

Процеси и действия, водещи до непреднамерено въвеждане на реактивност

16. Самопроизволно извеждане или изхвърляне на орган или органи за регулиране при пуск на реактора, при критичен реактор на нулева мощност или при работа на мощност

17. Самопроизволно падане на орган или органи за регулиране при пуск на реактора, при критичен реактор на нулева мощност или при работа на мощност

18. Непреднамерено намаляване на концентрацията на борна киселина в I контур

19. Планово или като последица от погрешни действия въвеждане в работа на неработещ циркуляционен кръг. Включване на ГЦП. Разхлаждане на реактора

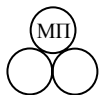
Всяка промяна на реактивността води до промяна в неутронната мощност на реактора. Процесите и действията, водещи до непреднамерено въвеждане на реактивност, включват:

- Самопроизволно извеждане или изхвърляне на орган или органи за регулиране при пуск на реактора, при критичен реактор на нулева мощност или при работа на мощност.
- Самопроизволно падане на орган или органи за регулиране при пуск на реактора, критичен реактор на нулева мощност или при работа на мощност.
- Непреднамерено намаляване на концентрацията на борната киселина в I контур.
- Планово или като последица от погрешни действия въвеждане в работа на неработещ циркуляционен кръг. Включване на ГЦП. Разхлаждане на реактора

Последиците от събития с непреднамерено въвеждане на реактивност зависят от изходното състояние на реактора, от знака на въведената реактивност, от стойността на въведената реактивност и от скоростта на въвеждане на реактивност.

Изходните състояния на реактора могат да бъдат следните:

- а) Критичен реактор на мощност;
- б) Критичен реактор на нулева мощност (без ядрено греене, $N \ll N_{\text{ном}}$);
- в) Подкритичен реактор.



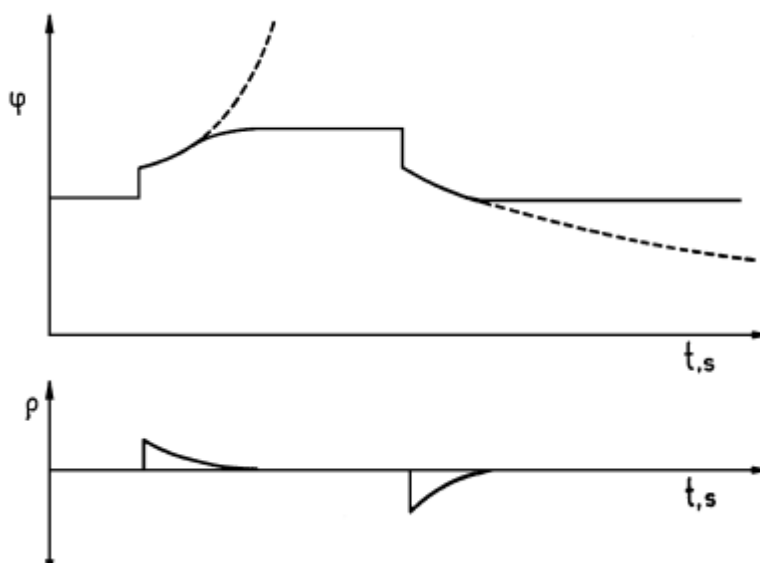
В състояние “критичен реактор на мощност”, ако въведената реактивност не излиза извън границата на управляемост, реакторът без външна намеса се стабилизира на по-високо или по-ниско ниво на мощността.

В състояние “критичен реактор на нулева мощност” липсва стабилизиращата отрицателна обратна връзка по мощност.

Качествено процесите при скокообразно въвеждане на реактивност са показан на Фиг. 16.1. При скокообразна промяна на реактивността на реактор, работещ на мощност, реакторът се стабилизира на по-високо ниво при положителен скок на реактивност. "Внесената" положителна реактивност се компенсира от отрицателна реактивност от отрицателния мощностен ефект. При внесена отрицателна реактивност реакторът се стабилизира на по-ниско ниво на мощност поради освободена положителна реактивност от мощностния ефект. Тези процеси са показани с плътна линия.

При критичен реактор на нулева мощност при въвеждане на положителна реактивност $\rho < \beta_{eff}$ реакторът не се стабилизира, а се наблюдава положителен период. Ако няма външна намеса, стабилизация би могло да се очаква след време, при поява на забележимо ядрено греење и проявяване на отрицателната обратна връзка по мощност.

