambda^{Xe}} \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a}$$

Обогатяването влияе на отравянето от ^{135}Xe чрез множителя $\frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} = \frac{\mu\Sigma_f^{235}}{\mu\Sigma_a^{235} + (1-\mu)\Sigma_a^{238}}$,

където μ е изотопното обогатяване на горивото,

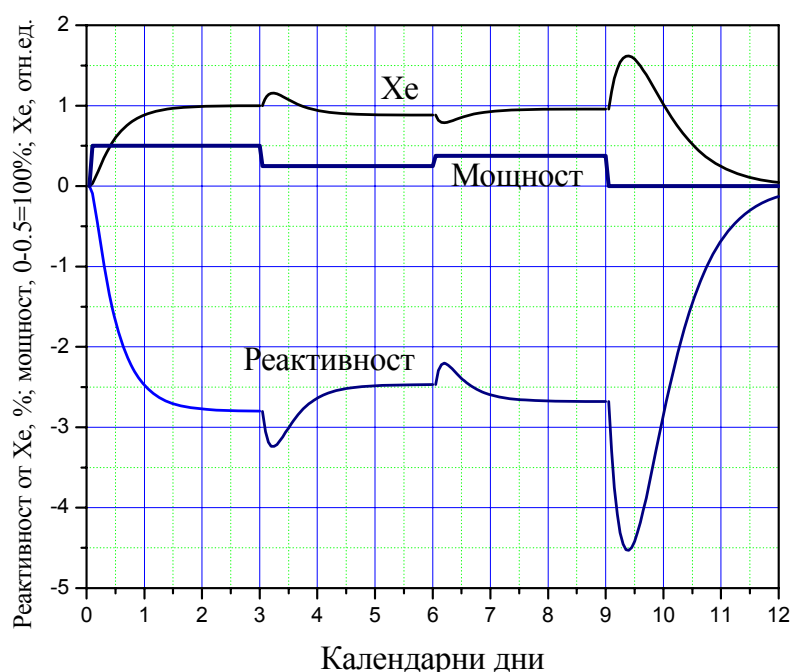
Xe(t) след спиране на реактор с равновесно отравяне

Ако за I_0 и Xe_0 в изразите за $I(t)$ и $Xe(t)$ се поставят I_1 и Xe_1 , то за реактор спрян в $t=0$ до $\Phi_2=0$ след работа при равновесно отравяне с поток Φ_1 , концентрациите на ^{135}I и ^{135}Xe ще бъдат:

$$I(t) = I_1 \cdot \exp(-\lambda' t),$$

$$Xe(t) = Xe_1 \cdot \exp(-\lambda^{Xe} t) - \frac{\gamma' \Sigma_f \Phi_1}{\lambda' - \lambda^{Xe}} [\exp(-\lambda^{Xe} t) - \exp(-\lambda' t)] \quad 8.7$$

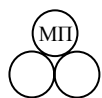
На долната фигура е показано качествено развитието във времето на ксенонови процеси при промяна на мощността на реактора - достигане на стационарно отравяне, йодна яма след намаление на мощността, достигане на по ниско стационарно отравяне, временно понижаване на концентрацията на ксенон поради изгаряне след увеличение на мощността, достигане на стационарно отравяне, йодна яма и пълно разотравяне след спиране на реактора. Реактивността, свързана с ксенона, е огледална функция на количеството на ксенон в реактора.



Фиг.8.2. Развитие във времето на ксенонови процеси при промяна на мощността на реактора

Главните особености на Xe отравяне при промяна на мощността на реактор са следните:

- При започване на работа на “неотровен” реактор на 100% мощност за реактор ВВЕР стационарното отравяне се достига след около 25-30 часа;
- Стационарното отравяне не зависи линейно от мощността;



