13. Енергоотделяне в активната зона. Механизъм на превръщане на ядрената енергия в топлина. Разпределение на енергоотделянето в активната зона, коефициенти на неравномерност. Влияние на органите за регулиране на СУЗ върху неравномерността на енергоотделянето.

1. Енергоотделяне в активната зона. Механизъм на превръщане на ядрената енергия в топлина.

По време на работа на ядрения енергиен реактор отделената в горивото топлина се дължи на деленето на тежките елементи при поглъщане на неутрони. ²³⁵U е с най-голям принос, ²³⁸U е с принос 5-9% (дели се с бързи неутрони), приносът на създаваните по време на работа ²³⁹Pu и ²⁴¹Pu нараства с увеличаването на дълбочината на изгаряне и може да превиши приноса от ²³⁵U за дълбочини на изгаряне над 30 MWd/kgU.

При спрял реактор енергия се отделя от радиоактивното разпадане на продукти на делене (бета-разпадане и гама-разпадане) и натрупани трансурани (алфа-разпадане). Отделената енергия при радиоактивното разпадане, която се превръща в топлина, се нарича остатъчно топлоотделяне на ядреното гориво.

Енергията, която се освобождава в един акт на делене, е около 200 MeV. Тази енергия, усреднена по много деления, се разпределя приблизително по следния начин:

Процес	Енергия и дял в		
	енергоотделянето		
	MeV	%	
Кинетична енергия на фрагментите на делене	165	82.5	
Кинетична енергия на мигновените неутрони	≈ 5	2.5	
Енергия на у-квантите, излъчвани в момента на делене	≈ 7	3.5	
Енергия на β-разпадането на продуктите на делене	≈ 7	3.5	
Енергия на γ-разпадането на продукти на делене	≈ 7	3.5	
Енергия на антинеутринното лъчение	≈ 10	5	

Таблица 13.1. Разпределение на енергията на делене по процеси

Механизмът на превръщане на отделената кинетична енергия в енергия в топлина е следният:

- Фрагментите на делене са частично йонизирани. Началният им заряд е средно около +20 (липсват 20 електрона). При разлитането си от мястото на деленето фрагментите на делене предават основната част от енергията си (95-97 %) чрез йонизация на средата, като образуват няколко милиона йонни двойки. При забавянето си фрагментите на делене залавят електрони и се превръщат в електрически неутрални атоми. Част от енергията фрагментите на делене предават чрез еластични и нееластични удари с атомите на веществото. (При нееластичен удар атомът, с който си е взаимодействувал фрагментите на делене на веществото, се превръща в движение на атомите, т.е. в топлинна енергия. Забавените фрагменти на делене, които като правило са радиоактивни, се внедряват във веществото;
- Бета-частиците са електрони и при своето движение предават енергията си чрез йонизация на средата;
- Гама-квантите предават своята енергия на веществото като избиват фотоелектрони и Комптън електрони, които от своя страна предават своята енергия като бета-частиците;
- Неутроните, получени в процеса на делене, са с висока енергия и отдават своята енергия на веществото чрез разсейване върху ядрата на забавителя, конструкционните материали на АЗ и ядреното гориво.
- Кинетичната енергия на фрагментите на делене се поглъща изцяло в горивото пробегът на фрагментите на делене в урановия двуокис е приблизително 10 µm. Времето на забавяне е ≤10⁻¹⁴ s.

Кинетичната енергия на мигновените неутрони се предава непосредствено на топлоносителя. Тъй като процесът на забавяне на неутроните става за време по-малко от 10⁻⁶ s, около 2.5 % от енергията се предава почти мигновено на топлоносителя.

Енергията на γ-лъчите се поглъща в по-голямата си част в горивото (над 90 %) и по-малко в конструкционните материали и топлоносителя. Енергията на бета-лъчението се отделя изцяло в горивото.

Енергията, отделена в горивото, със закъснение от няколко секунди се предава на топлоносителя. Експериментално измерената времеконстанта за забавяне на топлопреноса от горивото към топлоносителя е около 5 s.