При критичен реактор на нулева мощност при въвеждане на отрицателна реактивност реакторът преминава в подкритично състояние и неутронната мощност се стабилизира на ниво $\Phi \propto \frac{Sl}{1 - K_{eff}}$, където S е интензитетът на емисия на неутрони от ядреното гориво в следствие на спонтанно делене на уран и трансурани, l е средното време на живот на едно поколение неутрони. Тези процеси са показани с пунктир.



Фигура 16.1. Поведение на критичен реактор на мощност (плътна линия) и критичен реактор на нулева мощност (пунктирна линия) при скокообразно въвеждане на положителна и отрицателна реактивност.

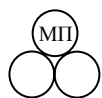
16. Самопроизволно извеждане или изхвърляне на орган или органи за регулиране при поддържане на нулева мощност или работа на мощност.

При събитие с извеждане или изхвърляне на ОР се достига най-високата възможна скорост на въвеждане на положителна реактивност.

Ако реакторът е на мощност, при самопроизволно извеждане или изхвърляне на ОР се достига стабилизация на по-високо ниво на мощност. Ако реакторът е на нулева мощност, при самопроизволно извеждане или изхвърляне на ОР се наблюдава положителен период и увеличение на неутронната мощност.

Голямата положителна реактивност на един орган за регулиране може да се избегне конструктивно – ОР да са конструирани така, че всеки един от тях да е с малка ефективност, което означава много на брой ОР. При ОР с дадена ефективност такива събития се избягват чрез технологичния регламент: забранява се реакторът да се намира в критично състояние и регулиращата група да е по-ниско от определена височина. При това положение ефективността на отделен орган за регулиране е ограничена до стойности осигуряващи управляемост на реактора.

В някои условия извеждането на ОР може да доведе до внасяне на около $1 \beta_{eff}$ или значително повече реактивност, и то за много кратко време. Това може да се получи, ако



другите ОР са потопени в активната зона въз основа на ефекта на преразпределение на неутронния поток. При такова положение на ОР реакторът е дълбоко подкритичен според ТР. Достигане на критичност чрез водообмен се извършва *след* вдигане на ОР.

Пример 1: Самопроизволно извеждане или изхвърляне на ОР

а) Реакторът е на **мощност 90% $N_{\text{ном}}$** . При самопроизволно изхвърляне на ОР е въведена положителна реактивност от 0.04 %. С колко MW (топлинни) ще се увеличи мощността, ако $\partial\rho/\partial N = -5 \times 10^{-4} \text{ \%/MW}$ (За ВВЕР-440 оценете с $\partial\rho/\partial N = -1 \times 10^{-3} \text{ \%/MW}$)?

Въведената положителна реактивност от изхвърления орган за регулиране $\Delta\rho$ ще се компенсира от отрицателния мощностен ефект $\Delta N \partial\rho/\partial N$, където ΔN е промяната в мощността:

$$\Delta\rho + \Delta N \frac{\partial\rho}{\partial N} = 0, \text{ или} \quad 16.1$$

$$\Delta N = \frac{-\Delta\rho}{\partial\rho/\partial N}$$

$$\Delta N = \frac{-0.04}{-5 \times 10^{-4}} = 80 \text{ MW}$$

При работа на АРМ въведената положителна реактивност ще се компенсира с движение на работната група надолу:

б) Реакторът е на **нулева мощност**. При самопроизволно изхвърляне на ОР е въведена положителна реактивност от 0.04 %. С какъв асимптотичен период се увеличава неутронният поток, колко е мигновеният скок?

В състояние критичен реактор без обратни връзки *в приближение за една усреднена група закъсняващи неутрони*, при въвеждане на реактивност ρ поведението във времето на неутронният поток Φ е:

$$\Phi(t) = \frac{\Phi_0}{\beta - \rho} \left\{ \beta \exp\left(\frac{\rho}{\beta - \rho} \frac{t}{\tau}\right) - \rho \exp\left(-(\beta - \rho) \frac{t}{l}\right) \right\} \quad 16.2$$

където:

τ е средното време на живот на ядрата предшественици на закъсняващи неутрони, $\tau = 1/\lambda$, $\tau \approx 13 \text{ s}$, λ е усреднената константа на разпад на всички групи закъсняващи неутрони, l е средното време на живот на мигновените неутрони, за реактор ВВЕР $l \approx 5 \times 10^{-5} \text{ s}$.

