

## 9. Коефициенти и ефекти на реактивността, зависимост от параметрите и режима на работа на реактора.

### 1. Коефициенти и ефекти на реактивността

Коефициентът на размножение  $K$  зависи от технологичните условия на работа – температура, мощност, концентрация на борната киселина, височина на органите за регулиране, ефективни денонощия и др. За отчитане на условията на работа върху  $K$  или реактивността са дефинирани величините *коефициенти и ефекти на реактивност*.

Коефициентите и ефектите на реактивност се представят в отчетите по “Неутронно-физически характеристики на активната зона” за всяко зареждане, тъй като съществуват малки различия при всяка схема на зареждане.

**Коефициент на реактивност** по даден параметър (температура, мощност, ...) се нарича частната производна на реактивността по този параметър при постоянство на всички останали параметри:

$$\text{коефициент на реактивност по параметър } \alpha = \left. \frac{\partial \rho}{\partial \alpha} \right|_{\beta, \gamma, \delta, \dots = \text{const}} \quad 9.1$$

При промяна на параметъра  $\alpha$  от значение  $\alpha_1$  до  $\alpha_2$  се наблюдава **ефект на реактивността** по параметър  $\alpha$  при постоянство на всички останали параметри:

$$\text{ефект на реактивност по параметър } \alpha = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left. \frac{\partial \rho}{\partial \alpha} \right|_{\beta, \gamma, \delta, \dots = \text{const}} d\alpha \quad 9.2$$

Ако коефициентът на реактивност по даден параметър не зависи от текущото значение на параметъра, то тогава:

$$\text{ефект на реактивност по параметър } \alpha = \left. \frac{\partial \rho}{\partial \alpha} \right|_{\beta, \gamma, \delta, \dots = \text{const}} (\alpha_2 - \alpha_1)$$

Горното приближение е вярно за някои случаи, но е неприложимо например за температурния ефект и мощностния ефект, тъй като съответните коефициенти зависят от текущото значение на температурата (температурен коефициент на реактивност) и мощността (мощностен коефициент на реактивност).

В неутронно-физичните характеристики на активната зона, изготвяни преди всяко презареждане, се дават следните коефициенти на реактивност:



$\partial\rho/\partial t_{H_2O}$  – коефициент на реактивност по температура на топлоносителя, включващ и изменението на плътността му при постоянни: мощност, концентрация на борната киселина, отравяне, изгаряне, температура на горивото;

$\partial\rho/\partial t_U$  - коефициент на реактивност по температура на горивото при постоянни: температура и плътност на топлоносителя, концентрация на борната киселина, отравяне, изгаряне;

$\partial\rho/\partial \gamma_{H_2O}$  - коефициент на реактивност по плътност на топлоносителя при постоянни: мощност, температура на топлоносителя и горивото, концентрация на борната киселина, отравяне, изгаряне;

$\partial\rho/\partial N_T$  - коефициент на реактивност по топлинна мощност при постоянни: температура на топлоносителя на входа на активната зона, отравяне, изгаряне. В изчисления мощностен коефициент на реактивност, освен същинския мощностен коефициент дължащ се на повишаване на температурата на горивото, е включено и влиянието от изменението на средната температура на зоната при повишаване или намаляване на мощността;

$\partial\rho/\partial C_{H_3BO_3}$  - коефициент на реактивност по концентрация на борната киселина при постоянни температура на топлоносителя и горивото, мощност, отравяне, изгаряне.

## 2. Влияние на температурата и мощността върху реактивността

За изясняване на природата на коефициентите на реактивността ще използваме едно илюстративно представяне на  $k_{eff}$ .

Ако  $k_{\infty}$  е коефициентът на размножение за реактор с безкрайна решетка от елементарни клетки, то  $k_{eff} \equiv k_{\infty} \cdot P_f \cdot P_{th}$ , където  $P_f$  е вероятността неутроните в процеса на забавянето си да не напуснат активната зона, а  $P_{th}$  е вероятността забавилите се до топлинни енергии неутрони да не напуснат активната зона в процеса на дифузия. От теорията на Ферми за забавянето на неутроните следва, че  $P_f = \exp(-B^2 \tau)$ , а от аналитичното решаване на едноруповото дифузионно уравнение за хомогенна област следва, че  $P_{th} = \frac{1}{1 + B^2 L^2}$ .

$\tau$  е възрастта на топлинните неутрони и е една шеста част от средния квадрат на разстоянието по права линия, което неутронът изминава от мястото на възникването му при делене докато се забави до енергия  $\approx 0.025$  eV.