На енергията на β-разпадането на продуктите на делене и на техни дъщерни продукти, както и на енергията на γ-разпадането на продуктите на делене и на техни дъщерни продукти, се дължи остатъчното топлоотделяне в реактора след спиране на верижната

МΠ

реакция. Остатъчно топлоотделяне има и по време на работата на реактора - по време на работа на реактора около 7% от топлинната енергия се дължи на остатъчно топлоотделяне на продукти на делене, образувани в предходни моменти. При бързо намаляване на мощността трябва да се отчита и остатъчното топлоотделяне, ако е необходимо да се намали неточността под 5 %.

Енергията на антинеутриното, получавано при β^{-} разпадането, почти изцяло напуска реактора (и Земята). Загубата на енергия от антинеутриното приблизително се компенсира от отделената енергия при радиационното залавяне на ~1.5 неутрона от всеки акт на делене - енергията, освободена под формата на гама-лъчи при радиационно залавяне на 1.5 неутрона, е около 10 MeV.

2. Разпределение на енергоотделянето по радиус и височина на активната зона. Коефициенти на неравномерност.

2.1. Определения

Коефициент на неравномерност на енергоотделянето по касети K_q се определя като отношението на енергоотделянето на най-енергонатоварената касета Q_{qmax} към средното енергоотделяне на касета \bar{O}_q :

 $K_q = Q_{qmax} / \bar{O}_q$

Коефициент на неравномерност енергоотделянето по височина на активната зона се определя като отношението на най-енергонатоварената част на активната зона за дадена височина към средното енергонатоварване по височина:

 $K_z\!\!=\!\!Q_{zmax}\!/\bar{O}_z$

Обемният коефициент на неравномерност на мощността по активната зона е:

 $K_V = K_q K_z$

Може да се дефинира и коефициент на неравномерност на енергоотделянето в една касета като енергоотделяне на най-енергонатоварения топлоотделящ елемент в касетата към средното енергоотделяне по ТОЕ за дадената касета (за ВВЕР-440 е прието означението К_{кк}, за ВВЕР-1000 е прието означението К_к).

2.2. Коефициенти на неравномерност за хомогенен реактор без отражател

Приблизителна представа за разпределението на енергоотделянето в реактора ще се получи, ако се разгледа разпределението на неутронния поток в реактор без отражател и с равномерно разпределение на обогатяването на горивото по радиус и височина на активната зона. Това разпределение ще даде горната граница на неравномерността на енергоотделянето

по радиуса на активната зона, тъй като в реалните реактори разпределението на горивото по радиус не е равномерно - в центъра се поставят касети с най-ниско обогатяване по ²³⁵U, а в периферията са най-високообогатените касети. При двегодишна кампания на реактора ВВЕР-1000 в периферията се поставят касети със свежо гориво с обогатяване 3.3 %, а за тригодишен цикъл касетите са с обогатяване 4.4 %.

За разглеждания реактор с равномерно разпределение на горивото по радиус и височина на АЗ не е отчетено изкривяването на неутронния поток при работа на мощност в началото на кампанията, когато поради температурния ефект (по-ниска средна температура в долната част на зоната) неутронният поток и енергоотделянето имат по-високи стойности в долната половина.

Решението на дифузионното уравнение за неутронния поток Ф за цилиндричен реактор с равномерно разпределение на горивото по обема (Фиг. 13.1) се описва от функцията:

$$\Phi(r,z) = \Phi_0 J_0 \left(\frac{2.405r}{R}\right) \sin \frac{\pi z}{H}$$
(13.1)

 $J_0(x)$ е Беселова функция от нулев ред, Φ_0 е неутронният поток в центъра на зоната (r = 0, z = H/2). $R = R_0 + \Delta$ и $H = H_0 + 2\Delta$. R_0 е радиусът на активната зона, H_0 е височината на активната зона, а $\Delta \cong 7$ ст е екстраполираната добавка, така че $\Phi(r,z)$ да удовлетворява граничното условие $\Phi(R,z) = \Phi(r,0) = \Phi(r,H) = 0$.

