

12. Запас от реактивност, изменение при различни състояния и режими. Способи за компенсиране на запаса от реактивност. Ефективност на органите за регулиране на СУЗ и на борната киселина. Изменение на реактивността в зависимост от параметрите на активната зона.

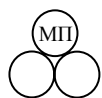
1. Запас от реактивност

За да се поддържа реакторът в критично състояние е необходимо да се компенсира изгарянето на горивото, тъй като при работа на реактора намалява количеството на дялящите се елементи и съответно намалява коефициентът на размножение. Основният начин за компенсиране на изгарянето на горивото се постига чрез добавяне на свежо ядрено гориво. Според начина на въвеждане на свежото гориво в активната зона реакторите се делят на два типа:

- Реактори, при които въвеждането на гориво става по време на работа. При тези реактори не се създава начален запас от реактивност за изгаряне, а само необходимата положителна реактивност за компенсиране на преходни процеси като например температурен ефект, мощностен ефект, отравяне от ^{135}Xe , ^{149}Sm ;
- Реактори, които спират за презареждане. За този тип реактор е необходимо да се създаде начална запасна реактивност за изгаряне освен необходимата реактивност за компенсиране на преходни процеси като температурен ефект, мощностен ефект, отравяне от ^{135}Xe , ^{149}Sm .

Към първия тип реактори (въвеждане на гориво става по време на работа) се отнасят хомогенните реактори и реакторите от канален тип.

При хомогенните реактори течното гориво, най-често под формата на стопени соли на уран или плутоний, или уран-233+торий, непрекъснато се пречиства. Използват се флуориди на уран/торий разтворени в соли на литий и берилий (литиев и берилиев флуорид). Продуктите на делене непрекъснато се извеждат и се добавя ново гориво. Предимството на този тип реактор е непрекъснати горивен цикъл и малкото остатъчно топлоотделяне в реактора поради извеждането на продуктите на делене. Поради утечки и значително замърсяване работите по този тип реактори са прекратени. В последно време има обновен интерес в Япония, Русия, Франция и САЩ.



Разработваните в последно време реактори с гориво, внедрено в графитови топки, реализират до голяма степен предимствата на хомогенните реактори (Pebble Bed Modular Reactor –PBMR).

При каналните типове реактори се извършва поканално презареждане без да се спира работата на реактора. При тези реактори презареждащата машина изолира един канал без да прекратява охлаждането и изважда или избутва отработилото гориво и добавя свежо гориво. Към този тип се отнасят газ-графитовите реактори, реакторите със забавител графит и топлоносител вода – реактори за производство на плутоний в САЩ и Русия и техният граждански вариант РБМК, реакторите със забавител и топлоносител тежка вода и гражданският вариант CANDU. Всички тези реактори могат да се използват за производство на “военен” плутоний, или плутоний, получен от гориво с много малка дълбочина на изгаряне.

Към втория тип реактори с периодично презареждане със спиране на реактора се отнасят корпусните реактори с вода забавител и вода топлоносител – реактори с вода под налягане или кипящи – PWR и ВВЕР, BWR.

При реактори с периодично презареждане след изваждане на част от отработилото гориво и добавяне на свежо гориво се създава **запас от реактивност**, който постепенно се намалява в процеса на генериране на енергия. Запасът от реактивност, или коефициент на размножение над 1, е необходимо да се компенсира чрез някои от известните методи:

- въвеждане на компенсиращи пръти, които в процеса на работа постепенно се извеждат от активната зона. Компенсиращите пръти съдържат изотопи, които поглъщат неутрони. Този метод се използва в едноконтурните АЕЦ;
- наличие на изгарящ поглъстител в активната зона. Този метод се използва при едноконтурните и двуконтурните АЕЦ;
- въвеждане на течен поглъстител. Този метод се използва в двуконтурните АЕЦ.

При кипящите реактори, които са едноконтурни, не е възможно да се въвежда течен поглъстител, тъй като при изпарението на водата на изхода от активната зона разтвореното вещество ще се отлага по повърхността на топлоотделящите елементи.

1.1. Използване на изгарящ поглъстител във водно-водни реактори

“Изгарящ поглъстител” означава изотоп с голямо сечение на залавяне на неутрони, поставен в активната зона на реактора. Поради голямото сечение за залавяне на неутрони ядрата на поглъстителя намаляват по брой (“изгарят”) и се превръщат в друг изотоп с малко сечение на залавяне на неутрони.

Изгарящ поглътител (ИП) се използва за:

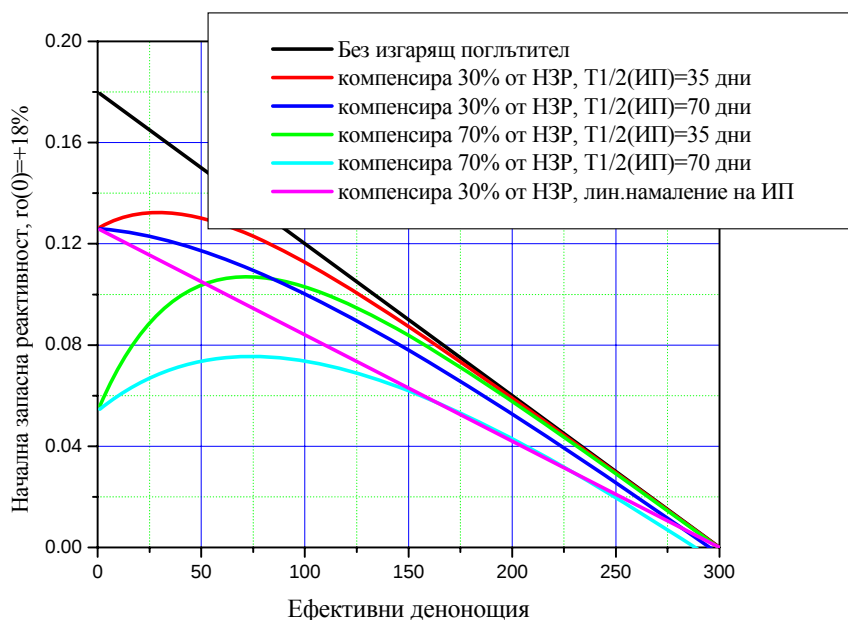
- частична компенсация на началната запасна реактивност след презареждане;
- изравняване на енергоотделянето по радиус и височина на активната зона.

За водно-водни реактори под налягане намаляването на началната запасна реактивност води до намаляване на началната висока концентрация на борна киселина и осигуряване на отрицателен температурен коефициент на реактивност в началото на кампанията.

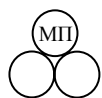
ИП се използва масово в кипящите реактори, тъй като при тях не се използва течен поглътител в топлоносителя. В първите модели кипящи реактори запасната реактивност е била компенсирана само с пръти, които в процеса на експлоатация са били изваждани постепенно от АЗ.

На фиг.12.1 е показана качествено еволюцията във времето на запасната реактивност с и без ИП.

Ако изгарящият поглътител е нехомогенно разпределен в активната зона, напр. в определени ТОЕ, е възможно самоекраниране на ядрата на ИП във вътрешността на ТОЕ и бавно, почти линейно намаляване на ядрата на ИП и на въведената компенсираща реактивност.



Фигура 12.1. Намаляване на запасната реактивност в процеса на изгаряне на горивото: намаляване на началната запасна реактивност (НЗР) без изгарящ поглътител (ИП), функцията е почти линейна; намаляване на началната запасна реактивност с изгарящ поглътител, който компенсира 30% и 70% от началната запасна реактивност, с период на



Запас от реактивност, ефективност на органите за регулиране

НФП-
440,1000

“полуизгаряне” на ИП 35 дни и 70 дни; линейно изгаряне на ИП, който компенсира 30% от началната запасна реактивност.

1.2. Елементи, използвани за ИП

Бор

Естествената изотопна смес се състои от два изотопа: 19.8 % ^{10}B и 80.2 % ^{11}B .

Сечението за поглъщане на топлинни неутрони (0.025 eV) на ^{10}B е 4000 b по реакцията $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$. Възможно е използването на обогатен по ^{10}B бор.

Недостатък на изотопа ^{10}B е образуването на хелий.

Гадолиний

Естествената изотопна смес се състои от 7 изотопа. В таблица 12.1 са дадени сеченията за поглъщане на топлинни неутрони, факторите на Весткот и резонансните интегрални на гадолиния

Таблица 12.1. Сечения за поглъщане на топлинни неутрони, фактори на Весткот и резонансни интегрални на гадолиния

Gd изотопи	Съдържание в ест.изотопна смес, %	Сечение за поглъщане на топлинни неутрони, b	Фактор на Весткот	Резонансен интеграл, b
Gd (ест.)	-	48890±104	0.8467	390±10
Gd-152	0.2	735±20	0.9784	2020±160
Gd-154	2.1	95±12	0.9967	230±26
Gd-155	14.8	60900±500	0.8425	1447±100
Gd-156	20.6	1.5±1.2	1.0006	104±15
Gd-157	15.7	254000±815	0.8510	700±20
Gd-158	24.8	2.2±0.2	1.0009	73±7
Gd-160	21.8	0.77±0.2	0.9997	7.2±1

Недостатък от ядрено-физична гледна точка на Gd е, че получените изотопи по реакциите $^{155}\text{Gd}(n,\gamma)^{156}\text{Gd}$ и $^{157}\text{Gd}(n,\gamma)^{158}\text{Gd}$ са стабилни и имат значителни сечения за поглъщане на неутрони (съответно 1.5 b и 2.2 b) и поради това намаляват запасната реактивност на зоната след изгарянето на изотопите с големи сечения.

Ербий

Сеченията на поглъщане на топлинни неутрони на ербия не са големи (таблица 12.2). Основното предимство на ербия е двойният резонанс около 0.5 eV, който по подобие на резонансите на ^{238}U се разширява с температурата. Ако се използва внедрен в горивната таблетка ербий, абсолютната стойност на отрицателния температурен коефициент по гориво се увеличава.

Таблица 12.2. Сечения за поглъщане на топлинни неутрони на Er-

Изотоп	Съдържание в ест. изотопна смес, %	Сечение, b
Er-162	0.14	19
Er-164	1.56	13.2
Er-166	33.4	35
Er-167	22.9	670
Er-170	14.9	5.7

Хафний

Сеченията на поглъщане на топлинни неутрони на хафния, също както и на ербия, не са големи (таблица 12.3). Поради малките сечения хафният изгаря по-бавно. Хафниеви пластини се използват за да се намали пикът от топлинни неутрони при АРК сборките на ВВЕР-440. Между горивната касета и поглъщащата наставка има вода, което причинява съществен локален коефициент на неравномерност в съседните касети, както и в горната част на горивната касета. Заваряват се 6 пластини от вътрешната страна на чохъла на горивната касета в пространството над края на топлоотделящите елементи и енергоотделянето се изравнява.

