

23. Експериментално определяне на неутронно-физичните характеристики на реактора

Подреждането на касетите в активната зона се пресмята с помощта на програми. Пресмятат се такива основни характеристики и параметри на зоната като:

- продължителност на кампанията;
- коефициенти и ефекти на реактивност;
- коефициенти на неравномерност на енергоотделянето;
- диференциални и интегрални ефективности на ОР;
- очаквана концентрация на борната киселина при достигане на критичност - ("критична концентрация").

Независимо от изчисленията, след първоначално зареждане и при всяко презареждане се провеждат неутронно-физични изследвания. Целта на тези изследвания (експерименти) е:

- да се проверят изчислените стойности на ефекти и параметри. Ако разликите между стойностите на изчислените и измерените характеристики са в допустимите граници, то може да се пристъпи към достигане на критичност на реактора. При съществени разлики е необходимо да се изясни причината за несъответствието, тъй като операторите ще използват албумите с изчислени неутронно-физични характеристики;
- да се уточнят стойностите на изчислените параметри;
- да се провери правилността на зареждането на зоната;
- да се провери правилността на подключването на електромеханичните приводи.

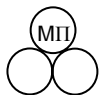
Крайната цел на физическите експерименти е да се изследва поведението на новата активна зона от гледна точка на нейната безопасна експлоатация.

Физическите експерименти биват:

а) Физически експерименти, провеждани при първоначалния физическия пуск на реактора. Те се провеждат при първото извеждане на ядрения реактор в критичност след неговото първо зареждане с ядрено гориво.

б) Пускови физически експерименти. Те се провеждат след всяко презареждане на ядрения реактор.

Реакторните изследвания на енергийни реактори са много малка част от възможните реакторни експерименти, например от разнообразните експерименти, които се провеждат на



изследователските реактори. Изследванията на енергийни реактори се провеждат само с експлоатационна цел при много внимателно планиране и съблюдаване на правилата за ядрена безопасност.

В основната си част изследванията се свеждат до измерване на величината реактивност в единици β_{eff} . Ефективната стойност на частта закъсняващи неутрони се пресмята в зависимост от ефективните денонощия, тъй като се изменя съставът на горивото и новите натрупани изотопи са различен дял на закъсняващите неутрони и освен това се изменя неутронният спектър. Натрупват се ^{239}Pu , ^{241}Pu , намалява ^{235}U и се увеличава деленето на ^{238}U с бързи неутрони. Натрупването на ^{239}Pu в горивото води до изменение на неутронния спектър в посока на обогатяване на спектъра с бързи неутрони и поради това се увеличава деленето на ^{238}U с бързи неутрони. Общата тенденция е намаление на β_{eff} с ефективните денонощия.

По време на неутронно-физичните експерименти се измерват коефициенти и ефекти на реактивността, а също така диференциални и интегрални характеристики на органите за управление, ефективност на аварийната защита, симетрия на зареждане на зоната.

Реактивността ρ е функция на всички параметри на зоната:

- температура на топлоносител и гориво,
- концентрация на борна киселина,
- положение на регулиращи органи,
- мощност,
- изгаряне,
- стационарно и нестационарно отравяне,
- налягане в I контур.

Коефициент на реактивност по даден параметър се определя като отношението от промяната на реактивността при промяна на параметъра с единица, като всички останали параметри се поддържат постоянни.

Коефициентът на реактивност по параметъра x е: $C_x = d\rho/dx$ при $y, z, \dots = \text{const}$.

Ефект на реактивност е промяната на реактивността при промяна на един от параметрите в по-голям интервал:

$$\int_a^b C_x dx$$

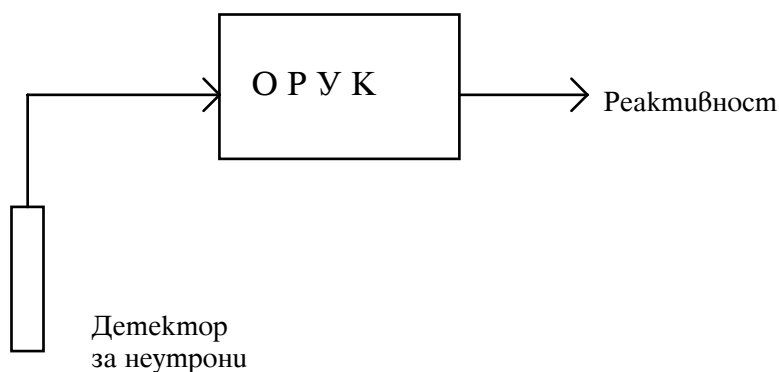
При провеждане на експерименти показанията на различни детектори се привързват по време и всъщност се измерва промяната на реактивността за единица време и промяната на интересувания ни параметър за единица време в един и същ момент (или временен интервал):

$$C_x = d\rho / dx = \frac{d\rho/dt}{dx/dt}$$

(параметър: температура, концентрация, мощност, налягане, положение на рег.орган).

Основен прибор за определяне на промените в реактивността е приборът за измерване на реактивност (ПИР). При входен сигнал от детектор на неутронния поток (аналогов от токова йонизационна камера или дискретен от импулсен датчик) приборът пресмята обратното решение на уравненията на кинетиката (ОРУК) и дава изходна величина реактивност. За много от случаите освен директно определяне на реактивността (on-line) е необходимо показанията на детекторите да се запишат и обработката да се извърши впоследствие (off-line).