$L^2 \equiv D/\Sigma_a$  е квадратът на дължината на дифузия на топлинните неутрони, т.е. средният квадрат на разстоянието по права линия, което неутронът изминава от мястото на забавянето му до топлинна енергия до мястото на поглъщането му.

$B^2$  е т.нар. "геометричен параметър" на активната зона и за цилиндрична зона е  $\left(\frac{2.405}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$ , където  $R$  и  $H$  са радиусът и височината на активната зона.

$k_\infty$  може да се представи чрез класическите четири множителя:  $k_\infty = \epsilon p f \eta$ . Поради това, че за големите енергетични реактори  $B^2$  е малко число,  $k_{eff} \equiv k_\infty \frac{\exp(-B^2 \tau)}{1 + B^2 L^2} \cong k_\infty \exp(-B^2 M^2)$ , където  $M^2 \equiv \tau + L^2$  е *плочта на миграция* на неутроните.

### Температурен коефициент на реактивността

Нека  $\theta$  е средната температура на активната зона. Температурният коефициент на реактивността е  $\alpha_\theta \equiv \frac{\partial \rho}{\partial \theta}$ . Тъй като  $\rho \equiv (k_{eff} - 1) / k_{eff}$ , за

$$k_{eff} \cong 1, \rho \cong k_{eff} - 1 \cong \ln k_{eff}, \alpha_\theta \cong \frac{1}{k_{eff}} \frac{\partial k_{eff}}{\partial \theta}$$

Следователно:

$$\begin{aligned} \alpha_\theta &= \frac{\exp(B^2 M^2)}{k_\infty} \frac{\partial k_{eff}}{\partial \theta} \\ &= \frac{\exp(B^2 M^2)}{k_\infty} \left[ \frac{\partial k_{eff}}{\partial k_\infty} \frac{\partial k_\infty}{\partial \theta} + \frac{\partial k_{eff}}{\partial B^2} \frac{\partial B^2}{\partial \theta} + \frac{\partial k_{eff}}{\partial M^2} \frac{\partial M^2}{\partial \theta} \right] \quad 9.3 \\ &= \frac{\exp(B^2 M^2)}{k_\infty} \left[ \exp(-B^2 M^2) \frac{\partial k_\infty}{\partial \theta} + k_\infty \exp(-B^2 M^2) (-M^2) \frac{\partial B^2}{\partial \theta} + k_\infty \exp(-B^2 M^2) (-B^2) \frac{\partial M^2}{\partial \theta} \right] \\ &= \frac{1}{k_\infty} \frac{\partial k_\infty}{\partial \theta} - M^2 \frac{\partial B^2}{\partial \theta} - B^2 \frac{\partial M^2}{\partial \theta} \end{aligned}$$

Тъй като обемът на активната зона практически не се изменя с температурата, то  $B^2 = \text{const.}$  и за  $\alpha_\theta$  се получава:

$$\alpha_\theta = \frac{1}{k_\infty} \frac{\partial k_\infty}{\partial \theta} - B^2 \frac{\partial M^2}{\partial \theta} \quad 9.4$$

След заместване на  $k_\infty$  с четирите множителя, окончателният вид на  $\alpha_\theta$ , който подлежи на анализ, е:



$$\alpha_0 = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial \theta} + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial \theta} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} - B^2 \frac{\partial M^2}{\partial \theta} \quad 9.5$$

Изменението на параметрите в (9.5) при промяна на температурата се обуславя от два фактора:

а) промяна на микроскопичните сечения;

б) изменение на плътностите  $\gamma_i$  на материалите в реактора и оттам на техните ядрени концентрации, което води до промени на макроскопичните сечения  $\Sigma_i = \sigma_i N_i = \sigma_i \gamma_i N_A / A$  ( $N_A$  е числото на Авогадро, а  $A$  е атомната маса).

Съответно на тези два фактора температурният ефект се разделя на две компоненти:

а) ядрен температурен коефициент на реактивността  $\alpha_0^{\gamma=\text{const.}}$ , определящ зависимостта на реактивността от микроскопичните сечения при постоянни плътности;

б) плътностен ефект  $\alpha_0^{\sigma=\text{const.}}$ , определящ зависимостта на реактивността от плътността на материалите в реактора при постоянни микроскопични сечения.

$$\text{Следователно } \alpha_0 = \alpha_0^{\gamma=\text{const.}} + \alpha_0^{\sigma=\text{const.}}$$

### Ядрен температурен коефициент на реактивността

Ядреният температурен коефициент се дели на две компоненти:

- ефект, обусловен от изменението на температурата на горивото и водещ до **доплерово разширение на резонансите и повишаване на резонансното залавяне при повишаване на температурата**. Тази компонента на ядрения температурен коефициент зависи от междинния енергетичен интервал и не зависи от топлинния неутронен спектър. Поради хетерогенната структура на реактора резултатът е *намаляване* на вероятността за избягване на резонансно поглъщане. Следователно

$$\text{доплеровата компонента на ядрения температурен ефект } \left. \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right|_{\gamma=\text{const.}} \text{ е винаги}$$

*отрицателна*. Това е доминиращият ефект.