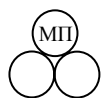


Таблица 12.3. Сечения за поглъщане на топлинни неутрони на Hf-

Изотоп	Съдържание в ест. изотопна смес, %	Сечение, b
Hf-174	0.16	390
Hf-176	5.2	38
Hf-177	18.6	365
Hf-178	27.1	45
Hf-179	13.7	5.7
Hf-180	35.2	12.6

1.3. Технически решения за поставяне на ИП в активната зона.

ИП в кластери

Един от начините е поставяне на кластери, които съдържат в себе си ИП. В зависимост от вида ИП, кластерите се изваждат от зоната след едно, две или три презареждания.

За ВВЕР-1000 при преминаване на 3 годишна кампания са използвани кластери от Al с внедрено борно съединение – B_2Cr . Възможно е различно съдържание на В в кластерите. Кластерите се изваждат по време на първото презареждане.

Свежи касети с кластери се поставят на позиции, където няма ОР.

При използване на кластери с ИП се променя водо-урановото съотношение.

ИП като обвивка на горивните таблетки

Компанията Уестингхаус е разработила технология за обвиване на горивните таблетки с тънък слой от ZrB_2 . Слой с дебелина 0.02 мм по ^{10}B е 1.7 mg/cm^2 . Според компанията наименованието на ИП е Интегрален горивен изгарящ поглътител (Integral Fuel Burnable Absorber, IFBA).

В една касета около 30-40% от ТОЕ са с ИП и по този начин се намалява коефициентът на неравномерност в касетата. Освен това в двата края на ТОЕ няма ИП и по този начин се подобрява разпределението на енергоотделянето по височина.

Отделянето на He от ^{10}B е отчетено и поради това началното налягане на He в ТОЕ е по-малко.

ИП внедрен в горивните таблетки

Gd_2O_3 се използва чрез прибавяне към горивните таблетки в количества до 6 - 10 w/o. Въпреки големите сечения Gd изгаря бавно поради самоекранирането – външните слоеве поглъщат силно неутрони, поради което Gd във вътрешните слоеве изгаря най-късно.

Основният недостатък на Gd_2O_3 е влошаването на коефициента на топлопроводност и понижаването на температурата на топене на UO_2 – таблица 12.3.

Таблица 12.3. Сравнение на свойствата на ИП с В, Gd , и Er .

тип ИП	Gd	В (IFBA)	Er
концентрация ИП в горивната таблетка	6 - 10 w/o	-	1 -2.5 w/o
намаление на топлопроводността	значително	пренебрежимо малко	Малко
намаление на темп. на топене	значително	пренебрежимо	Малко
част ТОЕ с ИП в касета	3 - 6%	30-40%	20-30%
намаление на количеството ^{235}U	малко	пренебрежимо	Малко
скорост на изгаряне	висока	висока	Средна
остатъчна отрицателна реактивност	малка	Пренебрежимо	Значителна
влияние върху разпределението на мощността по височина на касетата	добро	средно	Добро
влияние върху темп.коэф.	добро	средно	Отлично
влияние върху преработката на ОЯГ	съвместим с технологиите ⁽¹⁾	под въпрос	Не се предвиждат проблеми

⁽¹⁾ Gd се добавя при преработката на ОЯГ за предотвратяване на критичност в съдове с голяма концентрация на уран и плутоний.

2. Изменение на реактивността при различни състояния и режими

Ядреният реактор има две основни състояния:

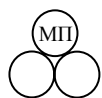
- състояние “подкритичен реактор” и
- състояние “критичен реактор”.

При **подкритичен реактор** коефициентът на размножение е по-малък от 1:

$$\rho_{зан}(t) + \rho_{H_2O} + \rho_{СУЗ} < 0 \quad 12.1$$

където запасната реактивност $\rho_{зан}(t)$ намалява с увеличаването на ефективните денонощия, означени тук с t .

Поради възможност от извличане или изхвърляне на орган или органи на СУЗ, изискването е за подкритичност без да се отчитат органите на СУЗ:



$$\rho_{зан}(t) + \rho_{H_3BO_3} < 0 \quad 12.2$$

При достигане на горещо състояние към положителната запасна реактивност и отрицателната реактивност от борна киселина се добавя отрицателната реактивност от температурния ефект от промяната на температурата между “студено състояние” и “горещо състояние”:

$$\rho_{зан}(t) + \rho_{H_3BO_3} + \rho_{TE}(c - z) < 0 \quad 12.3$$

За да се достигне критично състояние на нулева мощност (без производство на енергия, без ядрено греене на ТОЕ) ОР на СУЗ се повдигат по схема на стъпки с изчакване (виж раздел 14) след което се започва водообмен за намаляване на концентрацията на борна киселина. Неутронният поток нараства, тъй като подкритичният реактор усилва собствения неутронен източник от спонтанно делене и (α, n) реакция с коефициент на усилване, пропорционален на $\frac{1}{\rho}$, където ρ е сумата от запасната реактивност и всички ефекти на реактивност в зависимост от състоянието. Едно от най-важните условия за ядрена безопасност е да се установи контрол върху верижната реакция *преди* да се достигне критичност (виж раздел 14). Контрол означава регистрация на неутронния поток с интензивност, достатъчна за включване на защиты.

В **критично състояние** на нулева мощност $K=1$ или:

$$\rho_{зан}(t) + \rho_{H_3BO_3} + \rho_{СУЗ} + \rho_{TE}(c - z) = 0 \quad 12.4$$

където $\rho_{СУЗ}$ е отрицателната реактивност от регулиращата група. В критично състояние чрез изменение на коефициента на размножение около 1 се достигат различни нива на мощност. След достигане на критично състояние започва повишаване на мощността чрез извличане на ОР и намаляване на концентрацията на борна киселина до достигане на определеното ниво на мощност. Реакторът е критичен на мощност и към баланса на реактивността се добавя отрицателния мощностен ефект ρ_{ME} и допълнително увеличение на средната температура на активната зона от горещо състояние до работните температури, които съответствуват на мощността:

$$\rho_{зан}(t) + \rho_{H_3BO_3} + \rho_{СУЗ} + \rho_{TE}(c - z) + \rho_{TE}(z - p) + \rho_{ME} = 0 \quad 12.5$$

След 20-30 часа се достига стационарното отравяне от ^{135}Xe (виж раздел 8):

$$\rho_{зан}(t) + \rho_{H_3BO_3} + \rho_{СУЗ} + \rho_{TE} + \rho_{ME} + \rho_{Xe} = 0 \quad 12.6$$

където ρ_{TE} е общият температурен ефект.

След 10-20 дни се достига стационарното отравяне от ^{149}Sm (виж раздел 8):

$$\rho_{\text{зан}}(t) + \rho_{\text{HЗВОЗ}} + \rho_{\text{СВЗ}} + \rho_{\text{ТЕ}} + \rho_{\text{МЕ}} + \rho_{\text{Хе}} + \rho_{\text{Sm}} = 0 \quad 12.7$$

Критичното състояние на реактора на мощност и височината на регулиращата група в определения диапазон се поддържат чрез водообмен.

При активна зона без ИП запасната реактивност и концентрацията на борната киселина намаляват почти линейно. За приблизителни оценки може да се въведе величината

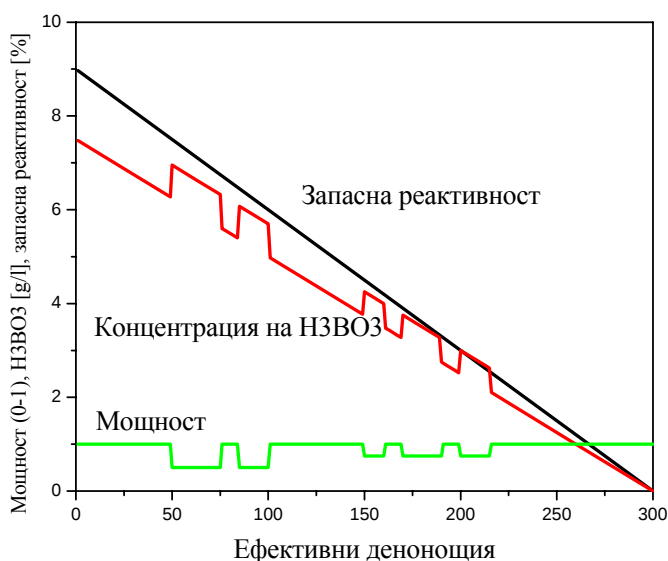
намаляване на запасната реактивност за едно ефективно денонощие (ЕД): $\frac{\partial \rho_{\text{зан}}}{\partial \text{ЕД}} \approx \frac{\rho_{\text{зан}}(0)}{N_{\text{камн}}}$,

където $N_{\text{камн}}$ е броят ефективни денонощия за съответната кампания, $\rho_{\text{зан}}(0)$ е началната запасна реактивност минус температурния и мощностния ефект, минус стационарното отравяне от ^{135}Xe и ^{149}Sm . При поддържане на една и съща мощност намаляването на запасната реактивност за известен брой ефективни денонощия ΔN се компенсира от намаляването на концентрацията на борната киселина с ΔC_B :

$$\Delta N \frac{\partial \rho_{\text{зан}}}{\partial \text{ЕД}} + \Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B} = 0 \quad 12.8$$

където $\frac{\partial \rho}{\partial C_B}$ е коефициентът на реактивност по борна киселина.

На Фиг.12.2 е показано качествено изменението с ефективните денонощия на запасната реактивност и на концентрацията на борна киселина при различна мощност *за случая без ИП*.