Асимптотичният период при въвеждане на положителна реактивност е положителен и е равен на:

$$T = \tau \frac{\beta - \rho}{\rho} = \tau \left(\frac{\beta}{\rho} - 1 \right) \quad 16.3$$

При зададената стойност за ρ за асимптотичния период се получава:

$$T = \tau \left(\frac{\beta}{\rho} - 1 \right) = \tau \left(\frac{0.65}{0.04} - 1 \right) = 198 \text{ s} \quad 16.4$$

При въвеждане на положителна реактивност $\rho < \beta$ за време, например около или по-малко от 1 s, втората експонента достига пренебрежимо малка стойност, първата експонента е приблизително 1. Веднага след въвеждане на положителната реактивност неутронния поток се изменя със скок:

$$\Phi(t) = \frac{\Phi_0 \beta}{\beta - \rho}, \quad \frac{\Phi(t)}{\Phi_0} = \frac{1}{1 - \frac{\rho}{\beta}} = 1.066 \quad 16.5$$

При самопроизволно движение на или изхвърляне на **група ОР**, ако сумарната въведена реактивност е под 1β (граница на управляемост на реактора) се достига до значителни промени на мощността при работа на мощност и към период на увеличение на неутронната мощност при нулева мощност. Ако приемем, че в движението са участвали 7 ОР, то $\rho = 7 \times 0.04 \% = 0.28\%$.

Тогава оценката е:

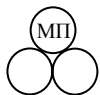
$$\Delta N = \frac{-0.28}{-5 \times 10^{-4}} = 560 \text{ MW при работа на мощност,} \quad 16.6$$

$$T = \tau \left(\frac{\beta}{\rho} - 1 \right) = \tau \left(\frac{0.65}{0.28} - 1 \right) = 17.2 \text{ s при работа на нулева мощност}$$

В състояние критичен реактор на нулева мощност е необходимо да бъде осигуряван надежден контрол по неутронен поток за осъществяване на защита по период. Без контрол на неутронния поток са възможни т.н. пускови аварии при бързо въвеждане на положителна реактивност.

17. Самопроизволно падане на орган или органи за регулиране при пуск на реактора, при критичен реактор на нулева мощност или при работа на мощност.

Ако реакторът е на мощност при самопроизволно падане на ОР се достига стабилизация на по-ниско ниво на мощност.



Ако реакторът е на нулева мощност при самопроизволно падане на ОР се наблюдава отрицателен период и намаление на неутронната мощност. Реакторът преминава в подкритично състояние. **Неутронната мощност спада до ниво, определено от собствения източник на неутрони и коефициента на размножение на подкритичния реактор.**

Пример 2: Самопроизволно падане на ОР

а) Реакторът е на мощност 90% $N_{\text{ном}}$. При самопроизволно падане на ОР е въведена отрицателна реактивност от -0.04 %. С колко MW ще се намали мощността, ако $\partial \rho / \partial N = -5 \times 10^{-4} \% / \text{MW}$?

Въведената отрицателна реактивност от падналия орган за регулиране $\Delta \rho$ ще се компенсира от мощностния ефект $\Delta N \partial \rho / \partial N$, където ΔN е промяната в мощността:

$$\Delta \rho + \Delta N \frac{\partial \rho}{\partial N} = 0, \quad 17.1$$

или

$$\Delta N = \frac{-\Delta \rho}{\frac{\partial \rho}{\partial N}}$$

$$\Delta N = \frac{0.04}{-5 \times 10^{-4}} = -80 \text{ MW}$$

За реактор ВВЕР-440 падането на сборка горивна касета/поглъщаща наставка води до образуване на голям воден обем в активната зона. Наличието на вода води до повишаване на мощността в съседните 6 касети и с голяма вероятност до масовото им разгерметизиране, ако операторът не забележи падането на сборката.

б) Реакторът е на нулева мощност. При самопроизволно падане на ОР е въведена отрицателна реактивност от -0.04 %. С какъв асимптотичен период намалява неутронният поток, колко е мигновеният скок, на какво ниво на неутронния поток се установява?