- ефект, дължащ се на изменение на температурата на забавителя и водещ до изменение на "твърдостта" на спектъра на топлинните неутрони. Увеличаването на температурата на средата води до повишаване на средната енергия на топлинните

неутрони, които се намират в температурно равновесие със средата, и съответно до намаляване на микроскопичните сечения на поглъщане. Освен това се съкращава и енергетичният интервал на забавяне на неутроните.

Качествено обяснение за повишаване на поглъщането в резонансите при повишаване на температурата е следното. При повишаване на температурата атомите в твърдото тяло вибрират с по-голяма амплитуда и съответно с по-голяма скорост. Поради по-голямата скорост и различната посока на движение (от 0 до 180°) спрямо налитащите неутрони резонансите се разширяват от Доплеров ефект при запазване на площта си – резонансите намаляват височината си и увеличават ширината си. Тъй като сеченията за поглъщане в енергетичната област около резонанса са много големи, при намаляване на височината на резонанса вероятността за поглъщане се запазва висока (около 1) и се увеличава забележимо поглъщането в крилата на резонанса. Общият ефект е повишено поглъщане на неутрони с енергии в резонансната област на  $^{238}\text{U}$ . Високата вероятност за поглъщане се запазва в случая на хетерогенен реактор, тъй като за хетерогенен реактор при намаляване на височината на резонанса намалява ефекта на самоблокировка в горивните елементи и неутроните проникват до по-голяма дълбочина под повърхността на таблетката, където се поглъщат. За хомогенен реактор този ефект е много по-слаб.

В безкрайна среда от резонансен поглъстител, но без отчитане на енергетичното самоекраниране,  $p = \prod_i p_i \approx \exp\left[-\frac{n}{\xi \Sigma_s} \sum_i I_i\right]$ , където  $n$  е концентрацията на резонансния поглъстител, а  $I_i$  са резонансните интегрални на всичките му резонанси.

Една приближена формула за вероятността за избягване на резонансното поглъщане в реална реакторна клетка е:

$$p \cong \exp\left[\frac{-N_f V_f I}{(\xi_m \Sigma_{s,m} V_m)}\right] \quad 9.6$$

където  $I$  е резонансният интеграл на съответния изотоп ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ),  $N_f$  е броят на ядрата на горивото,  $V_f$  е обемът на горивото,  $\xi_m$  е средната логаритмична загуба на енергия при един акт на разсейване,  $\Sigma_{s,m}$  е сечението за разсейване на забавителя,  $V_m$  е обемът на забавителя.

За хетерогенен реактор е изведена формула за зависимостта на резонансния интеграл от температурата:



$$I(T) = I(T_0) \left[ 1 + \gamma (\sqrt{T} - \sqrt{T_0}) \right] \quad 9.7$$

$\gamma$  е линейна функция от отношението на повърхността на горивото към масата на горивото. При 600 К  $I$  за  $^{238}\text{U}$  е 278 b, а за  $^{232}\text{Th}$  е 85 b.

Тъй като  $\frac{\partial p}{\partial T} \propto -p(T) \frac{\partial I}{\partial T} \propto -p(T)/\sqrt{T}$ , ядреният температурен коефициент на реактивността по температура на горивото е  $\frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial T} \propto -1/\sqrt{T}$

Може да се приеме, че приносът на  $\left. \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} \right|_{\gamma=\text{const.}}$  и на  $\left. \frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} \right|_{\gamma=\text{const.}}$  е нулев.

Да направим оценка на поведението на  $\left. \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\gamma=\text{const.}}$ , където  $f$  е коефициентът на използване на топлинните неутрони. При повишаване на температурата на средата поглъщането на неутрони намалява и дължината на дифузия на топлинните неутрони нараства. Това води до намаляване на неравномерността на разпределението на потока в елементарната клетка и съответно до *нарастване* на  $f$ . От друга страна, отношението  $\sigma_a^{\text{заб.}} / \sigma_a^{235}$ , което характеризира относителното поглъщане в забавителя, нараства с температурата поради отклонението на  $\sigma_a^{235}$  от закона  $1/v$ . Това води до *намаляване* на  $f$ . Количественият анализ показва, че при нагриване на реактора от 20°C до 300°C първият фактор преобладава над втория за повечето типове елементарни клетки на водно-водните реактори и  $\left. \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\gamma=\text{const.}} > 0$ .