Фиг.12.2. Изменение с ефективните денонощия на запасната реактивност и на концентрацията на борна киселина при различна мощност за случай без ИП. При намаление на мощността концентрацията на борна киселина се увеличава за компенсиране на мощностния ефект

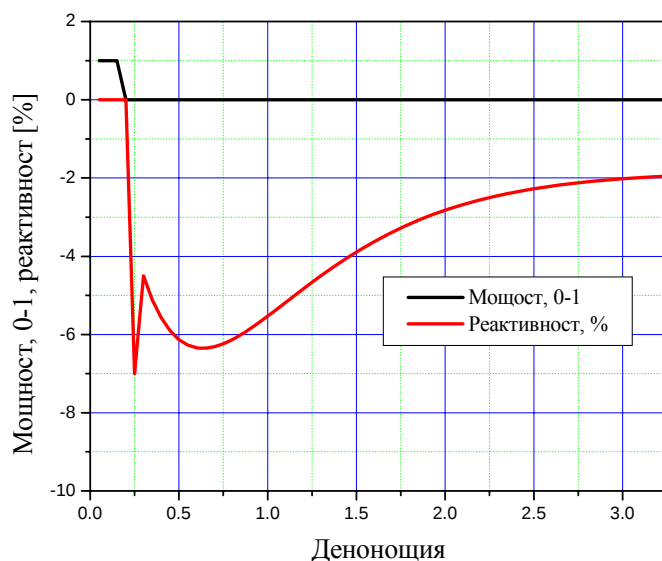
При наличие на изгарящ поглътител приближенията в горния параграф не са валидни. Възможно е дори *въвеждане* на борна киселина в началния период при наличие на значително количество изгарящ поглътител, при който запасната реактивност преминава през максимум.

При спиране на реактора, реакторът преминава в подкритично състояние, което се изменя във времето поради преходните процеси от отравяне и разотравяне от ^{135}Xe и отравяне от ^{149}Sm :

$$\rho_{\text{зан}}(t) + \rho_{\text{H3BO3}} + \rho_{\text{TE}} + \rho_{\text{ME}} + \rho_{\text{Xe}}(t) + \rho_{\text{Sm}}(t) + \rho_{\text{CVZ}} < 0 \quad 12.9$$

Тук ρ_{ME} е освободеният мощностен ефект, ρ_{TE} е освободеният температурен ефект от разхлаждането до дадена температура, по-ниска от средната температура на АЗ преди спирането с няколко десетки градуса. ρ_{ME} и ρ_{TE} са *бързопроявяващи* се ефекти, за ВВЕР-1000 бързопроявяващ се ефект е и прекратяването на кипенето в горната част на зоната, т.е. реактивността от паровия ефект. По-нататъшното намаление на температурата е бавен процес.

На Фиг.12.3 е показано качествено развитието във времето на реактивността след спиране без да се въвежда борна киселина.



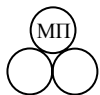
Фиг.12.3. Развитие във времето на реактивността след спиране с аварийна защита без да се въвежда борна киселина. Бързопроявяващите се ефекти освобождават положителна реактивност в рамките на секунди и минути (на фигурата времето е увеличено)

Ако не се въвежда борна киселина, при разхлаждане е възможно да се достигне отново критично състояние поради освободения температурен ефект. Това явление се нарича **“повторна критичност”** и представлява значим ядрен инцидент. Най-голяма опасност от повторна критичност има в края на кампанията, когато температурният коефициент на реактивност е максимален по абсолютна стойност.

Ако подкритичността е $\rho_{подкр}$, то температурата, при която възниква повторната критичност или “температура на повторна критичност” може да се оцени от:

$$\Delta T \frac{\partial \rho}{\partial T} + \rho_{подкр} = 0, \quad 12.10$$

където ΔT е промяната в температурата, а $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ е температурният коефициент на реактивност за даденото състояние. При разглеждането на това явление не е отчетено отравянето от ксенон, ако разхлаждането става след спиране на реактора преди да се е разотровил. Ако има преходни процеси от ксенон те трябва да се отчетат.



След достигане на концентрация на борната киселина 0 в края на кампанията и изчерпване на реактивността от постепенното изваждане на ОР на регулиращата група за реактор ВВЕР-440 (“работа на пръти”) е възможно да се продължи работата на реактора на понижена мощност поради освободената реактивност от мощностен ефект и от по-малкото стационарно отравяне от Хе. Този режим на работа се нарича **“работа на мощностен ефект”**.

Приблизителна оценка за ефективните денонощия ΔN , които реакторът може да работи на “мощностен ефект” за случая без ИП може да се направи от съотношението:

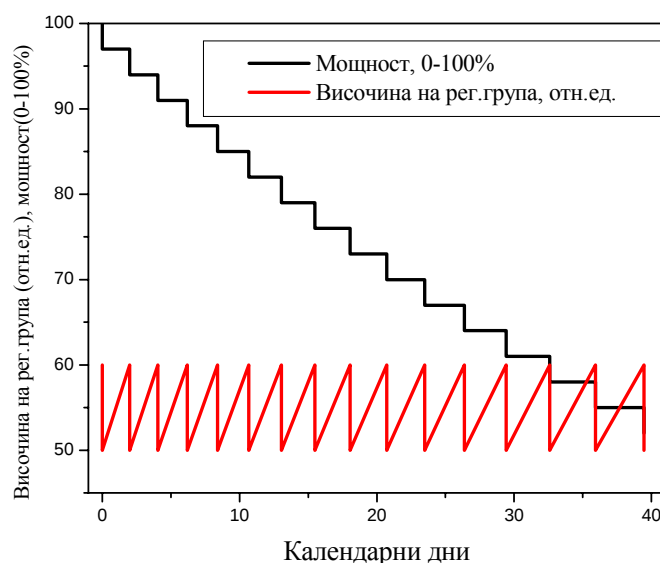
$$\Delta N \frac{\partial \rho_{зан}}{\partial EД} + \Delta \rho_{Хе} + \Delta \rho_P = 0, \quad 12.11$$

където $\Delta \rho_{Хе}$ и $\Delta \rho_P$ са освободената реактивност от Хе и от мощностен ефект за крайната мощност.

При работа на “мощностен ефект” мощността се изменя на малки стъпки, за да не се изпадне в “йодна яма”. Мощността може да се изменя с регулиращата група или с инжектиране на борна киселина и последващ водообмен до концентрация 0.

На Фиг.12.4 е показана качествено работа на мощностен ефект с промяна на мощността с регулиращата група. Една стъпка е 2 ефективни денонощия. Според ТР на блокове 1 - 6 има ограничение за работа до 30 ефективни денонощия по мощностен ефект, ако не се превиши ограничението по максимална дълбочина на изгарянето за дадена касета.

При работа на мощностен ефект се налага добавяне на повече свежо гориво за следващата кампания, което може доведе до положителен температурен коефициент на реактивност в началото на кампанията. Схемите на зареждане се проверяват и варират докато се намери схема удовлетворяваща $ТКР < 0$ и всички останали условия.



Фиг.12.4. Работа на мощностен ефект с промяна на мощността с регулиращата група.
Една стъпка е 2 ефективни денонощия.

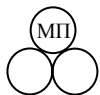
3. МЕТОДИ ЗА ИЗМЕНЕНИЕ НА РЕАКТИВНОСТТА

Управлението на мощността на реактора винаги се основава на изменение на съотношението между скоростите на генерация, поглъщане и утечка на неутрони. То може да става за сметка на изменение на скоростта на всяка една от тези реакции, или едновременно на няколко от тях. Тук трябва да се отбележи, че мощността на реактора е постоянна само при точно спазване на неутронния баланс - равенство на скоростта на генерация на сумата от скоростите на поглъщане и утечки. Следователно нарушаването на баланса с цел изменение на мощността може да бъде само *временно* - до достигане на желаната мощност, след което балансът трябва да бъде възстановен.

Първата от трите функции на СУЗ при ВВЕР се основава на изменение на скоростта на поглъщане на неутрони чрез промяна на концентрацията на борна киселина (H_3BO_3) в топлоносителя, който е и забавител. Поглъщането на неутрони се дължи на изотопа ^{10}B , който е 19.6 % от природната изотопна смес на бора. Реакцията е:

$^{10}\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \alpha$, сечението й за топлинни неутрони е 3837 b, а резонансният интеграл при безкрайно разреждане е 1722 b.

В момента се разработват проекти за реактори без регулиращи органи, които се регулират и саморегулират с промяна на температурата или разхода.



Съществуват реактори със специално предназначение (импулсни реактори, реактори за хранене на космически апарати), които се регулират с отражател на неутрони.

3.1. Органи за управление при ВВЕР

За осигуряване на нормална експлоатация всеки реактор е снабден със система за управление и защита (СУЗ). Тази система дава възможност за:

- компенсиране на бавните изменения на коефициента на размножение (реактивността), причинени от изгарянето, възпроизводството (натрупване на делящи се трансуранови нуклиди поради залавяне на неутрони от ^{238}U), шлакуването, отравянето и температурните ефекти;

- автоматично и ръчно регулиране, т.е. поддържане на мощността на реактора на зададено ниво и промяна на нивото на мощността.

- бързо и надеждно прекратяване на верижната реакция при възникване на аварийна ситуация в реактора или енергетичната установка.

В съответствие с тези функции в реакторната технология е прието органите за управление се делят на три групи - компенсиращи, регулиращи и аварийни. Чисто компенсиращи ОР има само в едноконтурните ядрени блокове.

3.2. Механична система за регулиране

При ВВЕР-440 втората и третата функции на СУЗ се базират на изменение както на скоростта на поглъщане, така и на скоростта на генерация на неутрони чрез придвижване по височина на активната зона на 37 касети АРК. За опростяване на управлението касетите АРК са обединени в 6 групи, всяка от които включва касети, разположени симетрично спрямо завъртане на 60° .

Касетата АРК се състои от две части. Горната част е куха шестоъгълна призма от стомана с примес на бор, през която протича топлоносителът. Такава конструкция се нарича "неутронен капан" и се отличава с голяма ефективност при поглъщане на неутрони, особено при реакторите ВВЕР, където неутроните не могат да достигнат топлинни енергии поради недостатъчното количество забавител (малка стъпка на решетката от горивни елементи). Надтоплинните неутрони навлизат във вътрешността на неутронния капан, където се забавят във водата до топлинни енергии, при които сечението за поглъщане на неутрони от ^{10}B е максимално. Долната част на касетата АРК е обикновена горивна касета. Преместването на

касета АРК по оста на активната зона води до изменение едновременно на скоростта на генерация и на скоростта на поглъщане на неутрони, но в противоположни посоки, като по този начин се постига още по-голяма ефективност на механичната система за управление на реактора. Основните недостатъци на тази конструкция са, че причинява голяма неравномерност на пространственото разпределение на неутронния поток (т.е. на енергоотделянето) в активната зона и че изисква свободна височина на корпуса три пъти по-голяма от височината на активната зона.