При самопроизволно падане на ОР при реактор на нулева мощност реакторът преминава в подкритично състояние.

Асимптотичния период при въвеждане на отрицателна реактивност е отрицателен и при зададената стойност на ρ за асимптотичния период се получава:

$$T = \tau \left(\frac{\beta}{\rho} - 1 \right) = \tau \left(\frac{0.65}{-0.04} - 1 \right) = -224 \text{ s} \quad 17.2$$

При въвеждане на отрицателна реактивност $\rho < \beta$ за време, например около или по-малко от 1 s, втората експонента достига пренебрежимо малка стойност, първата експонента

е приблизително 1. Веднага след въвеждане на отрицателната реактивност неутронният поток се изменя със скок:

$$\Phi(1\text{ s}) = \frac{\Phi_0 \beta}{\beta - \rho}, \quad \frac{\Phi(1\text{ s})}{\Phi_0} = \frac{1}{1 + \frac{\rho}{\beta}} = 0.94 \quad 17.3$$

При критичен реактор на нулева мощност при въвеждане на отрицателна реактивност реакторът преминава в подкритично състояние. Неутронната мощност се стабилизира на ниво $\Phi = \frac{Sl}{1 - K_{eff}}$, където S е емисията на неутрони за единица време от ядреното гориво в следствие на спонтанно делене на уран и трансурани, l е средното време на живот на едно поколение неутрони с отчитане на закъсняващите неутрони, $l \approx \tau\beta \approx 0.1\text{ s}$. Емисията на неутрони от спонтанното делене на уран (свежо гориво) и трансурани (натрупани в работило гориво) нормирани за един тон метал е приблизително $1.6 \times 10^4\text{ n/s.t}$ (свежо) и $\sim 2 \times 10^8\text{ n/s.t}$ (работило гориво, дълбочина на изгаряне 30 MWd/kgU, отстояване няколко месеца).

При $K_{eff} = 1 - 0.0004 = 0.9996$ и работило гориво, нивото, на което се установява броят неутрони излъчени за 1 s от един тон ядрено гориво в реактора е

$$\Phi = \frac{2 \times 10^8 \times 0.1}{1 - 0.9996} = 5 \times 10^{10}\text{ n/s.t.}$$

Ако реакторът е в подкритично състояние при падане на ОР, реакторът ще премине в по-дълбока подкритичност.

Например при подкритичност -1% , работило гориво, дълбочина на изгаряне 30 MWd/kgU, отстояване няколко месеца, първото ниво на неутронна мощност е

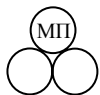
$$\Phi = \frac{2 \times 10^8 \times 0.1}{1 - 0.99} = 2 \times 10^9\text{ n/s.t.}$$

$$\Phi = \frac{2 \times 10^8 \times 0.1}{1 - (0.99 - 0.0004)} = 1.9 \times 10^9\text{ n/s.t.}$$

За случаите, описани в раздели 16 и 17, разглежданията са направени без да се отчита работата на АРМ или сработване на защита.

18. Непреднамерено намаляване на концентрацията на борната киселина в I контур.

Намаляването на концентрацията на борната киселина може да се случи а) при работа на мощност, б) в състояние критичен реактор на нулева мощност с принудителна



циркуляция, и в) в състояние на реактора в режим на естествена циркуляция, включително отворен за презареждане.

При намаление на концентрацията на борната киселина при работа на мощност, реакторът ще повиши мощността си и ще се стабилизира на по-високо ниво на мощност, ако липсва реакция от оператора или АРМ. Ако автоматичния регулатор на мощността е включен, ще се наблюдава спускане на регулиращата група и поддържане на мощността.

Съществено е обстоятелството, че поради работата на ГЦП няма локални обеми в I контур с по-ниска концентрация на борна киселина, топлоносителят е хомогенизиран.

18.1 Намаляване на концентрацията на борната киселина при работа на мощност и в състояние критичен реактор на нулева мощност

Пример 3: Въвеждане на чист кондензат

а) Реакторът е на мощност 90% $N_{ном}$. При въвеждане на чист кондензат концентрацията на борна киселина е намалена с $\Delta C_B = -0.01$ g/kg. С колко MW ще се увеличи мощността, ако $\partial \rho / \partial N = -5 \times 10^{-4}$ %/MW и $\partial \rho / \partial C_B = -1.5$ %/g.kg⁻¹?