- Ако след достигане на стационарно състояние мощността на реактора бъде намалена, скоростта на образуване на ^{135}Xe от ^{135}I се запазва същата за период от време от порядъка на часове, докато единият канал на извеждане на Xe от активната зона – чрез поглъщане на неутрон - веднага намалява. Резултатът е увеличение на количеството ^{135}Xe веднага след намаление на мощността. След време се достига ново ниво, по-ниско от първоначалното стационарно ниво;
- Ако след достигане на стационарно състояние мощността на реактора бъде увеличена, скоростта на образуване на ^{135}Xe от ^{135}I се запазва същата за период от време от порядъка на часове, докато единият канал на извеждане на Xe от активната зона – чрез поглъщане на неутрон - веднага се увеличава. Резултатът е намаление на количеството ^{135}Xe веднага след увеличение на мощността. След време се достига ново ниво, по-високо от първоначалното стационарно ниво;
- При спиране на реактора извеждането на ^{135}Xe от активната зона става само чрез радиоактивно разпадане, образуването на ^{135}Xe от ^{135}I в следствие на бета-разпадане продължава за време от порядъка на часове със същата скорост. Резултатът е увеличение на количеството ^{135}Xe в активната зона след спиране. При спиране от номинална мощност максимумът по ^{135}Xe се достига след около 5-7 часа, след което започва намаляване на ^{135}Xe . След около 27-30 часа се достига ниво на отравяне равно на отравянето преди спирането (може да се приеме критерий за достигане на 90% от стойността). След около 1.5-2 денонощия се достига пълно разотравяне по ^{135}Xe . Процесът на отравяне след спиране в литературата се среща като “йодна яма”;
- Отравянето от ^{135}Xe се различава в началото и в края на кампанията. В края на кампанията отравянето вкл. при преходни процеси е по-голямо (напр. по дълбока “йодна яма”). Обяснението на явлениято е общо за цял клас от явления, при които отрицателната реактивност от поглъщане на неутрони нараства в края на кампанията. В края на кампанията макроскопичното сечение на поглъщане на горивото Σ_U намалява и съответно реактивността свързана с поглъщането на неутрони нараства: $\rho_p \cong -q_p \cong \Sigma_a / \Sigma_U$, (виж “Връзка между отравяне и реактивност”).

За да има обективност при достигане на стационарни значения, е необходимо да се уточни критерий, например достигане на 90% от стационарното значение.

КСЕНОНОВИ КОЛЕБАНИЯ

За реактор на нулева мощност, за който няма профилиране на обогатяването на горивото по височина, разпределението на неутронния поток е симетрично спрямо хоризонтална равнина през средата на активната зона. Известна асиметрия се наблюдава поради влиянието на регулиращите елементи в горната част на зоната.

При работа на мощност долната част на зоната е с по-ниска средна температура спрямо горната част на зоната (долна и горна част на зоната – условно разделяне с хоризонтална равнина през средата на активната зона). Поради отрицателния температурен коефициент на реактивност мощността и съответно неутронния поток в долната част на зоната са по-високи.

При работа на мощност в долната част на зоната отрицателния мощностен ефект от увеличението на мощността се компенсира от положителният температурен ефект от по-ниската температура.

За енергийните реактори се дефинира величината “аксиален офсет, АО” или само “офсет”:

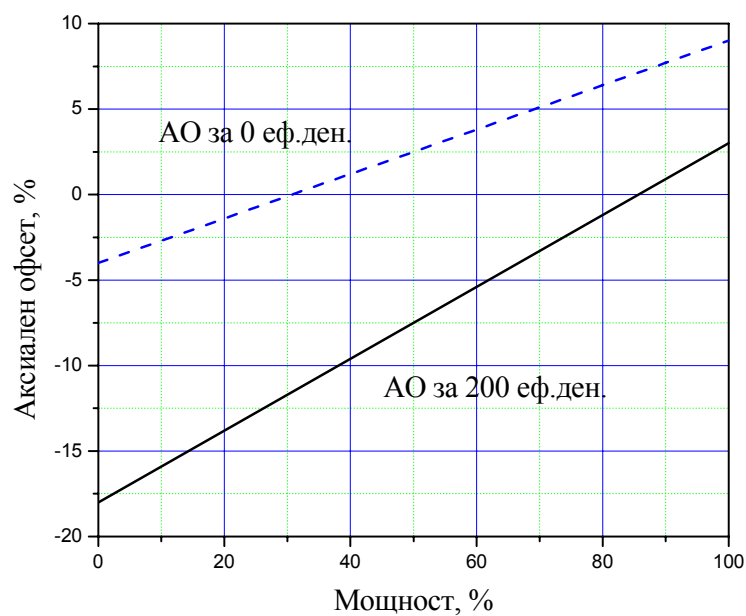
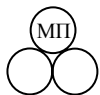
$$AO = \frac{\Phi_d - \Phi_g}{\Phi_d + \Phi_g} \quad 8.8$$

където Φ е неутронен поток, индексите “г” и “д” означават горна и долна част на активната зона. Прието е офсетът да се представя в проценти.