Енергоотделянето Q(r,z) е пропорционално на неутронния поток:

$$Q(r,z) = Q_0 J_0 \left(\frac{2.405r}{R}\right) \sin \frac{\pi z}{H}$$
(13.2)

 Q_0 е максималното енергоотделяне.

MΠ





Неравномерността на енергоотделянето по радиус се дефинира като:

$$K_r = Q_0 / \overline{Q_r} \tag{13.3}$$

където $\overline{Q_r}$ е усредненото енергоотделяне по радиус. Усредненото енергоотделяне по радиус $\overline{Q_r}$ се изчислява от:

$$\begin{split} \overline{Q}_{r} &= \frac{Q_{0}}{\pi R_{0}^{2}} \int_{0}^{R_{0}} J_{0} \left(2.405 \frac{r}{R} \right) 2 \pi r dr \\ &= \frac{2 \pi Q_{0}}{\pi R_{0}^{2}} \frac{R^{2}}{2.405^{2}} \int_{0}^{\frac{2.405R_{0}}{R}} J_{0}(z) dz \\ &= \frac{2 \pi Q_{0}}{\pi R_{0}^{2}} \frac{R^{2}}{2.405^{2}} \frac{2.405R_{0}}{R} J_{1} \left(\frac{2.405R_{0}}{R} \right) \\ &= \frac{2 Q_{0}R}{2.405R_{0}} J_{1} \left(2.405 \frac{R_{0}}{R} \right) \\ &\left[z = 2.405 \frac{r}{R}, \ z J_{0}(z) = \frac{d}{dz} (z J_{1}(z)), \ J_{1}(0) = 0 \right] \end{split}$$
(13.4)
OT (13.3) µ (13.4):

 $K_r = \frac{2.405 R_0 / R}{2 J_1 (2.405 R_0 / R)}$

Радиусът $R_0 = 316$ ст и височината на активната зона $H_0 = 356$ см (ВВЕР-1000) са много по-големи от добавката $\Delta \cong 7$ ст и $R_0/R \cong 1$, $H_0/H \cong 1$.

"П и УТЦ" ЕВ,ИХр-02 (13.5)



Тъй като $J_1(2.405) = 0.52$, за максималната стойност на коефициента на неравномерност се получава $K_r = 2.32$.

По подобен начин се пресмята и коефициентът на неравномерност по височина на активната зона:

$$K_z = Q_0 / \overline{Q_z} \tag{13.6}$$

$$\overline{Q_z} = \frac{Q_0}{H_0} \cdot \int_0^{H_0} \sin\left(\pi \frac{z}{H}\right) dz = \frac{Q_0 H}{\pi H_0} \left[1 - \cos\left(\pi \frac{H_0}{H}\right)\right]$$
(13.7)

 $\operatorname{3a} H_0/H \cong 1$:

$$\overline{Q_z} = \frac{2Q_0}{\pi} \tag{13.8}$$

и за максималната стойност на коефициента на неравномерност по височина се получава:

$$K_z = \pi/2 = 1.57 \tag{13.9}$$

Обемният коефициент на неравномерност е произведението от двата коефициента:

 $K_{\rm v} = K_{\rm r} K_{\rm z} = 2.32 \times 1.57 = 3.64 \tag{13.10}$

Освен макронеравномерностите на енергоотделянето, които се характеризират с коефициентите K_v , K_r и K_z , има и микронеравномерности, които се обясняват с хетерогенната структура на активната зона. В рамките на една касета поради нееднакво обкръжение са възможни неравномерности в топлоотделянето за различни ТОЕ. Освен това трябва да има и известен запас поради технологичните допуски при производството на горивото.

Големите коефициенти на неравномерност на енергоотделянето могат да доведат до разхерметизация на най-енергонатоварените топлоотделящи елементи. Намаляването на неравномерноста на енергоотделянето води до удължаване на кампанията поради поравномерното изгаряне на горивото. Идеалният реактор в това отношение е с коефициент на неравномерност $K_v = 1$.