Температурната зависимост на  $B^2 \frac{\partial M^2}{\partial \theta}$  също се дължи на два конкуриращи се фактора: с увеличаване на температурата дължината на дифузия се увеличава поради намаляване на поглъщането, а възрастта намалява, тъй като се съкращава енергетичният интервал на забавянето.

В заключение, ядреният температурен коефициент на реактивността може да се запише по следния начин:

$$\alpha_{\theta}^{\gamma=\text{const.}} = \left. \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\gamma=\text{const.}} - \left. \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right|_{\gamma=\text{const.}} \mp \left. B^2 \frac{\partial M^2}{\partial \theta} \right|_{\gamma=\text{const.}} \quad 9.8$$

Знакът пред последния член се определя от стойността на  $L^2/\tau$ . В голяма степен знакът на  $\alpha_{\theta}^{\gamma=\text{const.}}$  зависи от вида на функцията  $\theta_F = f(\theta)$ , където  $\theta_F$  е средната температура на горивото, а  $\theta$  е средната температура на АЗ. Ако  $\Delta\theta_F$  е приблизително равно на изменението на температурата на забавителя  $\Delta\theta_m$ , първият член преобладава над втория. Вторият член започва да преобладава над първия при  $\Delta\theta_F/\Delta\theta_m > 3$ .

### Плътностен ефект на реактивността

Членът в (9.5), съдържащ  $M^2$ , съществено зависи от плътността чрез ядрената концентрация на забавителя, която намалява с нарастване на температурата:  $M^2 = \text{const.}/N^2$ .

( $N$  е ядрената концентрация). Следователно  $B^2 \left. \frac{\partial M^2}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const.}} < 0$ , което означава, че утечките

нарастват с температурата и приносът на този член в плътностния температурен коефициент е *отрицателен*. За водно-водните реактори приносът на изменението на  $M^2$  е особено голям.

Членът  $\left. \frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const.}}$  не зависи от плътността, тъй като зависи само от микроскопичните

сечения.

Членът  $\left. \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const.}}$  зависи от плътността, защото коефициентът на размножение с бързи

неутрони  $\varepsilon$  е функция на относителната концентрация на водорода  $N_H/N_8$ , която намалява с

температурата, а  $\varepsilon$  нараства. Следователно  $\left. \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const.}} > 0$ .

Членът  $\left. \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const.}}$  зависи от плътността посредством уран-водното отношение

$V_F N_U / (V_{H_2O} N_{H_2O})$ , което се увеличава при загряване, тъй като масата на водата в АЗ намалява с температурата. Следователно относителното поглъщане в забавителя намалява и

$\left. \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const.}} > 0$ . Допълнително намаляване на поглъщането в забавителя с "разреждането" му

се причинява от въвеждането в забавителя на силен поглъстител на неутрони ( $^{10}\text{B}$ ) в разтворима форма.

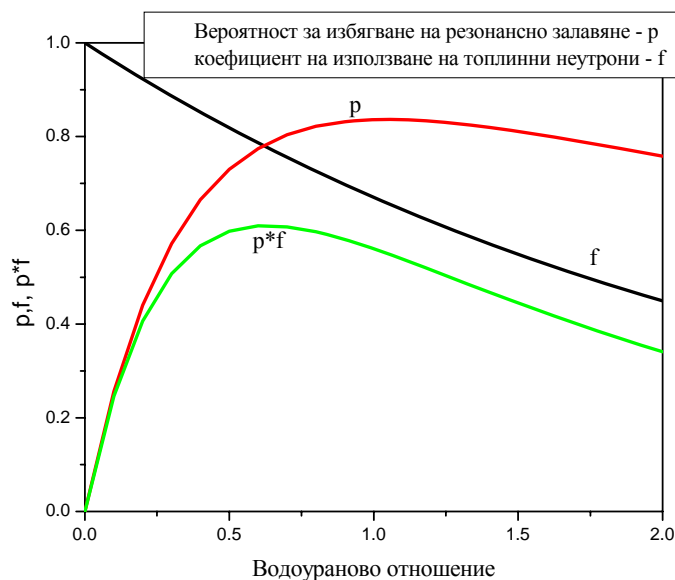
Приносът на члена  $\left. \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const}}$  е отрицателен, тъй като с нарастване на уран-водното отношение вероятността за избягване на резонансния залавяне намалява.