Данни за неутронния поток (мощността) се получават от системата за вътрешнореакторен контрол (СВРК) на активната зона на реактора ВВЕР-1000. Датчици на системата са 95 термодвойки и 64 неутронно измервателни сонди, всяка от които съдържа по 7 родиеви детектора разположени един над друг, предназначени за контрол на енергоотделянето по височина на активната зона. Сигналите от детекторите се обработват от външно математическо програмно обезпечение на СВРК, в резултат на което има информация за разпределението на енергоотделянето в 16 височинни сечения за всяка касета.

Абсолютната стойност на аксиалния офсет зависи от мощността почти линейно. При работа без промяна на мощността се установява стационарен аксиален офсет.

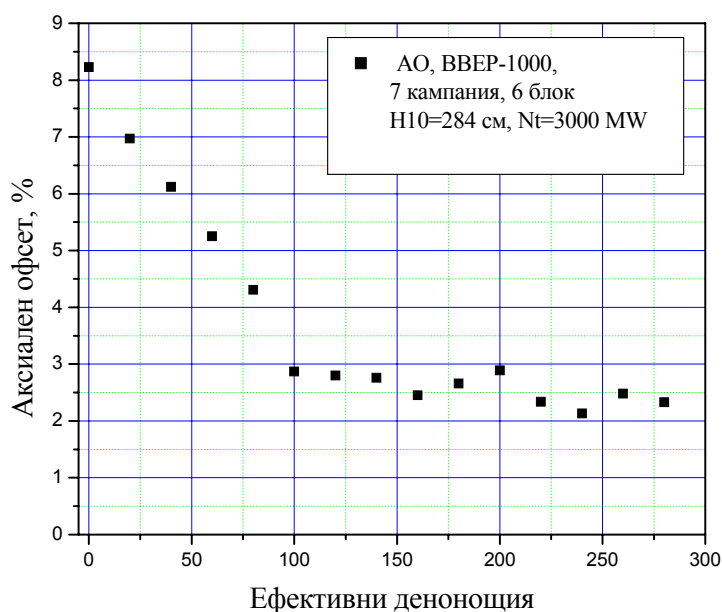
След време средната дълбочина на изгаряне на горивото в долната част на зоната става по-голяма от средната дълбочина на изгаряне горивото в горната част. В следствие на това максимумът на енергоотделянето бавно се премества нагоре и аксиалният офсет по абсолютна стойност намалява.



Фиг.8.3. Стационарен аксиален офсет за реактор ВВЕР-1000 за началото на кампанията и за 200 ефективни денонощия (приблизителни стойности).

Особености на стационарния аксиален офсет:

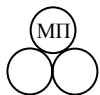
- с нарастване на мощността максимумът на енергоотделянето по височина се измества надолу по активната зона ;
- с нарастване броя на ефективните денонощия максимумът на енергоотделянето по височина се измества нагоре по активната зона.



Фиг.8.4. Пресметнат АО в зависимост от ефективните денонощия за 6 блок, 7 кампания

Ако чрез движение на регулиращите органи се причини преразпределение на енергоотделянето по височина за по-продължително време ($t > 1h$), то това може да доведе до така наречените "ксенонови колебания", при които максимумът на пространственото разпределение на ксенона в активната зона се мести с времето, причинявайки съответни изменения на пространственото разпределение на енергоотделянето по височина. Това явление се наблюдава за реактори с голяма плътност на неутронния поток и размери на зоната по-големи от около 30 дължини на миграция на неутроните. Реактор от този тип е ВВЕР-1000. При ВВЕР-440 вероятността за възникване на ксенонови колебания е малка и ако въпреки това бъдат възбудени, те са малка амплитуда и са аperiодични – бързо затихват.