Ако АРМ работи, с колко ще се спусне регулиращата група, ако $\partial \rho / \partial H = 2 \times 10^{-3}$ %/cm.

Въведената положителна реактивност от намаление на концентрацията на борна киселина ρ ще се компенсира от мощностния ефект $\Delta N \partial \rho / \partial N$, където ΔN е увеличението на мощността:

$$\rho + \Delta N \frac{\partial \rho}{\partial N} = 0, \quad \rho = \Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B}, \quad \text{или} \quad 18.1$$

$$\Delta N = \frac{-\Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B}}{\partial \rho / \partial N}, \quad \Delta N = \frac{-0.015}{-5 \times 10^{-4}} = 30 \text{ MW}$$

При работа на АРМ въведената положителна реактивност от намалението на борната киселина ще се компенсира с движение на работната група надолу:

$$\Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B} + \Delta H \frac{\partial \rho}{\partial H} = 0 \quad 18.2$$

$$\Delta H = \frac{-\Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B}}{\frac{\partial \rho}{\partial H}} = -7.5 \text{ cm}$$

б) Реакторът е **на нулева мощност**. При въвеждане на чист кондензат концентрацията на борна киселина е намалена с $\Delta C_B = -0.01 \text{ g/kg}$. Какъв ще бъде периодът на реактора, ако $\partial \rho / \partial C_B = -1.5 \text{ \%/g.kg}^{-1}$?

При намаляване на концентрацията на борна киселина се въвежда положителна реактивност и при нулева мощност се появява положителен период. Въведената положителна реактивност е $\rho = \Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B}$

$$T = \tau \left(\frac{\beta}{\rho} - 1 \right) = \tau \left(\frac{0.65}{0.015} - 1 \right) = 563 \text{ s} \quad 18.3$$

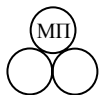
18.2 Намаляване на концентрацията на борната киселина в състояние на реактора в режим на естествена циркулация

При въвеждане на чист кондензат в режим на естествена циркулация не се извършва добро смесване на водата и е възможно преминаване през активната зона на вода с концентрация на борната киселина много ниска или почти нулева. **При това е възможно в локален обем да възникне критично или надкритично състояние.** Такава ситуация може да се получи при затворен реактор и при отворен за презареждане реактор.

Пример 4: Преминаване на чист кондензат през АЗ в режим на естествена циркулация

След презареждане коефициентът на размножение в студено състояние е 1.22. ОР са в АЗ. Нека разгледаме случай за ефективност на ОР $\rho_{СУЗ} = -10 \text{ \%}$ (ефективността на ОР в студено състояние е по-ниска). Концентрацията на борната киселина е 12 g/kg , $\frac{\partial \rho}{\partial C_B} = -1.7 \text{ \%/g/kg}$.

През реактора преминава “мехур” от чист кондензат. Какъв ще бъде ефектът от преминаването на чиста вода през зоната?



Описаният случай е възможно най-тежката ситуация от въвеждане на чиста вода в I контур. Ако размерите на “мехура” от чист кондензат са ≥ 1 m, то в тази зона може да се достигне критичност или дори надкритичност.

Реактивността на реактора при наличие на борна киселина в проценти е:

$$\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}} \times 100 + \rho_{суз} + C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B} = 18 - 10 - 20.4 = -12.4 \% \quad 18.4$$

Без борна киселина реактивността на реактора е:

$$\rho = \frac{K_{eff} - 1}{K_{eff}} \times 100 + \rho_{суз} = 18 - 10 = +8 \% \quad 18.5$$

Единствените ефекти, които ще ограничат нарастването на неутронния поток, са отрицателният температурен ефект на горивото и в по-късна фаза кипенето на водата. Възможни са повреди на горивото.

19. Планово или като последица от погрешни действия въвеждане в работа на неработещ циркуляционен кръг. Включване на ГЦП

19.1. Планово или като последица от погрешни действия въвеждане в работа на неработещ циркуляционен кръг при ВВЕР-440.