При ВВЕР-1000 в 61 от общо 163-те касети могат да се въвеждат снопове (кластери) от поглъщащи пръти. По управление кластерите са обединени в 10 групи, всяка от които включва кластери, разположени симетрично спрямо завъртане на 60°. Всеки кластер се състои от 18 поглъщащи елемента (ПЕЛ) с диаметър, приблизително равен на диаметъра на горивните елементи. Поглъщащият елемент е от В₄С в цилиндрична обвивка от неръждаема стомана. Като недостатък на ОР на СУЗ на ВВЕР-1000 може да се посочи относително по-малката пълна ефективност в сравнение с ВВЕР-440.

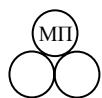
Част от групите, наречени работни, се използват за оперативно управление на реактора, а останалите са извън активната зона и служат за аварийна защита (бързо спиране на реактора и компенсиране на освободената реактивност от мощностния ефект и разотравянето на активната зона). Изборът на работните групи и дълбочината на разполагането им в активната зона се прави чрез пресмятания на НФХ на АЗ така, че да имат нужната интегрална и диференциална ефективност при минимална неравномерност на енергоотделянето в активната зона.

Компенсирането на изменението на реактивността поради изгаряне и отчасти компенсирането на температурния ефект от студено състояние до работна температура на топлоносителя са за сметка на промяна на концентрацията на борна киселина.

Поглъщащото вещество след време “изгаря” и се налага подмяна на ОР. Времето на експлоатация на ОР може да се удължи чрез планиране и смяна на групите за регулиране и защита и чрез минимизиране на престоя в АЗ.

3.3. Борно регулиране

Механизмът на въздействие на разтворения в забавителя поглъстител е аналогичен на ефекта от отравянето и шлакуването на горивото от продукти на деленето. И в двата случая ефектът върху коефициента на размножение е чрез изменение на коефициента на



използване на топлинните неутрони f в елементарната реакторна клетка (горивен елемент и принадлежащото му количество забавител).

Увеличаването на количеството на поглътителя в елементарната клетка (в областта на забавителя при борно регулиране и в областта на горивото при шлакуване и отравяне) *намалява* стойността на f . Увеличаването на поглъщането в забавителя намалява дължината на дифузия на топлинните неутрони. От една страна това причинява относително намаляване на потока на топлинните неутрони в горивото и оттам допълнително намаляване на f , а от друга страна намалява и вероятността за утечка на топлинни неутрони от активната зона. По принцип последното би трябвало да подобри размножаващите свойства на реактора, но поради големите му размери и наличието на отражател този ефект на практика може да се пренебрегне.

Следователно въздействието на разтворения в забавителя бор върху k_{eff} е чрез k_{∞} . Нека k_{∞} е коефициентът на размножение в елементарната клетка без течен поглътител, а k'_{∞} е същата величина при ядрена концентрация на ^{10}B в забавителя N_B ядра в cm^3 . Тогава ефектът върху реактивността ще бъде:

$$\rho_B = (k'_{\infty} - k_{\infty}) / k_{\infty} = (f' - f) / f$$

f е отношението на скоростта на поглъщане на топлинни неутрони в горивото към пълната скорост на поглъщане на топлинни неутрони в елементарната клетка. Ако Φ_0 и Φ_1 са средните потоци на топлинни неутрони извън и в горивната област съответно, а Σ_U , Σ_M , Σ_B и Σ_P са средните сечения за поглъщане на топлинни неутрони в горивото (U), забавителя (M), борната киселина (B) и продуктите на делене-отровители (P), то:

$$\begin{aligned} f' &= \frac{\Sigma_U \Phi_1}{\Sigma_U \Phi_1 + \Sigma_P \Phi_1 + \Sigma_M \Phi_0 + \Sigma_B \Phi_0} \\ &= \frac{1}{1 + q_P + q_M + q_B} \\ f &= \frac{\Sigma_U \Phi_1}{\Sigma_U \Phi_1 + \Sigma_P \Phi_1 + \Sigma_M \Phi_0} \\ &= \frac{1}{1 + q_P + q_M} \end{aligned}$$

Величините q_{α} са $\Sigma_{\alpha} \Phi_j / \Sigma_U \Phi_1$, $j = 0, 1$. Предполага се, че наличието на бор не променя съществено Φ_0 / Φ_1 . В това има грубо основание, тъй като увеличаването на поглъщането в забавителя намалява *едновременно* Φ_0 и Φ_1 . Тогава:

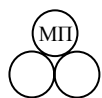
$$\begin{aligned}\rho_B &= (f' - f) / f \\ &= \frac{1 + q_P + q_M}{1 + q_P + q_M + q_B} - 1 \\ &= \frac{-q_B}{1 + q_P + q_M + q_B}\end{aligned}$$

Сред величините в знаменателя на значителни изменения подлежат q_B и q_P (чрез ксеноновото отравяне). Вижда се, че между тях има отрицателна интерференция - по-голямото отравяне намалява ефекта от разтворимия погълтител и обратното - по-голямата концентрация на погълтител намалява отравянето.

От израза за ефективността на разтворимия бор ρ_B може да се съди и за характера на диференциалната ефективност $\partial \rho_B / \partial C_B$. C_B е концентрацията на бор в топлоносителя. Прието е C_B да се представя като масова концентрация в грамове бор (природна смес) на килограм топлоносител или чрез $C_{H_3BO_3}$ в грамове борна киселина на килограм топлоносител. Връзката между тях е $C_{H_3BO_3} = 5.72 C_B$.

При дадена плътност на забавителя обемната концентрация на ^{10}B N_B е пропорционална на C_B . Следователно $\rho_B = -C_B / (a + bC_B)$, а $\partial \rho_B / \partial C_B = -a / (a + bC_B)^2$. Вижда се, че диференциалната ефективност на C_B намалява по абсолютна стойност с увеличаването на C_B .

За управлението на реактора е особено важна връзката между ефективността на разтворимия бор и плътността на топлоносителя. При увеличаване на температурата T на топлоносителя плътността му γ намалява и при постоянна тегловна концентрация C_B обемната концентрация N_B намалява по същия начин. На практика това означава намаляване на ефективността на разтворимия бор с 20-30% при подгриване на активната зона от студено състояние до работна температура. **Ефективността на разтворимия бор намалява с температурата** и поради зависимостта на микроскопичното сечение σ_a^B пропорционално на $1/\sqrt{T}$. При представянето на ефектите и коефициентите на реактивността тези явления се включват в температурните и плътностни ефекти и коефициенти на реактивността. Там те се наслагват с другите механизми на изменение на размножаващите свойства на реактора с температурата и плътността на топлоносителя. Еднозначни изводи за знака и големината на сумарните ефекти и коефициенти не могат да се правят, но общото правило е, че с повишаване на C_B температурният ефект и коефициент (които са отрицателни) намаляват по



абсолютна стойност, а над определена стойност на C_B коефициентът на реактивността по температура на топлоносителя може да стане *положителен*.

Ефектите и коефициентите на реактивността се пресмятат наред с другите неутронно-физични характеристики на активната зона и се представят в съответните отчети. При пускане и експлоатацията на реактора те се потвърждават и уточняват експериментално.

В заключение трябва да се отбележи, че ефективността на борното регулиране по принцип трябва да намалява с изгарянето на ^{10}B , ако борната киселина циркулира в затворен кръг и няма постъпления на нови количества. На практика този ефект не се проявява в чист вид, тъй като в процеса на работа на реактора се добавя свежа борна киселина и се отстранява част от вече изгорялата. Независимо от това, трябва да се придобие качествена представа за ефекта от изгарянето на ^{10}B .

Скоростта на намаляване на ядрената концентрация на ^{10}B е равна на скоростта на поглъщане на неутрони от ^{10}B :

$$\frac{dN_B}{dt} = -N_B \sigma_B \Phi$$

Решението на това диференциално уравнение е:

$$N_B(t) = N_B(0) \cdot \exp(-\sigma_B \Phi t)$$

Времето за престояване на борната киселина в активната зона може да се оцени по обема на водата в активната зона и обема на водата в I контур, $t_{A3} = V_{A3}/V_I$. Това отношение е приблизително 1/40. По друг начин тази оценка може да се направи чрез времето за преминаване на водата по I контур - около 20 s за ВВЕР-440, и времето за преминаване през АЗ - около 0.5 s (при скорост ~ 5 m/s).

Тогава уравнението за намаляване на бор-10 в топлоносителя придобива вида;

$$N_B(t) = N_B(0) \cdot \exp(-\sigma_B \Phi t / 40)$$

Приемаме, че изгарянето на ^{10}B става само чрез поглъщане на топлинни неутрони, $\sigma_B \cong 2.2 \cdot 10^3$ b. Приемаме среден поток $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

За линейно намаляване на борната киселина от $N_0 = 1$ (7 - 7.5 g/kg H_3BO_3) до 0 g/kg за 300 денонощия, уравнението за частта борни ядра погълнали неутрон е:

$$N_B = \int_0^t (1 - ax) \sigma \Phi \frac{1}{40} dx,$$

където $a = 1/300 \times 86400$, $t = 300 \times 86400$ s, $86400 = 24 \times 3600$ s

Резултатът е 3.56 % изгорели ядра бор-10, или за 300 еф.денонощия 3.56 % от ядрата на бор-10 ще погълнат неутрон, ако няма загуби на вода.

При рециклиране на борна киселина (пречистена чрез рекристализация) е необходимо да се вземе проба, да се направи таблетка, да се измери пропускането на топлинни неутрони и да се сравни с еталонни таблетки.

Изискванията към системите за въздействие върху реактивността са определени в **НАРЕДБА № 3 от 24.11.1987 г. за осигуряване безопасността на атомните централи при проектиране, изграждане и експлоатация:**

“Раздел III Системи за въздействие на реактивността

Чл . 28. Предвиждат се най-малко две независими системи (независими органа или две независими групи органи) за въздействие на реактивността, които е желателно да бъдат основани на различни принципи .

Чл . 29. (1) Поне две от предвидени независими системи за въздействие на реактивността трябва да бъдат способни независимо една от друга да осигурят преминаване от всяко състояние на нормална експлоатация в подкритично състояние и поддържане на това състояние при работна температура на топлоносителя и забавителя.

(2) Преминаването в подкритично състояние трябва да става достатъчно бързо, за да се предотврати повреждането на топлоотделящите елементи над допустимите предели при всяко отчитано изходно събитие.

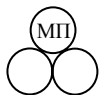
Чл . 30. (1) Поне една от предвидените независими системи за въздействие на реактивността трябва да осигурява преминаване от всяко състояние на нормална експлоатация в подкритично състояние при всякакви условия и при преходните процеси на отчитаните изходни събития.