Резултатите могат да се обобщят по следния начин:

$$\alpha_{\theta}^{\sigma=\text{const.}} = \left. \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const.}} - \left. \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const.}} + \left. \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const.}} - \left. B^2 \frac{\partial M^2}{\partial \theta} \right|_{\sigma=\text{const.}} \quad 9.9$$

Във водно-водните реактори обикновено приносът на  $\alpha_{\theta}^{\sigma=\text{const.}}$  е по-голям от приноса на  $\alpha_{\theta}^{\gamma=\text{const.}}$  в сумарния температурен реактивен коефициент.

Основно влияние на формата на кривата на температурния ефект оказва температурният ход на произведението  $pf$ . Тъй като плътностният ефект преобладава, а  $p$  и  $f$  зависят от плътността чрез водно-урановото отношение, при проектиране на реакторите ходът на температурния ефект може в голяма степен да бъде контролиран чрез подбиране на уран-водното отношение на студен реактор. На фиг.9.1 са показани качествено зависимостите на  $p, f$  и тяхното произведение.



Фиг.9.1. Зависимост на  $p, f$  и тяхното произведение от водо-урановото отношение.

На Фиг.9.2 е показана качествено зависимостта на коефициента на размножение от водо-урановото отношение. Кривата има максимум при дадено водо-ураново отношение, като максимумът намалява и се отмества наляво при добавяне на борна киселина. Какво

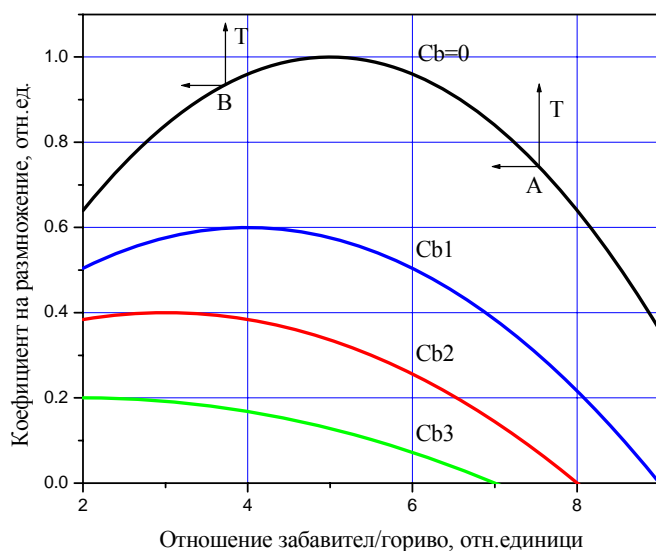


отношение би трябвало конструкторите на реактора да изберат? Отляво, отдясно или при максимума на  $K$ ?

Ако водо-урановото отношение по конструкция е отдясно на максимума – т. А – при повишаване на температурата (стрелка нагоре) водата се разширява и излиза от активната зона (стрелка наляво). Резултатът е повишаване на коефициента на размножение при повишаване на температурата, т.е. наблюдава се **положителен температурен коефициент на реактивност** (ТКР). Положителният температурен коефициент на реактивност може да доведе до тежки инциденти

Ако водо-урановото отношение по конструкция е отляво на максимума – т. В – при повишаване на температурата (стрелка нагоре) водата се разширява и излиза от активната зона (стрелка наляво). Резултатът е намаляване на коефициента на размножение при повишаване на температурата, т.е. наблюдава се **отрицателен температурен коефициент на реактивност**. **Отрицателният температурен коефициент на реактивност стабилизира реактора.**

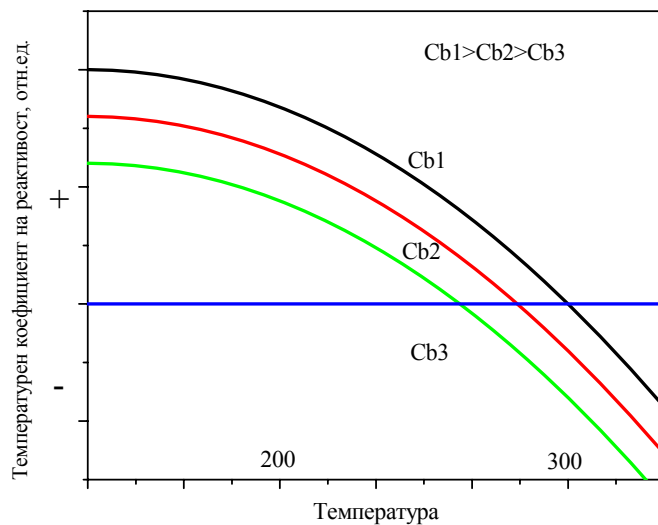
При водо-ураново отношение, съответстващо на максимума на  $K$ , при повишаване на температурата се повтаря описаният процес. Резултатът е запазване на коефициента на размножение, т.е. наблюдава се нулев температурен коефициент на реактивност.