За реакторите с големи зони причините за възникване на ксенонови колебания се явяват несъответствие между разпределението на енергоотделянето от една страна и на йода и ксенона от друга, и *поддържането на постоянна мощност*. Такъв дисбаланс се получава в резултат на изменение на мощността на реактора с над 10–20 % от номиналната или преместване на работната група над 3% спрямо средното стационарно положение за време над 1 час. Най-неблагоприятен фактор, водещ до възникване на ксенонови колебания, е продължително, над 0.5-1.0 час, положение на групите ОР СУЗ в диапазона 40-60%. Ксенонови колебания могат да възникнат при намаление на мощността, включително сработване на УРБ, намаление с последващо възстановяване на мощността, увеличение на мощността.



За възникване на ксенонови колебания е необходимо АРМ да поддържа постоянна мощност и наличие на промяна на мощността за известно време в една част на зоната.

В процеса на експлоатация на ВВЕР-1000 аксиални ксенонови колебания възникват при:

- промяна на положението на ОР СУЗ при постоянна мощност на реактора;
- промяна на мощността на реактора при неизменно положение на ОР;
- промяна едновременно на положението на ОР и мощността на реактора.

За реактори с голям диаметър на зоната са възможни и радиални, диаметрални и азимутални осцилации.

Радиални осцилации се получават например при:

- промяна на положението на централен ОР;
- промяна на положението група ОР в централната или периферийната област

При радиални осцилации смущението се разпространява от центъра към периферията след това обратно, или от периферията към центъра и обратно.

Диаметрални осцилации възникват при извличане на паднал ОР, който се намира в периферията на АЗ.

Азимутални осцилации се получават при последователно (по направление на часовниковата стрелка или против нея);

- спускане с последващо извличане разположени симетрично спрямо центъра на ОР;
- извличане един по един симетрично разположени спрямо центъра ОР с изчакване.

Чисто от един тип ксенонови осцилации не възникват. При възбуждане на аксиални колебания възникват и радиални колебания. При възникване на диаметрални, радиални или азимутални колебания възникват и аксиални колебания. Експериментален факт е, че периодът на различните колебания е един и същ.

От оперативна гледна точка измеряемият параметър е аксиалния офсет и поради това по-нататък в изложението ще се разглеждат само аксиални ксенонови колебания или съкратено ксенонови колебания или ксенонови осцилации. За ВВЕР-1000 тези аксиални ксенонови колебания са от особено значение, тъй като височината на активната зона е по-голяма от диаметъра ѝ. При възникване на ксенонови колебания е възможно превишаване на пределните стойности на коефициента на обемна неравномерност и разхерметизация на ТОЕ. За да не се допусне това при работа на нива на мощност над 75%, отклоненията на АО от зададената стационарна стойност не трябва да превишават $\pm 5\%$ за време 0.5-1 час. Ако се

достигат пределните значения на обемния коефициент на неравномерност въпреки операторската намеса, трябва да се понижи мощността на реактора.

Пример:

Нека в даден момент е намалена мощността на реактора чрез спускане на регулиращите органи за време повече от 1 час, след което мощността е възстановена. При намаляването на мощността с ОР енергоотделянето в горната част на зоната е намалено повече, в долната част е увеличено поради преместване на максимума на енергоотделянето надолу. В по-опростени разглеждания може дори да се допусне, че намалението на мощността е само в горната част на зоната. При голямо намаление на мощността може да се допусне, че има намаление и в долната част на зоната, но относително по-малко отколкото в горната част на зоната.

Условно активната зона може да бъде разделена на два реактора “горен” и “долен”.

Отравянето в “горния” реактор след намаление на мощността започва да расте и мощността още повече намалява. Поради увеличената мощност в долния реактор започва процес на разотравяне и увеличение на мощността. Максимумът на неутронния поток се премества допълнително надолу. За поддържане на мощността ОР се потапят, за да запазят отрицателната си реактивност в условията на намален неутронен поток в горната част на зоната.