(2) Преминаването в подкритично състояние трябва да става достатъчно бързо, за да се предотврати повреждането на топлоотделящите елементи над допустимите предели при всяко отчитано изходно събитие в съответствие с принципа на единичния отказ в дадената система , в това число при незадействуване на един най-ефективен орган за въздействие на реактивността.

(3) Допуска се разделяне на пълния диапазон на изменение на реактивността в посочените преходни процеси на няколко температурни и режимни диапазона, като за всеки диапазон се използва част от указаната система (от органите, някои групи органи) и се прилага принципът на единичния отказ за всяка част на системата .

Чл . 31 . Поне една от предвидените независими системи за въздействие на 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 незадействуване на един най – ефективен орган за въздействие на реактивността.

Чл . 32. Системата за въздействие на реактивността и характеристиките на активната зона да осигуряват отсъствие или бързо потискане при нормална експлоатация на такива колебания на мощността и разпределение



на енергоотделянето, в резултат на които за времето на кампанията на активната зона може да стане повреждане на топлоотделящите елементи над пределите за нормална експлоатация.

Чл . 33. Системата за въздействие на реактивността в случай на единично нарушение в системата за контрол и управление трябва да осигурява потискане на положителната реактивност, свързана с изваждане на органи за въздействие на реактивността (границите на проектните скорости), без повреждане на топлоотделящите елементи над пределите за нормална експлоатация.

Чл . 34. Максималната ефективност на органите за въздействие на реактивността и максималната възможна скорост на нарастване на реактивността в случай на погрешно действие на персонала или единично нарушение на което и да е устройство на АЦ да бъдат ограничени по такъв начин, че ефектът от следващото повишаване на мощността да не довежда до:

1. превишаване на максимално допустимото налягане на първи контур;
2. недопустимо влошаване ефективността на отвеждане на топлината или до разтопяване на топлоотделящите елементи.”

3.4. Определяне на интегралната и диференциалната ефективност на регулиращите пръти

Точното определяне на ефективността на регулиращите пръти се прави чрез неутронно-физични пресмятания на активната зона при различни дълбочини на изгаряне, независими параметри на състоянието, концентрации на борна киселина и конфигурации на разположението органите за регулиране. В процеса на пускането на реактора се правят и експерименти за определяне на действителната им ефективност. Качествена оценка на ефективността на регулиращите пръти обаче може да се направи и чрез елементарни разглеждания.

Ефективността на регулиращия прът се определя чрез сравняването на k_{eff} за две състояния на реактора - без регулиращ прът (k_1) и с въведен *напълно* регулиращ прът в *центъра* на активната зона (k_2). При тези условия търсената ефективност е $\delta k = k_1 - k_2$.

Ефективността на регулиращия прът се определя от два ефекта, всеки от които води до намаляване на k_{eff} на реактора. Първият, и основен, е поглъщането на неутрони. Вторият е свързан с увеличението на утечката на неутрони от реактора, което се дължи на относителното увеличаване на неутронния поток близо до границата на активната зона при въвеждане на съсредоточен поглъстител във вътрешността ѝ.

Наличието в активната зона на поглъщащ прът може да се разглежда като възникване във вътрешността на зоната на нова граница, където неутронният поток става нулев. Мястото на тази граница се определя от ефективния радиус на пръта, който винаги е по-малък от

геометричния, тъй като преди да бъдат погълнати, неутроните навлизат в него на някаква дълбочина.

Граничното условие за неутронния поток на повърхността на поглъщащия прът R , записано по подобие на граничното условие на повърхността на реактора, е:

$$\left. \frac{d\Phi(r)}{dr} \right|_{r=R} = -\frac{1}{d}\Phi(R), \text{ където } d \text{ е дължина на екстраполация.}$$

Съгласно дифузионната теория $d = 0.71\lambda_{tr}$. $\lambda_{tr} \equiv 1/\Sigma_{tr}$ е транспортната дължина в поглътителя, а $\Sigma_{tr} \equiv \Sigma_a + \Sigma_s(1 - \overline{\cos\theta})$. $\overline{\cos\theta} \cong 2/(3A)$ е средният косинус на разсейване на неутроните в ядрата на поглътителя с маса A . При известни състав и плътност на материала на поглътителя (напр. BC_4) и енергетичен спектър на навлизащите в него неутрони, λ_{tr} може лесно да се пресметне.

Горният израз за d е в сила за плоска граница (голям радиус на поглътителя). При поглътители с малък радиус, в които неутронният ток се "фокусира", множителят пред λ_{tr} е по-голям и може да достигне 1.33. Ако поглътителят не е "черен", т.е. не поглъща всички навлезли в него неутрони, дължината на екстраполация става още по-голяма.

Разгледаното гранично условие е еквивалентно на изискването неутронният поток да стане нулев при $r = R_{eff}$, където ефективният радиус на поглъщащия прът е $R_{eff} = R \cdot \exp(-d/R)$.

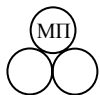
За голям реактор на топлинни неутрони в критично състояние с достатъчна точност е приложимо еднотруповото дифузионно уравнение за неутронния поток $\Phi(\mathbf{r})$. Тъй като уравнението е хомогенно (няма независим източник на неутрони), то може да се запише във вида:

$$\nabla^2\Phi + B^2\Phi = 0.$$

B^2 е функция на материалните свойства на средата и за да бъде реакторът критичен, трябва да бъде изпълнено условието:

$$k_{eff} = k_{\infty} / (1 + B^2 M^2) = 1$$

M^2 е площта на миграция на неутроните, равна на средния квадрат на разстоянието, което неутроните изминават в реактора от възникването им при делене до поглъщането им.



От друга страна, от граничните условия на дифузионното уравнение (потокът да бъде равен на нула на външната граница на реактора) следва, че $B^2 = B_r^2 + B_z^2 = (2.405/R)^2 + (\pi/H)^2$, където R и H са съответно радиусът и височината на активната зона.

Поради последното равенство B^2 се нарича *геометричен параметър*, а ако бъде представено чрез условието за критичност като функция на материалния състав на реактора, се нарича *материален параметър*. Едновременното изпълнение на условието за критичност и на граничните условия изисква *равенство* на материалния и на геометричния параметър.

Решението на дифузионното уравнение може да се представи във вида:

$\Phi(\mathbf{r}) = \Phi(r) \cdot \Phi(z)$, където:

$$\Phi(r) = A_1 J_0(B_r^2 r) \text{ и } \Phi(z) = A_2 \sin(B_z^2 z)$$

J_0 е функция на Бесел от първи род и нулев ред, а A_1 и A_2 са произволни константи.

Тъй като наличието на поглъщащ прът води до появата на нова граница във вътрешността на реактора, ефектът върху k_{eff} ще се обуславя от изменението на геометричния параметър ΔB^2 :

$$\Delta k_{\text{eff}} = -k_{\infty} M^2 \Delta B^2 / (1 + B^2 M^2)^2$$

Началното състояние е критично и следователно $k_{\infty} / (1 + B^2 M^2) = 1$, поради което:

$$\Delta k_{\text{eff}} = -M^2 \Delta B^2 / (1 + B^2 M^2)$$

За голям водно-воден реактор $B^2 M^2 \ll 1$ и знаменателят може да се пренебрегне, така че:

$$\Delta k_{\text{eff}} = -M^2 \Delta B^2$$

За запазване на критичността това изменение трябва да се компенсира от съответно увеличение на k_{∞} (практически тази ситуация съответствува на компенсиране на ефекта от въвеждането на регулиращия прът със съответно намаляване на концентрацията на борна киселина):

$$\Delta k_{\infty} = -\Delta k_{\text{eff}} (1 + B^2 M^2) \cong M^2 \Delta B^2$$

B^2 се изменя само за сметка на B_r^2 и ΔB^2 се намира чрез прилагане за $\Phi(r)$ на граничните условия при въведен поглъщащ прът:

$\Phi(R) = \Phi(R_{eff}^C) = 0$, където R е радиусът на активната зона, а R_{eff}^C е ефективният радиус на поглъщащия прът.

Окончателният резултат за ефективността на напълно въведен в центъра на реактора поглъщащ прът с ефективен радиус R_{eff}^C е:

$$\Delta k_{eff} = \frac{-7.5M^2}{R^2} \times \frac{1}{\ln(R/(2.405R_{eff}^C)) + 0.116}$$

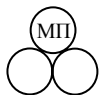
От този израз могат да се направят следните изводи:

- Ефективността на пръта е пропорционална на площта на миграция. Това е така, защото с увеличаването на площта на миграция се увеличава вероятността за попадане на неутроните в поглъщащия прът. Едновременно с това нараства и утечката на неутрони от активната зона и за поддържане на зададената мощност е нужно да се увеличи неутронният поток в центъра - там, където е поглъщащият прът. Това увеличава допълнително неговата ефективност (скоростта на реакцията на поглъщане).

Площта на миграция нараства с намаляването на плътността на средата (увеличаване на средната температура на активната зона), както и с намаляването на сечението за поглъщане на неутрони (т.е. намаляване на обемната концентрация на борна киселина или увеличаване на дълбочината на изгаряне). **Следователно ефективността на ОР на СУЗ ще расте с температурата и с намаляването на концентрацията на борна киселина.** Ефективността на ОР СУЗ ще расте и с увеличаване на дълбочината на изгаряне.

Първите две от своя страна са свързани - при фиксирана тегловна концентрация на бор обемната намалява с намаляването на плътността на топлоносителя. На практика това означава, че при подгряване на активната зона до работна температура ефективността на ОР на СУЗ трябва да нарасне.

Друго следствие е отрицателната интерференция между течното борно регулиране и ОР на СУЗ - колкото повече реактивност е компенсирана от борната киселина, толкова по-ниска е ефективността на регулиращите пръти. В течение на кампанията с увеличаване на дълбочината на изгаряне концентрацията на борна киселина в забавителя, нужна за



компенсиране на запасната реактивност, се намалява, поради което ефективността на ОР на СУЗ нараства допълнително.

- Ефективността на регулиращия прът е обратно пропорционална на квадрата на радиуса на активната зона, тъй като с намаляването на размера ѝ утечките при въведен поглъщащ прът нарастват.

- Ефективността на регулиращия прът нараства с увеличаване на неговия радиус, тъй като с това нараства обемът на ефективно работещия поглъстител.

Ефективностите на ексцентрично разположен или частично въведен поглъстител се оценяват чрез разгледаната вече ефективност на напълно въведен по оста на активната зона поглъщащ прът.