Фиг.9.2. Зависимост на коефициента на размножение от водо-урановото отношение при различни концентрации на борната киселина:  $C_B = 0$ ,  $C_{b1} < C_{b2} < C_{b3}$ .

При повишаване на температурата от студено състояние до номинални параметри се изменя водо-урановото отношение и температурния коефициент на реактивност преминава

от положителен към отрицателен над определена температура. Температурата, над която ТКР става отрицателен, *нараства* с концентрацията на борната киселина.



Фиг.9.3. Качествена зависимост на температурния коефициент на реактивност като функция на температурата и концентрацията на борната киселина

В края на кампанията, когато  $C_B = 0$ , ТКР е с най-висока абсолютна стойност. При разхлаждане е възможно да се достигне т.нар. **повторна критичност** (виж раздел 12).

### Мощностен ефект и мощностен коефициент на реактивността

Ако топлопроводността на ядреното гориво е малка (напр. при ВВЕР, където горивото е керамика от  $UO_2$ ), с нарастване на мощността нараства и радиалната неравномерност на температурното поле в елементарната клетка. Средната температура на топлоносителя престава да бъде подходящ критерий за температурния режим. Затова наред с разгледаните характеристики, които се използват по време на подгряването на АЗ до работна температура, се въвежда и мощностен ефект и мощностен коефициент на реактивността при работа в енергетични режими.

Мощностният ефект на реактивността е изменението на реактивността при повишаване на мощността на реактора. Принос в изменението на реактивността главно имат промяната в температурата на горивото и промяната на температурата и състоянието (течно, газообразно) на топлоносителя. Приносът на горивото в изменението на реактивността като функция на мощността се дължи на промяната на резонансното поглъщане в  $^{238}U$  поради промяната на температурата на горивото. Следователно мощностният ефект по гориво представлява доплеров ядрен температурен ефект и е винаги отрицателен.

Всички ефекти, с изключение на доплеровия по гориво, са следствие на инерционни процеси, свързани с изменение на температурата на забавителя. Само доплеровият ефект по гориво се обуславя от изменението на температурата му, която практически мигновено следва мощността. Тъй като тази мигновена компонента е винаги отрицателна, тя е изключително съществена за управляемостта на реактора.

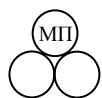
### Приложение 9.1

Таблица П9.1.1. Пресметнати коефициенти на реактивност за 18 зареждане на четвърти блок, 2003 г.,  $H_{VI}=200$  см

Еф.Ден., Мощн., MW	$T_{вх}$ °C	$C_{H_2O}$ g/kg	Ст.отр. Xe,Sm	$\partial\rho/\partial\gamma_{H_2O}$ %/g/cm <sup>3</sup>	$\partial\rho/\partial t_{H_2O}$ %/°C .10 <sup>3</sup>	$\partial\rho/\partial t_U$ %/°C .10 <sup>3</sup>	$\partial\rho/\partial N$ %/MW .10 <sup>3</sup>	$\partial\rho/\partial C_{H_2O}$ %/g/kg	$\beta_{eff}$ .10 <sup>2</sup>
0,0	20.0	9.06	0 Sm	2.7	<b>3.62</b>	-3.97	0	-1.82	
0,0, $K_{eff}=1$	260.0	8.97	0 Sm	4.6	-3.64	-3.39	0	-1.42	
0, 756	263.5	6.52	Xe Sm	10.0	-13.50	-2.84	-0.96	-1.40	
0, 1375	265.5	6.10	Xe Sm	11.4	-16.92	-2.66	-0.97	-1.38	0.646
150, 0	20.0	6.48	0 Sm	2.5	<b>3.25</b>	-4.14	0	-1.94	
150, 0 $K_{eff}=1$	260.0	5.78	0 Sm	11.1	-13.57	-3.55	0	-1.52	
150, 756	263.5	3.33	Xe Sm	17.1	-24.40	-3.01	-1.11	-1.49	
150,1375	265.5	2.88	Xe Sm	18.6	-29.64	-2.88	-1.13	-1.48	
298, 0	20.0	4.19	0 Sm	3.4	<b>2.30</b>	-4.26	0	-2.10	
298, 0 $K_{eff}=1$	260.0	2.92	0 Sm	17.4	-23.52	-3.66	0	-1.63	
298, 756	261.5	0.48	Xe Sm	23.8	-37.22	-3.13	-1.28	-1.61	
298, 1375	264.5	0.01	Xe Sm	25.5	-42.22	-3.02	-1.31	-1.59	0.583