Поради наличието на главни запорни задвижки при ВВЕР-440 е възможно да се изолират един или повече кръга. При това изолиране е възможно да се измени температурата в кръга. Възможно е също така след време концентрацията на борната киселина да се различава от концентрацията в действащите кръгове. Например, ако след изолирането се намали мощността на реактора, концентрацията в действащите кръгове ще бъде увеличена, в изолирания кръг ще остане по-ниска.

Ако планово или като последица от погрешни действия се въведе неработещ кръг, е възможно да се въведе реактивност по два канала – по температура и по концентрация на борна киселина.

Пример 5: Въвеждане на неработещ кръг

Изолиран е кръг. Температурата в кръга се е понижила с 10°C спрямо средната температура на I контур. Концентрацията на борната киселина е същата както в I контур. Реакторът е на $50\%N_{\text{ном}}$, разглеждаме по-тежкия случай за края на кампанията, когато

коэффициентът на реактивност по температура е най-голям, $\partial \rho / \partial T = -5 \times 10^{-2} \% / ^\circ \text{C}$. Нека обемът на изолирания кръг е 1/10 от обема на I контур. Какви ще бъдат последствията?

При въвеждане на изолирания кръг температурата в I контур ще се понижи с 1°C . Ако АРМ не работи, реакторът ще се стабилизира на ново по-високо ниво на мощност, ако АРМ работи, ОР от 6-та група ще се спуснат надолу. Нека $\partial \rho / \partial N = -1.2 \times 10^{-3} \% / \text{MW}$, $\partial \rho / \partial H = 2 \times 10^{-3} \% / \text{cm}$.

а) АРМ не е включен:

$$\rho + \Delta N \frac{\partial \rho}{\partial N} = 0, \quad \rho = \Delta T \frac{\partial \rho}{\partial T}, \quad \text{или} \quad 19.1$$

$$\Delta N = \frac{-\Delta T \frac{\partial \rho}{\partial T}}{\partial \rho / \partial N} = \frac{-5 \times 10^{-2}}{-1.2 \times 10^{-3}} = 42 \text{ MW}$$

б) АРМ е включен:

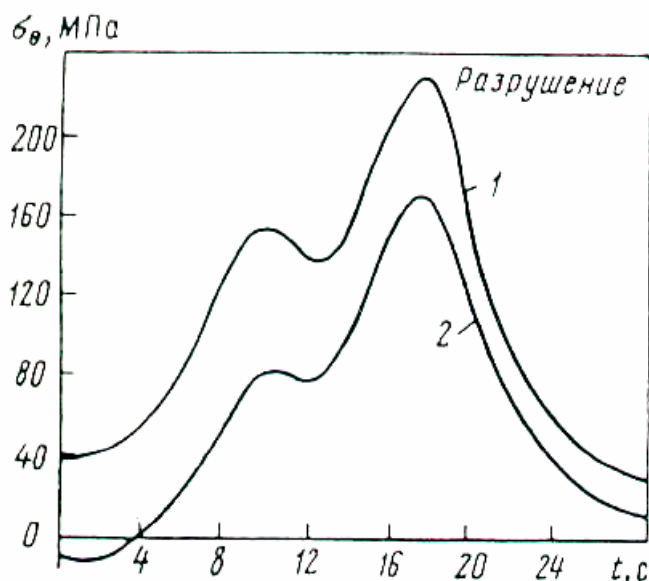
$$\Delta T \frac{\partial \rho}{\partial T} + \Delta H \frac{\partial \rho}{\partial H} = 0 \quad 19.2$$

$$\Delta H = \frac{-\Delta T \frac{\partial \rho}{\partial T}}{\frac{\partial \rho}{\partial H}} = -6 \text{ cm}$$

19.2 Включване на ГЦП при ВВЕР-1000

При включване на изключена помпа на ВВЕР-1000 постъпва импулсно голямо количество вода и температурата на активната зона рязко намалява. Поради отрицателния температурен ефект мощността на реактора се увеличава, като мощността се ограничава само от мощностния ефект. Настъпва бърз преходен процес с резки промени на мощността и температурата на горивото. Поради два пъти по-големия коэффициент на разширение на урановия двуокис отколкото на циркониевата обвивка, взаимодействието таблетка-обвивка става много интензивно при времена много по-къси от времето на релаксация на това взаимодействие. Моделирането на процеса показва, че ако мощността на реактора не бъде намалена преди включване на спряна главна циркуляционна помпа, усилието отвътре достига стойности близки до усилията, които може да издържи циркониевата обвивка преди да се разкъса. За мощности над $30 \% N_{\text{ном}}$ вероятността за повреда на обвивката на ТОЕ е значителна. На Фиг. 19.1 е показано развитието във времето на усилието отвътре навън (взаимодействие таблетка-обвивка) при включване на ГЦП от начално състояние $40 \% N_{\text{ном}}$ -

1, и 30 %N_{ном} - 2. Усилие от 200 МПа се счита за усилие, при което циркониевата обвивка се разкъсва.