С отдалечаването на поглъщащия прът от центъра на зоната ефективността му намалява по две причини:

- Първо, намалява скоростта на поглъщане на неутрони, която е пропорционална на неутронния поток $\Phi(r,z)$.

- Второ, ценността на неутроните намалява към периферията на активната зона (поради намаляване на вероятността за избягване на утечка) и тяхното поглъщане оказва по-малък ефект върху коефициента на размножение на реактора.

Ефективността на регулиращия прът е пропорционална на произведението на плътността на неутронния поток и ценността на неутроните, която от своя страна е приблизително пропорционална на относителната плътност на неутронния поток $\Phi(r,z)/\Phi_{\max}$.

Поради това обикновено се приема, че ефективността на регулиращия прът е пропорционална на квадрата на плътността на неутронния поток в неговата околност.

За определяне на ефективността на прът, разположен на радиус r_i в активната зона е нужно към ефективността на еднакъв с него централно разположен прът да се внесе поправка, отчитаща разликата между плътността на неутронния поток по оста на реактора и в мястото на разполагане на ексцентрично разположения прът:

$$\delta k(r_i) = \delta k(0) \frac{\int_0^H \Phi^2(r_i, z) dz}{\int_0^H \Phi^2(0, z) dz}$$

Интерференция между прътите

Сумарната ефективност на група от регулиращи пръти в общия случай не е равна на сумата от ефективността на всеки един от тях, въведен поотделно.

Това се обяснява с факта, че в околността на въведения поглъtitел неутронният поток спада, при което на известно разстояние от него потокът има максимум (такъв максимум има винаги, тъй като потокът спада до нула на повърхността на реактора).

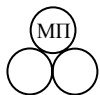
Когато прътите са разположени близо един до друг, тяхната интерференция е отрицателна - т.е. сумарната им ефективност е по-малка от сумата от техните индивидуални ефективности, тъй като всеки следващ въведен прът попада в област с намален от другите неутронен поток.

С раздалечаването на прътите тяхната обща ефективност нараства и след определено разстояние става по-голяма от сумата на индивидуалните им ефективност, тъй като всеки нов прът попада в максимума, причинен от въвеждането на останалите пръти. От друга страна прътите, за които интерференцията е вече положителна, се оказват в периферията на активната зона, където ефективността им спада.

Оптимален от гледна точка на ефективността начин на разполагане на прътите е, когато всеки следващ попада в максимум на неутронното поле, обусловен от действието на другите пръти. При избиране на конфигурацията на регулиращите пръти в активната зона стремежът е да се постигне максимална равномерност на неутронния поток. Това се отнася за избора на работните групи кластери и на дълбочината на въвеждането им в активната зона на ВВЕР-1000.

Задачата за избор на оптимална конфигурация на ОР на СУЗ се усложнява от преразпределянето на неутронния поток в процеса на изгарянето и от факта, че горивните елементи в околността на поглъщащите елементи изгарят по-слабо, т.е. запазват по-добри локални размножаващи свойства. При извеждане на поглъtitелите тяхното място се заема от забавителя и там възникват максимуми на потока на топлинните неутрони, което в съчетание с по-голямото сечение за делене на околните горивни елементи може да доведе до локално превишаване на допустимата плътност на енергоотделянето, до прегряване и даже разхерметизиране на горивните елементи.

Особен случай на силна интерференция се получава, когато при задействане на аварийната защита само един ОР не се задейства по някаква причина (електрическа,



механична). Тогава поради преразпределение на неутронния поток – изтегляне на максимума на неутронния поток на мястото на липсващия ОР и намаление на неутронния поток в областта на останалите – намалява ефективността на органите за регулиране, които са в зоната. Липсващият ОР се оказва с много голяма тежест, превишаваща неколkokратно тежестта на ОР при самостоятелно движение. За разбиране на явлението може да се мисли и по следния начин: ако липсващият ОР започне движение надолу, той ще попадне в област с много висок неутронен поток и поради това ще бъде с голяма тежест.

Опасна ситуация може да възникне и при изхвърляне на ОР, когато всички останали ОР са долу. Тогава изхвърленият ОР поради същото преразпределение на потока “вкарва” значителна положителна реактивност поради намаляване на неутронния поток в областта на останалите ОР и намаляване на тяхната ефективност.

Зависимост на ефективността на поглъщащия прът от дълбочината на въвеждането му

Прието е положението на регулиращия прът да се измерва с разстоянието от долния му край до дъното на активната зона или с частта (%) на потопяване.

Ефективността на частично въведен прът се определя аналогично на ефективността на ексцентрично разположен прът:

$$\delta k(r_i, z) = \delta k(r_i, 0) \frac{\int_0^z \Phi^2(r_i, z) dz}{\int_0^H \Phi^2(r_i, z) dz}$$

В идеализирания случай разпределението на неутронния поток по височината на активната зона е пропорционално на $\sin(\pi z/H)$ и има максимум в центъра на активната зона. Следователно:

$$\delta k(r_i, z) = \delta k^{\max}(r_i) \left(\frac{z}{H} - \frac{1}{2\pi} \sin \frac{2\pi z}{H} \right)$$

Графиката на тази функция наподобява разтеглено S.

За работните ОР на СУЗ, които при нормална работа на реактора са частично въведени в активната зона и служат за оперативно регулиране на реактора, е особено важна *диференциалната* ефективност, която се определя като $d\delta k(z)/dz$. По принцип тяхната

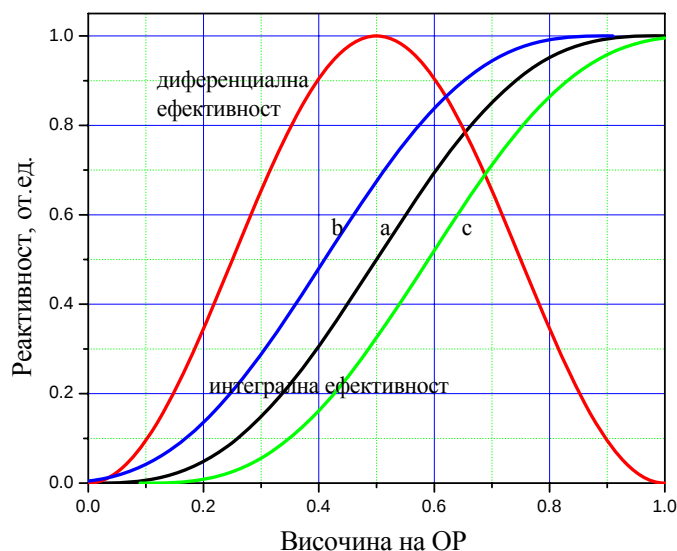
работна височина z се избира така, че диференциалната им ефективност да бъде максимална и тя съвпада с максимума на аксиалното разпределение на неутронния поток.

При синусоидално разпределение на потока графиката на диференциалната ефективност е камбановидна крива с максимум в центъра на активната зона.

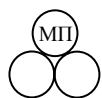
На практика аксиалното разпределение на неутронния поток не съвпада с идеализираното и се мени в хода на изгарянето.

В началото на кампанията максимумът на енергоотделянето (респ. неутронния поток) е в долната част на активната зона - на 20-30% от височината ѝ. Това се дължи на факта, че с подгряването на топлоносителя ($\approx 30^\circ\text{C}$) се проявяват механизми, разгледани по повод на температурната зависимост на k_∞ , които влошават размножаващите свойства на решетката.

С течение на времето дълбочината на изгаряне на горивото в долната част става по-голяма от тази в горната, така че размножаващите свойства в долната част постепенно се влошават и максимумът на неутронния поток започва да се измества нагоре. Примерно в средата на кампанията разпределението на потока наподобява идеализираната синусоидална форма, а в края на кампанията максимумът се измества до 80-90% от височината на активната зона.



Фиг.12.5. Диференциална и интегрална ефективност на орган за регулиране: а)- симетрично енергоотделяне по височина на активната зона, при изместване на енергоотделянето към долната част на зоната кривите се отместват към по-голяма дълбочина



на потапяне в зоната - b); при изместване на енергоотделянето към горната част на зоната кривите се отместват към по-малка дълбочина на потапяне в зоната - c). Поради силната деформация на неутронното поле по височина реалните диференциални и интегрални ефективности могат силно да се отличават от показните форми като се запазва общата зависимост.

3.5. Динамика на концентрацията на разтворимия поглътител

Концентрацията на разтворим поглътител C_B в топлоносителя на I контур трябва да може да се променя по следните причини:

- компенсиране на ефекта от изгарянето на ядреното гориво. В хода на изгарянето размножаващите свойства на активната зона намаляват практически линейно и за поддържане на критичност съответната критична концентрация на бор $C_B^{крит.}$ трябва да се намалява по същия начин. Така за около 300 ефективни денонощия $C_B^{крит.}$ намалява от началната си максимална стойност до нула в края на кампанията.

- поддържане на реактивностния баланс при планови промени на мощността. При промяна на мощността на реактора размножаващите свойства на активната зона се променят за сметка на мощностния и, евентуално, на температурния ефект. Поддържането на критичност изисква съответна промяна на критичната концентрация на бор. Тъй като ефектите на реактивността са отрицателни, увеличаването на мощността изисква намаляване на критичната концентрация, а намаляването на мощността - увеличаването ѝ. Характерното време за изменение на C_B е часове, така че по този начин може да се компенсират бавнопротичащи изменения на k_{∞} .

- компенсиране на отравянето от ксенон при относително големи изменения на мощността на реактора. Поради спецификата на ксеноновите процеси това изисква изменение на C_B и в двете посоки - например при снижаване на мощността отравянето най-напред нараства поради превръщане на натрупания ^{135}I в ^{135}Xe , а след това намалява под началната си стойност до постигане на ново равновесие. Съответната критична концентрация на бор трябва да компенсира този ход на отравянето и едновременно освобождаване на реактивност поради мощностния ефект.

- поддържане на баланса на реактивността при пуск или спиране на реактора до горещо или студено състояние. В тези случаи C_B трябва да компенсира всички ефекти на реактивността, както и отравянето.

Когато характерното време за изменение на C_B е относително кратко - от порядъка на часове, е нужно да се знаят възможните закони за изменението ѝ.

Промяната на C_B се извършва чрез въвеждане в I контур на чист кондензат (при намаляване на C_B) или концентриран разтвор на H_3BO_3 (при увеличаване на C_B) с масова концентрация на бор C_+ g/kg, обеман разход Q_+ cm³/s и плътност γ_+ g/cm³. За запазване на материалния баланс едновременно с това от I контур се извежда топлоносител с обеман разход Q_- и плътност γ_- . Условието за запазване на обема на топлоносителя в активната зона е $Q_+ = Q_- = Q$.