3. Възможност за намаляване на коефициентите на неравномерност

3.1. Намаляване на радиалния коефициент на неравномерност. Роля на отражателя

Коефициентът на неравномерност по радиус на активната зона за хомогенен реактор е неприемливо висок. Най-очевидния начин за изравняване на енергоотделянето е чрез профилиране на обогатяването на горивото по радиус на активната зона – минимално обогатяване в центъра и постепенно увеличаване на обогатяването към периферията. Локалното енергоотделяне е пропорционално на локалното обогатяване и поради това чрез

профилиране на обогатяването може да се постигне изравняване. За началните зареждания се използват касети с различни обогатявания, в последствие се зареждат касети с максималното обогатяване в периферната зона. Касетите, които са прекарали една кампания в активната зона, се придвижват от периферията навътре, касетите прекарали две кампании в зоната се подреждат в централната област, касетите от централната област, прекарали в активната зона определените кампании и достигнали дълбочини на изгаряне близки до максимално допустимите, се изваждат от активната зона в БОК. Това е т.н. схема "in-in-out".

Увеличение на енергоотделянето по периферията на активната зона може да се постигне **чрез отражател на неутрони около активната зона, а също над и под активната зона.** Ако се използува оптимален по отношение на отражение на неутроните отражател, например вода, то в периферните касети ще се получи силно увеличение на енергоотделянето, силно увеличение на коефициента на неравномерност и възможност за разхерметизация на ТОЕ. Поради тази причина в реакторите BBEP по периферията на зоната има стомана, която отделя зоната от водата около зоната. За BBEP-440 стоманата обхващаща зоната е приблизително с дебелина около 1 см, за BBEP-1000 това е т.н. топлинен екран със средна дебелина над 10 см.

Ролята на стоманени отражатели под и над активната зона играят елементите от вътрешнокорпусните устройства: дъното на кошницата и долната част на БЗТ.

Освен тези схеми се използват и т.н. нискоутечкови схеми, при които се намалява утечката на неутроните по периферията на зоната, което позволява поддържане на верижната реакция при намалено средно обогатяване по ²³⁵U в активната зона. Използуването на нискоутечкови схеми увеличава коефициентите на неравномерност на касетите в края на активната зона. Нискоутечкови схеми се постигат чрез подреждане на касети, отработили 2 или 3 кампании, за още една кампания по периферията. Нискоутечковите схеми позволяват увеличаване на дълбочината на изгаряне и намаляват потока от бързи неутрони върху корпуса на реактора.

3.2. Намаляване на коефициента на неравномерност на енергоотделянето по височина на активната зона

Принципна възможност за намаляване на коефициента на неравномерност по височина е чрез профилиране на обогатяването по височина на касетите – минимално в центъра и максимално в двата края, или с профилирано разпределение на изгарящ поглътител по височина. Тази възможност не се използва масово в ядрената енергетика. 3.3. Намаляване на коефициента на неравномерност на енергоотделянето на касета

В рамките на една касета, най-натоварени са периферните ТОЕ и особено ъгловите елементи поради наличието на повече вода около тях в областта между три съседни касети. Намаляването на енергоотделянето в периферните и ъгловите ТОЕ се постига чрез използване на профилирани касети. По периферията или само ъгловите ТОЕ (минимум 3) са с намалено обогатяване по ²³⁵U. За ВВЕР-440 и ВВЕР-1000 се произвеждат и се предлагат профилирани касети.

3.4. Намаляване на коефициента на неравномерност в процеса на работа на реактора

В процеса на работа на реактора се наблюдава самоизравняване на енергоотделянето. Отравянето, шлакуването и изгарянето на горивото стават най-бързо в областите, в които неутронният поток е най-голям. В началото на кампанията долната половина на зоната е найенергонатоварена, в средата на кампанията настъпва известно изравняване и в края на кампанията енергоотделянето се измества в горната половина.

При всяка рязка промяна на мощността и на режима на работа коефициентите на неравномерност нарастват. Изчислените коефициенти за промяна в работата на блока са представени в албума с НФХ за конкретната кампания.