Таблица П9.1.2. Ефективност на групите АРК, включително с отчитане на една заседнала най-ефективна касета на 250 см при различни температури на топлоносителя и съответни критични концентрации на борната киселина за 18 зареждане на четвърти блок, 2003 г,  $H_{VI}=200$  см

Ефективност, $\Delta\rho$ ,%	Начало N=0		Край, 310 еф.д. N=0		Начало N=100%		Край, 310 еф.д. N=100%	
	20°C	260°C	20°C	260°C	20°C	260°C	20°C	260°C
Сумарна ефективност,	8.68	10.56	8.51	10.57	8.52	10.44	8.24	10.45
Сумарна ефективност без най-ефективна касета	5.33	7.25	5.43	7.45	5.17	7.12	5.17	7.30



## Коефициенти и ефекти на реактивността

НФП-  
440,1000

Таблица П9.1.3. Пресметнати коефициенти на реактивност за седмо зареждане на шести блок, 2001 г

Еф. ден., Мощн., MW	T <sub>вх</sub> °C	C <sub>НЗВОЗ</sub> g/kg	Ст.отр. Xe Sm	$\partial\rho/\partial\gamma_{H_2O}$ %/g/cm <sup>3</sup>	$\partial\rho/\partial t_{H_2O}$ %/°C .10 <sup>3</sup>	$\partial\rho/\partial t_U$ %/°C .10 <sup>3</sup>	$\partial\rho/\partial N$ %/MW .10 <sup>3</sup>	$\partial\rho/\partial C$ %/g/kg	$\beta_{eff}$ .10 <sup>2</sup>	$\Delta\rho$ , % H <sub>10</sub> =100%
0, 0	20.0	9.49	0 Sm	-3.403	2.364	-2.689	0	-1.889	0.72	17.456
0, 0	279.0	9.81	0 Sm	2.651	-1.091	-2.283	0	-1.423	0.69	13.762
0, 1500	282.8	7.33	Xe Sm	8.997	-13.698	-1.860	-0.521	-1.439	0.69	10.25
0, 3000	287.0	6.23	Xe Sm	12.384	-23.005	-1.682	-0.393	-1.492	0.68	8.657
100, 0	20.0	7.90	0 Sm	-0.133	2.640	-2.696	0	-1.993	0.70	15.077
100, 0	279.0	7.77	0 Sm	7.708	-9.421	-2.289	0	-1.483	0.66	11.316
100,1500	282.8	5.25	Xe Sm	13.737	-22.144	-1.855	-0.581	-1.492	0.65	7.588
100,3000	287.0	4.12	Xe Sm	17.374	-33.030	-1.683	-0.457	-1.544	0.65	5.933
200, 0	20.0	6.21	0 Sm	3.816	2.453	-2.710	0	-2.110	0.67	12.356
200, 0	279.0	5.57	0 Sm	13.338	-19.098	-2.299	0	-1.553	0.63	8.531
200, 1500	282.8	3.01	Xe Sm	19.089	-32.035	-1.865	-0.648	-1.559	0.62	4.612
200, 3000	287.0	1.86	Xe Sm	22.930	-44.405	-1.694	-0.522	-1.611	0.61	2.903
287.5, 0	20.0	4.81	0 Sm	7.088	2.117	-2.715	0	-2.219	0.65	9.958
287.5, 0	279.0	3.75	0 Sm	1.975	-27.243	-2.305	0	-1.615	0.61	6.086
287.5, 1500	282.8	1.15	Xe Sm	23.601	-40.544	-1.882	-0.706	-1.621	0.60	1.989
287.5, 3000	287.0	0.0	Xe Sm	27.618	-54.157	-1.706	-0.578	-1.672	0.59	0.239

Таблица П9.1.4. Запаси и ефекти на реактивност и оценка на аварийната защита на ОР СУЗ за създаване на необходимата подкритичност на активната зона за началото и края на седма кампания на шести блок, 2001 г