Нека в момента t концентрацията на бор в I контур е $C(t)$. Масата на бора в I контур е $V\gamma C(t)$. V е обемът на I контур (без компенсатора на налягането), а γ е плътността на топлоносителя. След време dt масата на бора ще бъде:

$$V\gamma C(t + dt) = V\gamma C(t) - C(t)\gamma Q dt + C_+\gamma_+ Q dt$$

Следователно:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{Q}{V} \left(\frac{\gamma_+}{\gamma} C_+ - C(t) \right)$$

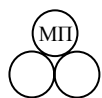
Решението на това уравнение е:

$$C(t) = \frac{\gamma_+}{\gamma} C_+ + \left(C(0) - \frac{\gamma_+}{\gamma} C_+ \right) \cdot \exp\left(-\frac{Q}{V} t\right)$$

$C(0)$ е концентрацията на бор в момента $t = 0$, когато започва изменението на $C(t)$. Възможни са три типа изменение на $C(t)$:

а) въвеждане на чист кондензат с $C_+ = 0$ при начална концентрация $C(0) = C_0$. Тогава:

$$C(t) = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{V} t\right)$$



Максималната скорост на водообмен Q зависи от технологичните възможности, а периодът на полуизвеждане на бор (времето, за което концентрацията му намалява наполовина), е $0.693 \frac{V}{Q}$

Например, ако за 1 час се обменя 10 % от топлоносителя в I контур, времето за намаляване на C_B два пъти е 6.93 h.

б) въвеждане на концентрат с $C_+ > 0$ при нулева начална концентрация на бор в топлоносителя: $C(0) = 0$. Тогава:

$$C(t) = \frac{\gamma_+}{\gamma} C_+ \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{Q}{V} t\right) \right)$$

След достатъчно дълго време C_B трябва да достигне стойност C_+ , а не $\frac{\gamma_+}{\gamma} C_+$, както се получава. Причината е, че приехме плътността на топлоносителя за постоянна и независеща от концентрацията на бор. За да се получи смислен резултат, трябва да приемем, че т.е. C_+ е такава, че $\gamma_+ \cong \gamma$, или че концентрацията на бор след водообмена не е достатъчно голяма, за да промени плътността на топлоносителя.

Времето за достигане на $0.5 C_+$ е равно на времето на полуизвеждане при случая а), а времето за достигане на 95 % от C_+ е $3 \frac{V}{Q}$. При обменяне на 10 % от топлоносителя за 1 час съответните времена са 6.93 h и 30 h.

в) въвеждане на концентрат с $C_+ > 0$ при начална концентрация на бор в топлоносителя: $C(0) = C_0$. Тогава:

$$C(t) = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{V} t\right) + \frac{\gamma_+}{\gamma} C_+ \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{Q}{V} t\right) \right)$$

И в този случай след достатъчно дълго време C_B ще достигне стойност C_+ . Нека $C_+ > 2C_0$. Времето за удвояване на началната концентрация ще бъде $\frac{V}{Q} \ln \left[\left(1 - \frac{\gamma_+ C_+}{\gamma C_0} \right) / \left(2 - \frac{\gamma_+ C_+}{\gamma C_0} \right) \right]$. При обмяна на 10 % от топлоносителя за 1 час и $C_+ = 3C_0$ това време ще бъде 6.93 h. При същите условия времето за достигане на $0.95 C_+$ ще бъде 26 h.

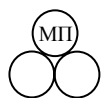
При дадени скорост на водообмен и ефективност на течния поглътител $\rho_B(C_B)$ може да се пресметне и законът за изменение на реактивността $\rho_B(t)$.

ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ (1)

- 1) Опишете функциите на средствата за управление и защита на ядрения реактор.
- 2) Опишете физичния принцип на действие на СУЗ.
- 3) Опишете устройството на механичната система за управление на ВВЕР-1000.
Опишете устройството на механичната система за управление на ВВЕР-440.
- 4) Дайте определение за ефективност на регулиращия прът.
- 5) Как зависи ефективността на един регулиращ прът от
 - температурата/плътността на топлоносителя?
 - концентрацията на борна киселина?
 - размера на реактора?
 - диаметъра на пръта?
 - разположението на пръта по радиуса на активната зона?
 - дълбочината на потапяне на пръта?
- 6) Обяснете физичния механизъм на интерференцията между механичната система и течностната система за управление на реактора. Какъв е знакът на интерференцията?
- 7) Обяснете физичния механизъм на интерференцията между регулиращите пръти. Какъв е знакът на тази интерференция.
- 8) По какви признаци се подбира взаимното разположение на регулиращите пръти в активната зона?
- 9) Как се подбира височината на работната група кластери?

ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ (2)

- 1) Получете израз за връзката между концентрацията на разтворим бор в топлоносителя и реактивността.
- 2) Каква е връзката между тегловната концентрация на бор и тегловната концентрация на борна киселина?



Запас от реактивност, ефективност на органите за регулиране

НФП-
440,1000

3) Дайте определение за ефективност и диференциална ефективност на разтворимия бор. Как зависят те от тегловната му концентрация.

4) Влияе ли "изгарянето" на ^{10}B върху ефективността на разтворимия бор?

5) Как влияе увеличаването/намаляването на концентрацията на бор върху темпераурните и мощностни ефекти и коефициенти на реактивността?

6) Как влияе увеличаването/намаляването на температурата на топлоносителя върху ефективността на разтворимия бор?

7) Как влияе натрупването на поглъщащи неутроните продукти на делене върху ефективността на разтворимия бор?

ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ (3)

1) Съставете уравнение за изменението на концентрацията на разтворим бор при водообмен с постоянна скорост.

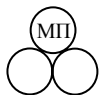
2) При водообмен с чист кондензат със скорост 10 % от обема на топлоносителя в активната зона в час, с колко процента ще намалее масовата концентрация на бор след 5 часа?

Задачи по запас и баланс на реактивността

Според Технологичните регламенти за безопасна експлоатация на енергоблокове 1-4 и 5-6, реакторната установка може да се намира в едно от следните състояния:

Блокове 1-4	Блокове 5,6
Състояние А - Работа на мощност: - Мощност $>1\% N_{\text{ном}}$ - Налягане I контур $125 \pm 2 \text{ kg/cm}^2$ - Температура на топлоносителя в I контур $\geq 255^\circ\text{C}$	Работа на мощност , $N > 2\% N_{\text{ном}}$ Работа на мощност с непълен брой работещи кръгове, мощността съответно е намалена
Състояние Б – Горещо състояние на РУ Състояние Б1: Реакторът е критичен, мощност $< 1\% N_{\text{ном}}$ Състояние Б2: Реакторът е подкритичен, подкритичност не по-малка 1% - Температура на топлоносителя в I контур $\geq 245^\circ\text{C}$ - Налягане I контур $125 \pm 2 \text{ kg/cm}^2$	МКН на мощност Минимална мощност на реактора, достатъчна за контрол на верижната реакция с помощта на щатната апаратура за контрол на неутронния поток
	Спиране на реактора Планово или аварийно привеждане на реактора в подкритично състояние

	“Горещо” състояние • Реакторът е подкритичен с подкритичност не по-малка от 1% • $T_{Iк} > 260^{\circ}\text{C}$ • Номинално налягане в $I_{к}$ • Нивата в ПГ са номинални • Налягането в ПГ е номинално
Състояние В – Полугорещо състояние • Реакторът е подкритичен, подкритичност не по-малка от 1% • $T_{\text{топлоносител}}: 245 > T_{\text{топл}} > T_{\text{хи}}$ за съответната кампания • Налягане $I_{к} > 15 \text{ kg/cm}^2$ над налягането на насищане при T на изход от а.з.	Полугорещо състояние • Реакторът е подкритичен, борната киселина осигурява подкритичност не по-малка от 2% • $70^{\circ}\text{C} < T_{\text{топлоносител}} I_{к} < 260^{\circ}\text{C}$
Състояние Г – студено състояние • Реакторът е подкритичен с подкритичност не по-малка от 2% за състояние на активната зона с максимален коефициент на размножение • $T_{\text{топлоносител}}: < T_{\text{хи}}$ за съответната кампания • Налягане $I_{к}$ е не повече от 35 kg/cm^2 и осигуряващо 20° до запас на кипене	Студено състояние • Реакторът е подкритичен, борната киселина осигурява подкритичност не по-малка от 2% • $T_{\text{топлоносител}} I_{к} < 70^{\circ}\text{C}$ • $I_{к}$ е уплътнен
	Ремонт без разуплътняване на РУ • РУ е в студено състояние • $I_{к}$ е уплътнен и не се планира разуплътняването му • Нивото в реактора е понижено за извършване на ремонтни работи, но не по ниско от 57.5 см по YC00L02 (т.е. нивото на оста на студените колектори на реактора)
	Ремонт с разуплътняване на РУ • РУ е в студено състояние • Атмосферно налягане в $I_{к}$ • Разуплътнени са главният разъм на някоя ГЦП или колектор на някой ПГ по $I_{к}$
Състояние Д – Презареждане на РУ • Разуплътнен реактор • $T \text{ в } I_{к} \leq 80^{\circ}\text{C}$ • $C_{\text{HЗВОЗ}} \geq 12 \text{ g/l}$	Спиране за презареждане на горивото • $C_{\text{HЗВОЗ}}$ е над стоянъчната за съответната кампания • Температурата на изхода на касетите е под 70°C • $I_{к}$ е разуплътнен, горният блок на реактора и блок защитни тръби са свалени • БОК са запълнени до кота 34.7 при стоянъчна концентрация на борната киселина
Състояние Е – Съхраняване на отработилото гориво в БОК, без гориво в АЗ	Реактор без гориво - съхраняване на отработилото гориво в БОК, без гориво в АЗ



В състояние критичен реактор сумата от положителните и отрицателните ефекти на реактивността е нула.

При останалите състояния, подкритичността на реактора трябва да бъде не по-малко от указаните стойности в регламента.

Практическите задачи, които е необходимо да се решават са:

- намиране на условията за критичност (концентрация на борна киселина, положение на рег. органи);
- осигуряване на подкритичност при спрял реактор. За решените задачи в настоящия раздел балансът по реактивност е направен изключително само за по-добро разбиране на процесите в реактора. Точните решения са представени в НФХ за съответната кампания.

В НФХ за всяка кампания се представят изчислените реактивност, критични концентрации, коефициенти на неравномерност и коефициенти на реактивност дори за състояния, в които не се допуска верижна реакция. Това се прави, за да се знаят граничните стойности на концентрациите и за оценка на подкритичността за тези състояния.