Коефициентите на неравномерност на енергоотделянето са с най-високи стойности в началото на кампанията, минимални са малко преди края на кампанията и е възможно увеличение в края на кампанията - Фиг. 13.2 а и б.

Намалението на коефициентите на неравномерност с ефективните денонощия се дължи на по-бързо изгаряне на гориво в областите с най-голямо енергоотделяне.

За BBEP-440 в края на кампанията поради изтегляне на регулиращата група до възможната най-голяма разрешена височина се увеличава енергоотделянето в горната част на зоната и това води до увеличаване на коефициентите на неравномерност.

MΠ



За реактор ВВЕР-1000 според технологичния регламент коефициентът на неравномерност K_v може да има максимална стойност до 2. Коефициентът на неравномерност по касети K_q се допуска да има стойност до 1.35, коефициентът на неравномерност по радиус K_r се допуска до 1.5, коефициентът на неравномерност по височина K_z може да има стойност до 1.49. По височина активната зона е разделена на 10 зони, за всяка от които има определена горна граница на коефициента на неравномерност за дадения слой:

 $K_{\rm v} \leq 2$

 $K_q \leq 1.35$

 $K_r \leq 1.5$

$$K_z \leq 1.49$$

Коефициентът, отчитащ разликата в енергоотделянето в рамките на една касета *K*_k се допуска да има стойност до 1.08.

Коефициентът на неравномерност поради ксенонови колебания К_{хе} е до 1.03.

Коефициентът на неравномерност, отчитащ точността на поддържане на определена топлинна мощност, е *K*_{точ} ≤ 1.04.

Инженерният запас, отчитащ грешките в методите на пресмятане и технологичните допуски, е *К*_{инж} ≤ 1.16.

 $K_k \leq 1.08$

 $K_{\rm Xe} \le 1.03$

 $K_{\text{точ}} \le 1.04$

 $K_{\text{инж}} \le 1.16$

Коефициентът на максимална локална неравномерност на енергоотделянето е:

 $K_{\text{max}} = 1.35 \times 1.49 \times 1.08 \times 1.03 \times 1.04 \times 1.16 = 2.7$

При средно генериране на енергия от ТОЕ за BBEP-1000 165 W/cm, максималното топлинно натоварване на ТОЕ при най-неблагоприятни обстоятелства е:

165х2.7=445 W/см. (448 според ТР)

В хода на работа на реактора сведение за коефициентите на неравномерност се получава от системата за вътрешнореакторен контрол - от неутроните детектори, от температурни измервания и от възстановяване на полето на енергоотделянето.

Коефициентите на неравномерност са пресметнати за повечето от възможните режими на работа на реактора и са представени в албума с НФХ.

За ВВЕР-440 са определени следните гранични стойности на коефициентите на неравномерност за номинална мощност:

 $K_q \le 1.35$

 $K_{\mu} = K_{q}K_{kk} \leq 1.55$

При превишаване на коефициентите на неравномерност се налага намаление на мощността до изпълнение на условията (за ВВЕР-440):

 $K_{q \text{ доп.}} = 1.35*1375/\text{Nt}_{\text{тек}} \le 1.5$

 $K_{\mu\,\text{доп.}} = 1.55*1375/Nt_{\text{тек}} \le 1.75$

 $K_{o \text{ доп.}} = 1.93*1375/Nt_{тек} \le 2.50$

(Ко е общия коефициент на неравномерност на енергоотделянето.)

Максимална линейна мощност на TOE = 325 W/cm.

За активна зона с 36 касети-екрани средната линейна мощност е с около 10 % повисока, отколкото за зона без касети екрани.

Коефициентът на инженерен запас за ВВЕР-440 е 1.15.

В последно време определянето на максималната линейна мощност е в зависимост от дълбочината на изгаряне и над определена дълбочина на изгаряне максималната разрешена линейна мощност намалява.

4. Влияние на органите за регулиране на СУЗ върху неравномерността на енергоотделянето.