Запаси и ефекти на реактивност	Начало на кампанията		Край на кампанията	
	С <sub>нзвоз</sub> G/kg	Δρ %	С <sub>нзвоз</sub> g/kg	Δρ %
Запасна реактивност (Т=20°C)	0	17.46	0	9.91
Изменение на запасната реактивност при изменение на температурата на активната зона от 20 °С до 302 °С	0	-4.54	0	-4.82
Изменение на запасната реактивност при изменение на мощността от 0 до 100% N <sub>ном</sub>	0	-1.54	0	-1.96
Изменение на запасната реактивност от отравяне от Хе при изменение на мощността от 0 до 100% N <sub>ном</sub> .	0	-2.79	0	2.83
Запасна реактивност на изгаряне	0	8.59	0	0.30
Бързопроявяващи се ефекти при спиране на реактора от номинална мощност:	6.24	2.39	0	3.00
• мощностен ефект;	6.24	1.77	0	1.91
• ефект от понижаване на температурата на топлоносителя от 302° до 279 °С;	6.24	0.42	0	0.89
паров ефект.	6.24	0.20	0	0.20
Оперативен запас на регулиране	6.24	0.30	0	0.30
Ефективност на максимално ефективния ОР СУЗ	6.24	0.91	0	1.05
Ефективност на ОР СУЗ на ном.параметри	6.24	7.54	0	7.66
Ефективност на ОР СУЗ с отчитане на “засядане” на МЕК	6.24	6.63	0	6.61
Ефективност при отчитане 10% неточност в разчетите	6.24	5.9	0	5.95
Прогнозна минимална подкритичност	6.24	3.28	0	2.65
Необходима минимална подкритичност	6.24	1.00	0	1.00

## Приложение 9.2

**Коментар на зависимостта на коефициентите и ефектите на реактивност и други характеристики на активната зона от параметрите на работа на реактора – температура, мощност, ефективни денонощия**

### 1. Коефициент и ефекти на реактивност

- С увеличаване на ефективните денонощия нарастват по абсолютна стойност коефициентите и ефектите на реактивност. Всяко явление, влияещо върху реактивността, е свързано с увеличено или намалено поглъщане, т.е. с промяна на сечение за взаимодействие на неутрони. Реактивността на различните ефекти се измерва като



отношение на макроскопичното сечение на даденото явление към макроскопичното сечение на горивото (Виж раздел 8, Връзка между отравяне и реактивност). В края на кампанията макроскопичното сечение на горивото намалява и съответно се увеличава реактивността от дадения ефект;

- Коефициентът на реактивност по температура на водата в края на кампанията нараства по абсолютна стойност няколко пъти, тъй като в началото на кампанията концентрацията на борна киселина е висока и е възможно ТКР да придобие дори положителна стойност при нулева мощност. В края на кампанията концентрацията на борна киселина е нула и ТКР е с най-висока абсолютна стойност;
- ТКР зависи от температурата на АЗ;
- Мощностният коефициент на реактивност зависи от мощността на РУ;
- В студено състояние коефициентът на реактивност по борна киселина е с ~ 30 % повече, отколкото в горещо състояние. Това е така, тъй като плътността водата в горещо състояние е значително по-малка и при единица промяна на концентрацията на борна киселина на единица маса, промяната на борната киселина в обема на активната зона в студено състояние е повече с около 30 %, отколкото в горещо състояние;
- Коефициентът на реактивност по температура на горивото намалява с температурата, тъй като е пропорционален на  $1/\sqrt{T}$ .

### 2. Други характеристики на активната зона:

- Ефективната част на закъсняващите неутрони с увеличаване на ефективните денонощия намалява (за една и съща мощност), тъй като се натрупва и участва в енергоотделянето плутоний, който е с по-малка част на закъсняващите неутрони.

### ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ

1. Как се дефинират величините коефициент на реактивност по даден параметър и ефект на реактивност по даден параметър?
2. Какви са двата принципни механизма на изменение на скоростите на неутронните реакции с температурата?

3. Какъв е знакът на ядрената компонента на температурния коефициент на реактивността? От какво зависи този знак?
4. Как се отразява повишаването на температурата на реактора на утечките на нейтрони от активната зона?
5. Възможно ли е в реактора ВВЕР-1000 и ВВЕР-440 да се получи положителен температурен коефициент на реактивността и ако е възможно - как?
6. Как се изменя ТКР с температурата?
7. На какво се дължат мощностния ефект и мощностния коефициент на реактивност?
8. Изменят ли се коефициентите и ефектите на реактивност с увеличаване на ефективните денонощия?
9. Мощностният коефициент на реактивност зависи ли от мощността на РУ?
10. Кога коефициентът на реактивност по борна киселина е по голям по абсолютна стойност – в студено или в горещо състояние? Защо?