При възстановяване на мощността в “горния” реактор има натрупан ксенон в повече от равновесното количество. Отравянето в “долния” реактор е по-малко от равновесното, тъй като при увеличаването на мощността част от ксенона е изгорял. При възстановяване на мощността чрез издигане на ОР максимумът на неутронния поток се премества нагоре.

В “горния” реактор поради увеличената мощност започва изгаряне на ксенон, в “долния” реактор започва натрупване на ксенон. Максимумът на енергоотделянето се отстранява допълнително нагоре и ОР се повдигат, за да запазят отрицателната реактивност, която внасят.

След време поради увеличената мощност в “горния” реактор започва да се натрупва ксенон, в “долния” реактор се достига по-ниско ниво на ксенона и максимумът на енергоотделянето започва да се придвижва надолу. Поради увеличената мощност в долната част на реактора изгаря ксенон, поради намалената мощност в горната част започва да се натрупва ксенон и енергоотделянето допълнително се премества надолу. ОР следват преместването на енергоотделянето.

След време в долната част се натрупва ксенон поради увеличената мощност, в горната част вече настъпва разотравяне и максимумът на енергоотделянето се премества нагоре.

Така цикълът се повтаря.

ОР само приблизително следват преместването на неутронния поток. В същност те регулират сумата от мощността на “горния” и “долния” реактор да бъде постоянна.

При това опростено разглеждане не включихме още един ефект, който също има значение за преместване на енергоотделянето. Това е разликата от утечката на неутрони между двата реактора, които при разбалансиране от стационарните значения спомагат за преместване на енергоотделянето.

Изменението на АО при наличие на ксенонови колебания се описва със зависимостта:

$$AO(t) = A.e^{a.t} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) + C \quad 8.9$$

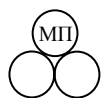
където:

A е амплитудата на колебанията;

C е стационарният офсет;

T е периодът на осцилациите;

a е индекс на стабилност. При отрицателна стойност наблюдаваме затихване.



В таблица 8.1 са дадени примерни стойности на индекси на стабилност и период на осцилациите за ВВЕР-1000:

Таблица 8.1. Примерни стойности на индекси на стабилност и период на осцилациите за ВВЕР-1000

Параметър	Начало на кампанията	Край на кампанията
Индекс на стабилност [час ⁻¹]	-0.03	-0.008
Период на колебанията [час]	31	26

За реактор ВВЕР-1000 е присъща работа основно при наличие на ксенонова стабилност. Но нивото на тази стабилност е недостатъчно, за да осигури бързо самозатихване на ксеноновите колебания. За края на кампанията самозатихването е слабо.

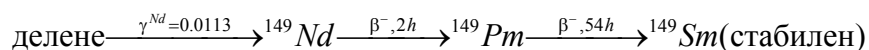
За ВВЕР-1000 общите закономерности на ксеноновите колебания са следните:

- Възникването на ксенонови колебания става след външно вмешателство и изменение на стационарния аксиален офсет;
- Периодът на ксенонови колебания е около 1 денонощие (25-31 ч);
- Амплитудата на ксенонови колебания нараства с увеличение на дълбочината на изгаряне, т.е. при възникване на ксенонови осцилации амплитудата е по-голяма в края на кампанията, отколкото в началото на кампанията;
- Затихването на осцилациите намалява с увеличение на дълбочината на изгаряне
- За избягване на ксенонови колебания измененията на мощността трябва да стават плавно и със задържане.

Погасяването на възникнали ксенонови колебания се извършва с органите за регулиране (5 група, специална група с малка ефективност която се състои от 4 ОР, включваща и централния ОР) като **основния стремеж по време на преходния процес е величината на офсата да остане близка до съответната стационарна стойност.**

ОТРАВЯНЕ ОТ ¹⁴⁹Sm

Изотопът ¹⁴⁹Sm има сечение при 0.025 eV, равно на 40800 барна и резонансен интеграл при безкрайно разреждане 3400 барна. Веригата на неговото образуване е следната (добивът 1.13 % е за ²³⁵U в топлинни реактори):