Органите за регулиране внасят силни смущения на неутронния поток. Около поглъщащия елемент неутронния поток е намален, малко под повърхността на поглъщащия елемент потокът от топлинни неутрони спада практически до 0 (няколко порядъка). Запазването на мощността на реактора се постига чрез увеличаване на мощността в останалата част на активната зона. Най-високи са стойностите на коефициента неравномерност близо до поглъщащия елемент.

Поглъщащата наставка за реактори BBEP-440 е с размери на една касета и поради това внася много силни изкривявания на неутронния поток. Кластерното регулиране при BBEP-1000 внася значително по-малко неравномерност в неутронния поток.

При реактори BBEP-440 при сборките APK има воден слой между горивната касета и поглъщащата наставка, който води до увеличено енергоотделяне на съседните касети в областта между двата елемента на APK и в горната част на горивната касета. В усъвършенствани горивни касети за BBEP-440 това увеличение се компенсира с хафниеви поглъщащи пластини заварени от вътрешната страна на хексагоналния чохъл между двата елемента на APK сборката.

В края на кампанията, когато борната киселина е вече 0, за реакторите BBEP-440 се продължава кампанията 12-18 дни чрез постепенно изтегляне на регулиращата група. При



това изтегляне се извършва силно преразпределение на неутронния поток, максималното енергоотделяне се измества в горната част на зоната. В този режим рязко се увеличават коефициентите на неравномерност и се увеличава вероятността за разхерметизация на ТОЕ в горната част на зоната.

5. Разпределение на температурата по височина на активната зона

Топлината, генерирана в активната зона, се предава на топлоносителя. При разход *G* на топлоносителя:

$$Q_{\rm th} = \Delta i.G,\tag{13.11}$$

където Q_{th} е топлинната мощност на реактора, Δi е прирастът на енталпията на топлоносителя. За малко подгряване в активната зона, когато $\Delta i \cong c_{\text{p}}.\Delta T$, може да се напише:

$$Q_{\rm th} = G.c_{\rm p.}\Delta T,\tag{13.12}$$

където c_p е средната по температура специфична топлоемкост на топлоносителя при постоянно налягане, ΔT е подгряването в АЗ.

За една касета температурата по височина на АЗ се изчислява от:

$$T(z) = T_{\rm BXD} + \int_{0}^{z} \frac{q(z')dz'}{c_{p}G}$$
(13.13)

q(z) е топлинния поток на единица дължина от касетата.

Отново при предположение за симетричен неутронен поток по височина на зоната:

$$q(z) = q_0 \sin(\pi z/H)$$
(13.14)

 q_0 е най-високата стойност на топлинния поток по височина на активната зона (при z = H/2):

$$q_0 = \frac{Q_{th} K_z}{H_0 . n}$$
(13.15)

n е броят на касетите в АЗ, *n*=163 (ВВЕР-1000), 313 (ВВЕР-440, блокове 1,2,3), 349 (ВВЕР-440, блок4).

Ако свойствата на топлоносителя не се изменят по височина (вода, вода+пара, пара), c_p е усреднена константа и може да се приеме стойността на c_p при средната температура в АЗ. За BBEP-1000 се допуска кипене в горната част на зоната (паров ефект $\rho = -0.2$ %), но въпреки това за качествени заключения това приближение е добро.

След решаване на (13.13):

$$T(z) = T_{._{6x}} + \frac{q_0 \cdot H}{\pi \cdot c_p \cdot G} [1 - \cos(\pi z/H)]$$
(13.16)

"П и УТЦ" ЕВ,ИХр-02

MΠ

От условието за симетричност на топлинния поток и при предположение за постоянен коефициент на топлоотдаване, температурата при z = H/2 е:

$$T(H/2) = T_{\rm BX} + \Delta T/2$$
(13.1
OT (13.16) 3a z = H/2 M 13.17:
$$\Delta T/2 = \frac{q_0 \cdot H}{\pi . c_p \cdot G}$$
(13.18)

и окончателно за разпределението на температурата на топлоносителя по височина (Фиг.13.3):

$$T(z) = T_{\text{max}} + \Delta T / 2 \left[1 - \cos(\pi z / H) \right]$$
(13.19)



Фигура 13.3. Разпределение по височина на активната зона на температурата топлоносителя Θ_{T} , на обвивката на ТОЕ Θ_{of} и на повърхността на ТОЕ Θ_{c} при симетрично по височина енергоотделяне.