Фигура 19.1. Развитие във времето на усилието от външен навън (взаимодействие таблетка-обвивка) при включване на ГЦП от начално състояние 40 %N_{ном} – 1, и 30 %N_{ном} - 2. Усилие от 200 МПа се счита за критично усилие, при което циркониевата обвивка се разкъсва.

19.3. Разхлаждане на реактора

При спиране на реактора подкритичността се осигурява от спуснатите ОР и въвеждането на борна киселина съгласно наредба No.3, член 31:

“Поне една от предвидените независими системи за въздействие върху реактивността да осигурява преминаване от всяко състояние на нормална експлоатация в подкритично състояние и да поддържа това състояние като се вземе под внимание възможното освобождаване на реактивност при продължително разхлаждане при всякакви нормални условия и отчитани изходни събития, в съответствие с принципа на единичния отказ в дадената система и при незадействане на един най-ефективен орган на реактивността.”

Нека при спиране на реактора всички органи за регулиране да са достигнали до долно положение. Нека допуснем невъвеждане на борна киселина (техническа или човешка грешка). При това реакторът се разхлажда. **Възможно ли е да се достигне повторна критичност след като реакторът вече е бил приведен в подкритично състояние? Да възможно е.**

Пример 6:

Нека приемем край на кампанията, когато ТКР е най-голям по абсолютна стойност. Ако разхлаждането става веднага след спирането може да не се отчита отравянето от Хе-135. Ако разхлаждането става след 30 часа след спирането, положението допълнително се усложнява от разотравянето от Хе-135.

Нека приемем един усреднен температурен коефициент на реактивност в областта от около 100 °C под средната температура на I контур при нормална експлоатация, $\partial \rho / \partial T = -4 \times 10^{-2} \% / ^\circ \text{C}$. При спиране на реактора реактивността е:

$$\rho = \rho_{\text{СУЗ}} + \rho_{\text{МЕ}} + \rho_{\text{ТЕ}}(15 \div 30) \quad 19.3$$

където

$\rho_{\text{МЕ}} + \rho_{\text{ТЕ}}(15 \div 30)$ са бързопроявяващите се ефекти на реактивност, $\rho_{\text{МЕ}}$ е освободеният мощностен ефект, $\rho_{\text{ТЕ}}(15 \div 30)$ е освободеният температурен ефект от намаление на температурата с 15-30 °C. При ВВЕР-1000 при спиране от 100 % $N_{\text{НОМ}}$ има и малък паров ефект.

Ако например $\rho_{\text{СУЗ}} = -8 \%$, $\rho_{\text{МЕ}} = 1.7 \%$, $\rho_{\text{ТЕ}}(15 \div 30) = 0.8 \%$, критичност ще настъпи при намаление на температурата с ΔT :

$$\rho = \rho_{\text{СУЗ}} + \rho_{\text{МЕ}} + \rho_{\text{ТЕ}}(15 \div 30) + \Delta T \frac{\partial \rho}{\partial T} = 0 \quad 19.4$$

$$\Delta T = - \frac{\rho_{\text{СУЗ}} + \rho_{\text{МЕ}} + \rho_{\text{ТЕ}}(15 \div 30)}{\frac{\partial \rho}{\partial T}} = -137 ^\circ \text{C}$$

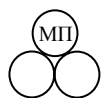
Повторна критичност ще настъпи след охлаждане до около $260 - 137 = 123 ^\circ \text{C}$.