Към всяка конкретна задача може да се подходи по три начина:

а) оценка на критичността или подкритичността, като за изходно състояние се приеме най-близкото състояние на критичност преди разглежданата промяна на състоянието на реактора. Този начин е по-точен и тогава е необходимо да се отчетат само ефектите, проявяващи се след промяната на състоянието. Това е най-точният метод;

б) възможно е да се тръгне и от най-близкото изчислено състояние, като се отчетат ефектите от разликите в ефективните денонощия и мощността;

в) оценка на критичността или подкритичността, като за изходно състояние се приеме състоянието след презареждане. След това се отчитат всички възможни ефекти. Това е най-неточният метод.

За предложените задачи се препоръчва да се използват числени стойности от НФХ за някое от последните зареждания на конкретен блок. Ако няма на разположение НФХ може да се използват стойности от приложената таблица.

1. Подкритичен реактор:

Задача 1.1

Определете необходимата концентрация борна киселина за да се осигури подкритичност на реактор след презареждане съгласно ТР без да се отчитат ОР СУЗ.

Решение:

Подкритичността на реактора е сума от положителната запасна реактивност, определена в НФХ за съответната кампания и отрицателните реактивности на борната киселина при $C_B \geq$ стоянъчна концентрация и тежестта на групите:

$$\rho_{\text{подкр.}} = \rho_{\text{нзр}} + C_B \frac{d\rho}{dC_B} + \Delta\rho_{\text{СУЗ}}$$

без ОР СУЗ:

$$\rho_{\text{подкр.}} = \rho_{\text{нзр}} + C_B \frac{d\rho}{dC_B}$$

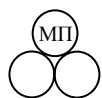
$$C_B = \frac{\rho_{\text{подкр.}} - \rho_{\text{нзр}}}{\frac{d\rho}{dC_B}}$$

Приблизителността на решението се определя главно от члена $C_B \frac{d\rho}{dC_B}$, тъй като се предполага коефициент по концентрация на борна киселина, който не зависи от концентрацията. $\frac{d\rho}{dC_B}$ е изчислен за дадена концентрация и при малки изменения ΔC_B около стойността, за която е изчислен, изменението на реактивността е $\Delta C_B \frac{d\rho}{dC_B}$.

Задача 1.2

Определете необходимата концентрация борна киселина за да се осигури подкритичност на реактор след спиране съгласно ТР без да се отчитат ОР СУЗ.

Подкритичността може да бъде изчислена от реактивността на състоянието преди спирането, като се отчетат всички бързопроявяващи се ефекти - мощностен, паров (само за ВВЕР-1000), температурен, отравяне и разотравяне от Хе. Поради преходните процеси от Хе необходимата концентрация борна киселина зависи от момента след спирането или от това за колко време е спирането:



$$\rho_{\text{подкр.}} = \rho_0 + \rho_{ME} + \rho_{\text{п}} + \rho_{TE} + \rho_{Xe} + \Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B}$$

ρ_0 е на реактора преди промяната на състоянието (при критичност $\rho_0 = 0$), $\rho_{\text{п}}$ е необходимата подкритичност, ΔC_B е търсената разлика в концентрацията на борна киселина, $\frac{d\rho}{dC_B}$ е коефициентът на реактивност по концентрация на борна киселина за съответната температура (горещо състояние, студено състояние).

При спиране от критично състояние (на нулева мощност, на мощност):

$$\Delta C_B = \frac{\rho_{\text{подкр.}} - \rho_N - \rho_{\text{п}} - \rho_T - \rho_{Xe}}{\frac{d\rho}{dC_B}}$$

За определяне на крайната концентрация е необходимо да се знае концентрацията преди спиране.

Забележка: В НФХ дадените коефициенти и ефекти, свързани с мощностния ефект на реактивност, отчитат освен промяната на температурата на урановия двуокис и промяната на средната температура на активната зона при промяна на мощността. Табулираният мощностен ефект е в същност комбинация от мощностен ефект и температурен ефект.

2. Режим "критичен реактор"

Задача 2.1.

Реакторът е критичен на нулева мощност. Определете концентрацията на борната киселина при достигане на номинална мощност.

Решение:

В началното и в крайното състояние сумата от ефектите на реактивност е нула. Промяна на реактивността има от температурен ефект (20-30 °C), мощностен ефект, промяна във височина на регулиращата група. Приемаме, че още не е започнало отравяне от Хе:

$$\rho_{TE} + \rho_{ME} + \Delta\rho_{рег.группа} + \Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B} = 0$$

$$\Delta C_B = \frac{-\rho_{TE} - \rho_{ME} - \Delta\rho_{рег.группа}}{\frac{\partial \rho}{\partial C_B}}$$

$$C_B = C_{Внач} + \Delta C_B$$

$\Delta\rho_{рег.группа}$ се определя от графиките в НФХ за съответната кампания и съответното ефективно денонощие или за време близо до реалното.

Задача 2.2.

Реакторът е критичен на мощност. Определете концентрацията на борната киселина при промяна на мощността.

При промяна на мощността, например намаление, се освобождава мощностен ефект и ефект от стационарното отравяне от Хе, като е възможна и промяна на височината на регулиращата група. (Сработване на системата за ускорено разтоварване на блока, УРБ, за 5 и 6 блок):

Решение:

$$\Delta\rho_{ME} + \Delta\rho_{Хе} + \Delta\rho_{рег.группа} + \Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B} = 0$$

$$\Delta C_B = \frac{-\Delta\rho_{ME} - \rho_{Хе} - \Delta\rho_{рег.группа}}{\frac{\partial \rho}{\partial C_B}}$$

$$C_B = C_{Внач} + \Delta C_B$$

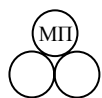
Задача 2.3.

Реакторът е критичен на мощност. Определете концентрацията на борната киселина след $N_{ЕД}$ ефективни денонощия при активна зона без изгарящ поглътител.

Решение:

След $N_{ЕД}$ ефективни денонощия запасната реактивност е намаляла с:

$$\Delta\rho_N = N_{ЕД} \frac{\partial \rho}{\partial (ЕД)}, \text{ където } \frac{\partial \rho}{\partial (ЕД)} \approx \frac{\rho_{НЗР}}{ЕД}, \text{ ЕД са проектните ефективни денонощия.}$$



$$\Delta \rho_N + \Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B} = 0$$

$$\Delta C_B = \frac{-N_{ED} \frac{\partial \rho}{\partial (ED)}}{\frac{\partial \rho}{\partial C_B}}$$

$$C_B = C_{Внач} + \Delta C_B$$

Задача 2.4.

Реакторът е спрял след работа на мощност. Определете критичната концентрация на борната киселина за достигане на критично състояние на нулева мощност в различни периоди след спирането.

Решение:

След спиране на реактора са освободени температурен и мощностен ефект, Хе и Sm отравяне са функция на времето. Новата концентрация борна киселина ще се отличава от старата концентрация като ще компенсира всички проявили се ефекти, включително промяната на височината на регулиращата група:

$$\rho_{ME} + \rho_{TE} + \rho_{Xe}(t) + \rho_{Sm}(t) + \Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B} = 0 \text{ за ВВЕР-440 и}$$

$$\rho_{ME} + \rho_n + \rho_{TE} + \rho_{Xe}(t) + \rho_{Sm}(t) + \Delta C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B} = 0 \text{ за ВВЕР-1000}$$

Тук $\rho_{Sm}(t)$ е отравянето от Sm (прометиева яма), което може да се пренебрегне в първо приближение; ρ_n е паров ефект при ВВЕР-1000.

$$\Delta C_B = \frac{-\rho_{ME} - \rho_{TE} - \rho_{Xe}(t) - \rho_{Sm}(t)}{\frac{\partial \rho}{\partial C_B}} \text{ за ВВЕР-440}$$

$$\text{и } \Delta C_B = \frac{-\rho_{ME} - \rho_n - \rho_{TE} - \rho_{Xe}(t) - \rho_{Sm}(t)}{\frac{\partial \rho}{\partial C_B}} \text{ за ВВЕР-1000}$$

Задача 2.5

В края на кампанията реакторът е на номинална мощност. Колко ефективни денонощия може да изработи реакторът, ако се намали мощността до $N_2 < N_{ном}$.

Решение:

$$\rho_{ME}(N_{nom} - N_2) + \rho_{Xe}(N_{nom} - N_2) + N_{ED} \frac{\partial \rho}{\partial (ED)} = 0$$

$$N_{ED} = - \frac{\rho_{ME}(N_{nom} - N_2) + \rho_{Xe}(N_{nom} - N_2)}{\frac{\partial \rho}{\partial (ED)}}$$

Задача 2.6

В края на кампанията реакторът е на номинална мощност. Определете максималната крайна мощност при работа на мощностен ефект, за да може реакторът да изработи N_{ED} ефективни денонощия.

Решение:

Уравнението е същото както в предната задача, като неизвестната величина е N_2 :

$$\rho_{ME}(N_{nom} - N_2) + \rho_{Xe}(N_{nom} - N_2) + N_{ED} \frac{\partial \rho}{\partial (ED)} = 0$$

Подбират се стойности на N_2 , които да удовлетворяват горното равенство.

Задача 2.7

В края на кампанията реакторът е на по-ниска мощност от номиналната и концентрацията на борна киселина достига 0. Преди колко ефективни денонощия е приключила борната кампания?

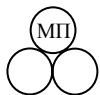
Решение:

Борната киселина е компенсирала освободения мощностен ефект от намаление на мощността от N_{nom} до мощността, при която борната киселина достига 0 g/kg. В момента на приключване на борната кампания освободеният мощностен ефект се компенсира от борната

киселина:
$$\rho_{ME}(N_{nom} - N_2) + \rho_{Xe}(N_{nom} - N_2) + C_B \frac{\partial \rho}{\partial C_B} = 0$$

След като концентрацията на борната киселина стане 0, освободеният мощностен ефект се компенсира от изработените ефективни денонощия:

$$\rho_{ME}(N_{nom} - N_2) + \rho_{Xe}(N_{nom} - N_2) + N_{ED} \frac{\partial \rho}{\partial (ED)} = 0$$



Запас от реактивност, ефективност на органите за регулиране

НФП-
440,1000

$$N_{ED} = - \frac{\rho_{ME}(N_{nom} - N_2) + \rho_{Xe}(N_{nom} - N_2)}{\frac{\partial \rho}{\partial (ED)}}$$