Тъй като времето на живот на неодим-149 е много по-малко от времето на живот на прометий-149, за практически цели може да се приеме, че при делене се получава направо ^{149}Pm . Ако $Pm(t)$ и $Sm(t)$ са съответно концентрациите на прометий и самарий в момента t , то в еднотрупово приближение:

$$\frac{dPm}{dt} = \gamma^{Nd} \Sigma_f \Phi(t) - \lambda^{Pm} Pm$$

$$\frac{dSm}{dt} = \lambda^{Pm} Pm - Sm \sigma_a^{Sm} \Phi(t)$$

Решенията на тези уравнения за постоянен поток Φ са:

$$Pm(t) = Pm_{\infty} (1 - \exp(-\lambda^{Pm} t)) + Pm_0 \exp(-\lambda^{Pm} t)$$

$$Sm(t) = Sm_0 \exp(-\sigma_a^{Sm} \Phi t)$$

$$+ Sm_{\infty} (1 - \exp(-\sigma_a^{Sm} \Phi t))$$

$$- \frac{\lambda^{Pm} (Pm_{\infty} - Pm_0)}{\lambda^{Pm} - \sigma_a^{Sm} \Phi} (\exp(-\sigma_a^{Sm} \Phi t) - \exp(-\lambda^{Pm} t))$$

$$Pm_{\infty} = \frac{\gamma^{Nd} \Sigma_f \Phi}{\lambda^{Pm}}$$

$$Sm_{\infty} = \frac{\gamma^{Nd} \Sigma_f \Phi}{\sigma_a^{Sm}}$$

Pm_0 и Sm_0 са концентрациите на ^{149}Pm и ^{149}Sm в нулевия момент, Pm_{∞} и Sm_{∞} са стационарните концентрации на ^{149}Pm и ^{149}Sm при постоянен поток Φ .

Поради голямото си сечение за поглъщане, ^{149}Sm намалява k_{eff} на реактора.

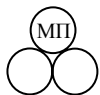
Начало на кампанията

Ако началните концентрации на прометий и самарий при пускането на реактора са нула (тъй като самарият е стабилен, това е вярно само за свежото гориво) и реакторът е работил известно време при постоянен неутронен поток, $Pm(t)$ и $Sm(t)$ ще нарастват с времето. Ако Φ е 5.10^{13} неутрона/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}$), а σ_a^{Sm} е 40800 b, то $\sigma_a^{Sm} \Phi$ става $2.04 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Тъй като $\lambda^{Pm} = 3.56 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, то експонентите в горните изрази ще затихнат след няколко милиона секунди ($10^6 \text{ s} \approx 300$ часа) и ще бъдат достигнати следните равновесни концентрации на ^{149}Pm и ^{149}Sm :

$$Pm_{\infty} = \frac{\gamma^{Nd} \Sigma_f \Phi}{\lambda^{Pm}},$$

$$Sm_{\infty} = \frac{\gamma^{Nd} \Sigma_f \Phi}{\sigma_a^{Sm}}$$

Важно е да се отбележи, че:



а) $\Sigma_a^{Sm} \equiv Sm_{\infty} \sigma_a^{Sm} = \gamma^{Nd} \Sigma_f$, т.е. добивът на неодим е пряка мярка за относителния дял на погълнатите от самария неутрони спрямо погълнатите от делящия се материал.

б) *равновесната концентрация на самарий не зависи от стойността на неутронния поток. От стойността на неутронния поток зависи времето за достигане на равновесна концентрация.*

Спиране на реактора след достигане на равновесната концентрация на самарий

При $\Phi=0$ и Pm_0 и Sm_0 равни на равновесните, резултатът е:

$$Pm(t) = Pm_{\infty} \exp(-\lambda^{Pm} t)$$
$$Sm(t) = Sm_{\infty} + Pm_{\infty} (1 - \exp(-\lambda^{Pm} t))$$

където t е времето след спиране.