Ако има намаление на температурата и пълно разотравяне от Хе-135, то уравнението за критичност ще има вида:

$$\rho = \rho_{\text{СУЗ}} + \rho_{\text{МЕ}} + \rho_{\text{ТЕ}}(15 \div 30) + \rho_{\text{Хе}} + \Delta T \frac{\partial \rho}{\partial T} = 0 \quad 19.5$$

$$\Delta T = - \frac{\rho_{\text{СУЗ}} + \rho_{\text{МЕ}} + \rho_{\text{ТЕ}}(15 \div 30) + \rho_{\text{Хе}}}{\frac{\partial \rho}{\partial T}}$$

При освободена реактивност от Хе-135, $\rho_{\text{Хе}} = 2.9 \%$, $\Delta T = -65 ^\circ \text{C}$.



ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ:

1. Каква е основната разлика между състоянията “критичен реактор на мощност” и “критичен реактор на нулева мощност” по отношение на наличието на стабилизираща обратна връзка.
2. Какво се наблюдава при критичен реактор на нулева мощност при въвеждане на положителна реактивност? Какво се наблюдава при критичен реактор на нулева мощност при въвеждане на отрицателна реактивност?
3. Какво се наблюдава при реактор на мощност при въвеждане на положителна реактивност? Какво се наблюдава при реактор на мощност при въвеждане на отрицателна реактивност?
4. Реакторът е на мощност $90\% N_{\text{ном}}$. При самопроизволно изхвърляне на ОР е въведена положителна реактивност от 0.03 . С колко MW ще се увеличи мощността, ако $\partial \rho / \partial N = -4 \times 10^{-4} \% / \text{MW}$?
5. Реакторът е на нулева мощност. При самопроизволно изхвърляне на ОР е въведена положителна реактивност от 0.03% . С какъв асимптотичен период се увеличава неутронният поток, колко е мигновеният скок?
6. Какво се наблюдава при движение или изхвърляне на група ОР? Приемете стойностите от горната задача за 7 ОР.
7. Какво се наблюдава при самопроизволно падане на орган или органи за регулиране при критичен реактор на нулева мощност? При работа на мощност?
8. Реакторът е на мощност $90\% N_{\text{ном}}$. При самопроизволно падане на ОР е въведена отрицателна реактивност от -0.035% . С колко MW ще се намали мощността, ако $\partial \rho / \partial N = -4.5 \times 10^{-4} \% / \text{MW}$?
9. Реакторът е на нулева мощност. При самопроизволно падане на ОР е въведена отрицателна реактивност от -0.035% . С какъв асимптотичен период намалява неутронният поток, колко е мигновеният скок, на какво ниво на неутронния поток се установява?
10. Реакторът е на мощност $90\% N_{\text{ном}}$. При въвеждане на чист кондензат концентрацията на борна киселина е намалена с $\Delta C_B = -0.005 \text{ g/kg}$. С колко MW ще се увеличи мощността, ако $\partial \rho / \partial N = -4.5 \times 10^{-4} \% / \text{MW}$ и $\partial \rho / \partial C_B = -1.6 \% / \text{g.kg}^{-1}$?

11. Реакторът е на нулева мощност. При въвеждане на чист кондензат концентрацията на борна киселина е намалена с $\Delta C_B = -0.005 \text{ g/kg}$. Какъв ще бъде периодът на реактора, ако $\partial \rho / \partial C_B = -1.6 \text{ \%/g.kg}^{-1}$?
12. Каква е една от основните опасности при намаляване на концентрацията на борната киселина в състояние на реактора в режим на естествена циркулация?
13. Какви ще бъдат ефектите при въвеждане на неработещ кръг с температура с 10°C по-ниска спрямо средната температура на I контур? Концентрацията на борната киселина е същата както в I контур. Реакторът е на $50\% N_{\text{ном}}$, $\partial \rho / \partial T = -4 \times 10^{-2} \text{ \%/}^\circ\text{C}$. Нека обемът на изолираният кръг е $1/10$ от обема на I контур.
14. Защо според ТР за 5 и 6 блок се изисква намаляване на мощността при включване на изключена ГЦП? Какви могат да бъдат последствията?
15. Какво е това явление “повторна критичност”? Оценете температурата на повторна критичност при разхлаждане за ВВЕР-440 и ВВЕР-1000. Приемаме, че започва разхлаждане след 3 дни (разотровен реактор). Приемете усреднен температурен коефициент на реактивност в областта от около 100°C под средната температура на I контур при нормална експлоатация, $\partial \rho / \partial T = -4.5 \times 10^{-2} \text{ \%/}^\circ\text{C}$.