От Фиг. 13.3 се вижда, че най-висока температура топлоносителят има на изхода от зоната, докато за температурата на повърхността на ТОЕ това не винаги е така.

Температурата на повърхността на ТОЕ е:

$$T_{\text{TOE}}(z) = T(z) + \Delta T(z) \tag{13.20}$$

където $\Delta T(z)$ е температурната разлика между повърхността на ТОЕ и топлоносителя. При постоянен коефициент на топлопредаване α по височина:

$$\Delta T(z) = q(z)/\alpha$$

и:

$$T_{\text{TOE}}(z) = T_{\text{Bx.}} + \Delta T / 2 \left[1 - \cos(\pi z/H) \right] + q_0 \sin(\pi z/H) / \alpha$$
(13.21)

7)

Температурата на повърхността на ТОЕ $T_{\text{TOE}}(z)$ има максимум малко преди края на зоната и мястото на максимума може да бъде определено чрез производната на израза (13.21).

В началото на кампанията генерирането на енергия е асиметрично. В долната половина на зоната поради по-ниска температура и положителна реактивност от температурен ефект генерирането на топлина е по-голямо, отколкото в горната половина. Поради тази причина мястото на TOE с най-висока температура е отместено надолу от положението, определено от (13.21). Влиянието на управляващата група върху изкривяването на енергоотделянето е значително по-малко, отколкото влиянието на температурата. В края на кампанията генерирането на топлина в зоната също не е симетрично по височина. Поради по-малкото изгаряне в горната част на зоната там се отделя повече топлина и мястото на най-високата температура на TOE е отместено нагоре спрямо положението, определено от (13.21).

6. Температура по радиус на ТОЕ

Температурата по радиус T(r) на ТОЕ може да се получи от решението на уравнението на топлопроводност при предположение за равномерно енергоотделяне по радиус:

$$\nabla^2 T(r) + q/\lambda = 0 \tag{13.22}$$

q(*z*) е обемната плътност на енергоотделянето, λ е коефициентът на топлопроводност. В цилиндрични координати уравнението има вида:

$$\frac{d^2 T(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{q}{\lambda} = 0$$
(13.23)

Решението на уравнението е:

$$T(r,z) = t(R,z) + \frac{q(z)}{4\lambda} (R^2 - r^2)$$
(13.24)

R е радиусът на ТОЕ, T(R,z) е температурата на повърхността на ТОЕ. В центъра на ТОЕ температурата според (13.24) е:

$$T(0,z) = T(R,z) + \frac{q(z)}{4\lambda} R^{2}$$
(13.25)

или температурата в центъра е пропорционална на обемната плътност на енергоотделянето и на квадрата на радиуса на таблетката.

Таблетката от UO₂ за BBEP-1000 има вътрешен канал с диаметър 1.5-2 mm, а външният й диаметър е 7.6 mm. Наличието на вътрешна празнина увеличава запаса по линейно енергоотделяне до стапяне на горивото в центъра и освен това осигурява пространство за газообразните продукти на делене.

Относителното намаление на температурата на повърхността на вътрешния отвор в сравнение с температурата в центъра на плътен ТОЕ е с около 15-25 % по-ниска.

Формулите (13.24-25) са много приблизителни. Действителната плътност на енергоотделянето не е постоянна по радиуса на ТОЕ - в центъра то е с около 10-15 % помалко, отколкото на повърхността. Радиалното разпределение на енергоотделянето следва потока на топлинните неутрони и е модифицирана Беселова функция от нулев ред.

По-голям източник на грешки е величината λ. Топлопроводността на UO₂ намалява с температурата (намалението е близо два пъти при промяна на температурата от 300 до 1500°C (Фиг. 13.4), което води до недооценка на реалната температура. Освен това топлопроводността се влошава с дълбочината на изгарянето.



Фиг. 13.4. Изменение на топлопроводността на горивната таблетка от уранов двуокис с температурата.