Физическият смисъл на тези уравнения е, че към равновесната концентрация на самарий в момента на спирането се добавя превръщащият се в самарий прометий. Тази крайна концентрация *зависи* от стойността на Φ преди спирането и ще се удвои при

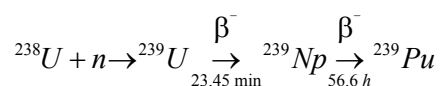
$$\Phi = \frac{\lambda^{Pm}}{\sigma_a^{Sm}} = \frac{3.5 \cdot 10^{-6}}{4.10^{-20}} \approx 0.9 \cdot 10^{14} \text{ n/(cm}^2 \cdot \text{s)}$$

Следователно, когато Φ е малко под 10^{14} , концентрацията на самарий след спирането става около два пъти равновесната.

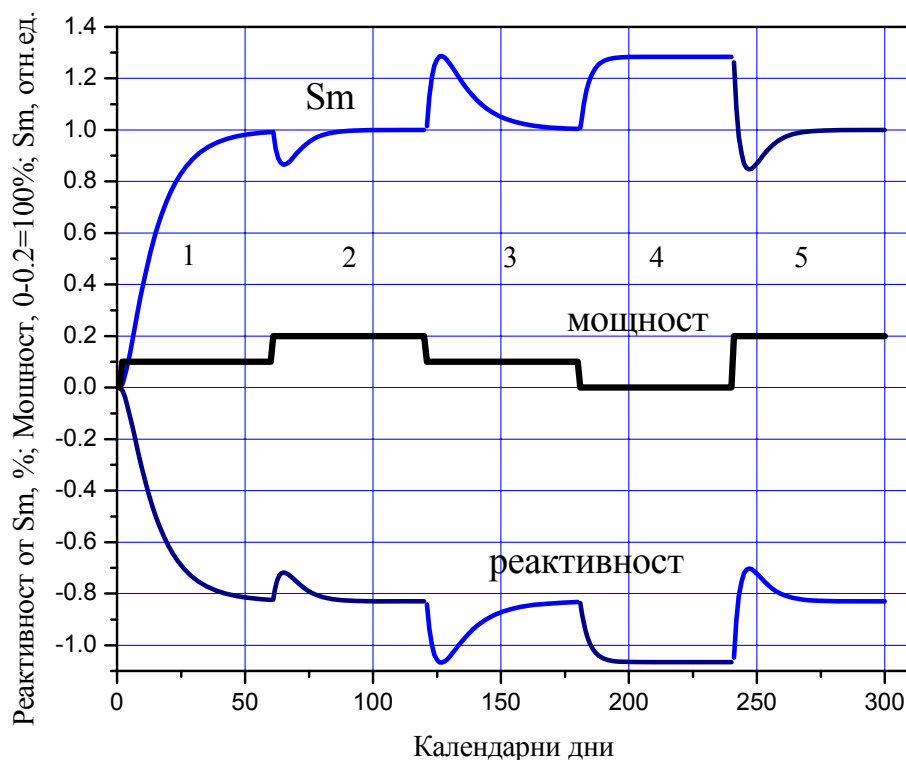
След повторно пускане на реактора допълнителният самарий ще изгори и равновесните условия ще се възстановят.

Това допълнително намаляване на k_{eff} след спиране на реактора се нарича "прометиева яма".

За водно-водните реактори прометиевата яма не се проявява, тъй като ефектът от натрупването на прометий се компенсира от *положителната* реактивност появяваща се от натрупването на делящ се изотоп ^{239}Pu след спиране на реактора образуващ се в следствие на разпадане на ^{239}Np с приблизително същия период на полуразпад както на ^{149}Pm :



На долната фигура е показана зависимостта на отравянето от Sm при описаните по-горе режими.



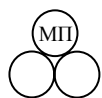
Фиг.8.5. Преходни процеси от ^{149}Sm . Област 1: първа кампания (“свежа зона”), мощност 50%; област 2 – мощност 100%, област 3 – мощност 50%, област 4 – мощност 0, област 5 – мощност 100%.

Равновесното отравяне от самарий е независимо от мощността, при увеличаване на мощността унищожаването на самарий нараства при приток от концентрация на прометий, отговаряща на старата по-ниска мощност. При намаляване на мощността унищожаването намалява при приток от концентрация на прометий, отговаряща на старата по-висока мощност.

Приближението $\rho_{\text{Sm}} \cong -q_{\text{Sm}}$ е твърде неточно при оценка на ефекта от самариевото отравяне върху размножаващите свойства на реактора. Типичните стойности на равновесното отравяне q_{Sm} са под 0.01, а сумата на останалите q в знаменателя $(1+q_{\text{M}}+q_{\text{B}}+q_{\text{C}}+q_{\text{P}})$ е много по-голяма от q_{Sm} , така че на практика ρ_{Sm} може да бъде два пъти по-малко по абсолютна стойност от q_{Sm} .

ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ

1. Кои продукти на делене са отравящи и кои шлаки?



2. Как наличието на отравящи изотопи влияе на коефициента на размножение?
3. Какви са добивите на йод-135 и на ксенон-135 при делене с топлинни неутрони?
4. Какви са периодите на полуразпадане на йод-135 и ксенон-135?
5. Колко е сечението за поглъщане на топлинни неутрони от ксенон-135?
6. Колко е стационарното отравяне от ^{135}Xe за реактори ВВЕР-440 и 1000?
7. За колко време се достига стационарно отравяне от ^{135}Xe ?
8. Защо веднага след увеличаване на мощността концентрацията на Хе намалява?
Защо веднага след намаляване на мощността концентрацията на Хе се увеличава?
9. Обяснете преходните процеси дължащи се на ^{135}Xe при промяна на мощността.
10. Нека в 1 t ядрено гориво от UO_2 с 3.6% обогатяване има 1 g ^{135}Xe . Колко е отравянето от ^{135}Xe ? Приемете сеченията, които са характерни за $T=300^\circ\text{C}$, $\sigma_{\text{aU}235}=681 \text{ b}$, $\sigma_{\text{aU}238}=2.7 \text{ b}$ $\sigma_{\text{Xe}}=2.7 \cdot 10^6 \text{ b}$. Числото на Авогадро е $N_A=6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.
11. С колко трябва да се намали съдържанието на бор в топлоносителя, за да се поддържа критичност при отравяне, ако скоростта на поглъщане на неутрони от отровителя е 10% от скоростта на поглъщане на неутрони в горивото?

Упътване:

Изискването за критичност означава да не се променя k :

$$1 + q_u + q_B = 1 + q_u + q_B - \Delta q_B + q_p$$

$$\Delta q_B = q_p$$

$$\frac{\Delta \Sigma_B}{\Sigma_u} = q_p \frac{\Phi_1}{\Phi_0} = 0.1 \frac{\Phi_1}{\Phi_0}$$

Резултатът зависи от отношението между средния топлинен поток в горивото и в забавителя, което във всички случаи е по-малко от единица. За оценка приемете $\Phi_1 = \Phi_0$.

12. Съставете балансни уравнения за концентрациите на йод-135 и ксенон-135 при работа на реактора.

Упътване:

Балансът на йод-135 е: "натрупване като продукт на деленето" - "разпадане"

Балансът на ксенон-135 е: "натрупване като продукт на деленето" + "натрупване от разпадането на йод-135" - "изгаряне" - "разпадане"

13. Дайте определение за величината аксиален офсет?
14. Как зависи стационарният офсет от мощността на реактора?
15. Как се променя стационарният офсет от ефективните денонция?
16. Обяснете физичната природа на ксеноновите колебания.

17. Какъв е характерният период на ксеноновите колебания?
18. При какви условия могат да възникнат ксенонови колебания?
19. Защо вероятността за възникване на ксенонови колебания нараства в хода на кампанията?
20. Начертайте в относителни единици развитието във времето при преходен процес на намаление на мощността с ОР и възстановяване на мощността след няколко часа на следните параметри:
 - Общата мощност на реактора;
 - Мощността на горната и долната половина на реактора;
 - Концентрациите от Хе в горната и долната половина на реактора;
 - Аксиалния офсет;
 - Височината на 10 група.
21. Каква е стойността на стационарното самариево отравяне и как зависи то от характеристиките на реактора, например от мощността?
22. Защо стационарното отравяне от Sm не зависи от мощността?
23. За колко време се достига стационарно самариево отравяне?
24. Дайте определение за прометиева яма. Каква е дълбочината на прометиевата яма и за колко време се достига?