Температурата на повърхността на таблетката е равна на:

$$T(R,z) = T(z) + \Delta T + \Delta T_{o\delta e_{\perp}} + \Delta T_{\Gamma}$$
(13.27)

където T(z) е температурата на топлоносителя, ΔT е температурната разлика (температурен напор) между топлоносителя и обвивката на ТОЕ, $\Delta T_{\text{обв.}}$ е температурната разлика в обвивката на ТОЕ, ΔT_{Γ} е температурната разлика в газовата междина между таблетката и обвивката на ТОЕ.

Най-голяма по стойност и най-неопределена е величината ΔT_{Γ} . Тази температурна разлика може да има стойност от 20-30 до няколкостотин градуса. С увеличаване на



дълбочината на изгаряне, таблетката изменя обема си ("набъбва") и е възможен контакт на таблетката с обвивката.

ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ

1) В резултат на какъв процес се получава енергия в активната зона на реактора по време на работа:

а) бета-разпадане;

б) гама-разпадане;

в) делене на тежки ядра;

г) алфа-разпадане.

2) Къде основно се отделя енергията в ядрения реактор;

а) забавител;

б) топлоносител;

в) уранов двуокис;

г) циркониева обвивка;

д) ВКУ;

е) органи за управление.

3) На какво се дължи остатъчното топлоотделяне на работило ядрено гориво:

а) бета-разпадане;

б) гама-разпадане;

в) делене на тежки ядра;

г) алфа-разпадане.

4) Дайте определение за коефициенти на неравномерност на енергоотделянето: - коефициент

на радиална неравномерност К_r, на осева неравномерност К_z, на обемна неравномерност К_v.

Какви са техните стойности за хомогенен цилиндричен реактор?

5) Какво е пространственото разпределение на енергоотделянето в хомогенен цилиндирчен реактор?

6) Как може да се намалят коефициентите на неравномерност на енергоотделянето:

а) по радиус на реактора?

б) по височина на реактора?

в) по периферията на реактора?

г) в рамките на една касета?

7) Какви са регламентираните стойности на Kr, Kz и Kv за BBEP-440 и BBEP-1000?

8) Каква е допустимата стойност на коефициента на неравномерност на енергоотделянето в рамките на една касета K_k за BBEP-440 и 1000? 9) Каква е допустимата стойност на максималната локална неравномерност на енергоотделянето на ВВЕР-440 и 1000? 10) Какви са средната и максималната стойност на линейната плътност на енергоотделянето на ТОЕ на ВВЕР-440 и 1000? 11) Как се изменя осевото и радиалното разпределение на енергоотделянето в хода на кампанията? 12) Защо в след края на борната кампания за ВВЕР-440 има повишение коефициента на неравномерност на енергоотделянето К_v? 13) Кое регулиране най-малко влияе на коефициентите на неравномерност: а) регулиране чрез сборка АРК (ВВЕР-440); б) регулиране чрез кластери (ВВЕР-1000); в) регулиране чрез течен поглътител (BBEP-440 и 1000). 14) Как се изменя радиалното температурно разпределение в ТОЕ а) при повишаване на мощността на реактора? б) в хода на кампанията? 15) Къде температурата на топлоносителя е най-висока: а) на входа на АЗ; б) на изхода от АЗ? в) малко преди края на АЗ? г) по средата на АЗ. 15) Къде температурата на повърхността на обвивката на ТОЕ е най-висока: а) на входа на АЗ; б) на изхода от АЗ? в) малко преди края на АЗ? г) по средата на АЗ. 16) Работа с албум НФХ. Оценка на коефициентите на неравномерност в зависимост от ефективните денонощия. 17) Работа с албум НФХ. Оценка на коефициентите на неравномерност в зависимост от промяна на мощността и режимите на работа. 18) Оценка на повишаването на коефициента на неравномерност при разбалансиране на ОР от регулиращата група в рамките на допустими стойности според регламента;

(МП)	
\propto)

19) Оценете повишаването на температурата в центъра на ТОЕ при промяна на мощността с един процент.

стр. 18/18			