блок схема:

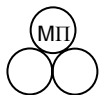


Ако детекторът на неутрони регистрира например ток I в поредица от момент $t_1, t_2, t_3, \dots, I(t')$, то реактивността ρ в единици β_{eff} се пресмята по формула (23.1):

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{eff}} = 1 - \frac{1}{I(t)} \sum_i \lambda_i \frac{\beta_i}{\beta_{eff}} \int_{-\infty}^t dt' \exp[-\lambda_i(t-t')] I(t') \quad 23.1$$

където величината λ_i е константата на разпад на i -тата група ядра предшественици на закъсняващи неутрони, β_i е съответната част закъсняващи неутрони.

За да се получи реалистична стойност на реактивността е необходимо да се измерва неутронният поток поне 2-3 минути, тъй като реактивността се пресмята чрез отчитане на приноса на закъсняващите неутрони. Колкото токът е регистриран в по-отдалечен момент, толкова е с по малка тежест поради фактора $\exp[-\lambda_i(t-t')]$.



Детекторите на неутронен поток измерват или ток, който се дигитализира, или импулси за единица време. Съществено е мястото на разположение на детектора да е такова, че да осигурява усредняване на неутронния поток от по-голяма част от зоната, за да се избегнат локални ефекти. Резултатите за реактивността са по-надеждни, ако се използват няколко детектора, разположени несиметрично около зоната.

Освен абсолютно измерване на реактивност чрез реактиметър (ПИР), често се използва методът на компенсацията - промяна на изследван параметър и компенсиране на възникналата реактивност чрез калибриран по ефективност орган за регулиране или чрез промяна на концентрацията на борна киселина (метод за компенсиране на бавни изменения на реактивността).

Основен проблем при обработката на експерименталните резултати и сравнението им с теоретични пресмятания са **критериите за успешност неутронно-физичните измервания**. Колко е допустимо да бъде разликата в определянето на началната критична концентрация, или допустимо да бъде разликата между изчислената и измерена ефективност на аварийната защита? При измерване на симетричността на зоната част от измерените разлики се дължат на грешката в определянето на височината на ОР, колко е допустимо да бъде останалата разлика?

Точната процедура по провеждането на неутронно-физичните измервания (“експерименти”) е дадена в съответните инструкции. Тук са описани принципите на провеждане на измерванията.

Една разширена номенклатура от физически измервания при $K_{\text{eff}} = 1$ е следната

1. Критична концентрация на борната киселина ОР на нулева мощност;
2. Ефективност на ОР;
3. Ефективност на борната киселина;
4. Температурен коефициент на реактивност на нулева мощност.
5. Симетрия на неутронния поток в диапазона 0-30 % от пълната мощност;
6. Разпределение на енергоотделянето на междинно ниво на мощността 40-75 %;
7. Разпределение на енергоотделянето на мощност, по голяма от 90 %;
9. Критична концентрация на борната киселина на мощност, по голяма от 90 %.
10. Барометричен коефициент на реактивност.

1. Експерименти в режим "критичен реактор"

Според Технологичния регламент, "критичен реактор" е реактор, при който верижната реакция се самоподдържа, $K_{\text{eff}} = 1$.

Често се използва и терминът "МКН" (минимално контролируемо ниво на мощността), което означава, че чрез неутронните детектори се осъществява надежден контрол на верижната реакция. Според регламентите на електропроизводство 1 и 2, ако има надежден контрол на неутронния поток или състояние МКН, това не означава непременно критичен реактор. Реакторът в състояние МКН може да бъде подкритичен или критичен.

При достигане на състояние критичен реактор се определя **критичната концентрация на борната киселина** и височината на регулиращата група.

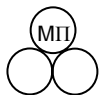
1.1. Измерване на температурния коефициент на реактивност (ТКР) и температурния ефект на реактивност

След всяко презареждане се създава зона с коефициент на размножение ≈ 1.2 в студено състояние. Тези 20 % надкритичност са за компенсиране на температурния и мощностен ефект, на стационарното отравяне и на изгарянето на горивото. Компенсирането на началната реактивност се постига с течен поглъtitел на неутрони (борна киселина) или с изгарящ поглъtitел.

Когато компенсирането се извършва само с борна киселина се налага увеличаване на концентрацията на борната киселина до стойност, надвишаването на която може да доведе до промяна на знака на ТКР. При увеличение на температурата намалява плътността на водата и оттам на количеството бор в активната зона. Ако ефектът от извеждане на бор от зоната превиши приноса на останалите ефекти, които водят до отрицателен ТКР, сумарният ТКР може да стане положителен.

Отрицателната обратна връзка по температура стабилизира реактора, затова е необходимо ТКР да е отрицателен. За да не се превиши концентрацията, над която ТКР става положителен, след презареждане съществуват възможности за започване на работа с 1 - 2 групи потопени изцяло в зоната (За ВВЕР-1000 напр. 10 и 9, регулиране с 8), при което концентрацията намалява с еквивалентна по реактивност величина, равна на ефективността на потопените групи. Голяма начална надкритичност може да се компенсира с борна киселина и с изгарящ поглъtitел без да се достига положителен ТКР.

ТКР е сума от температурните коефициенти на реактивност на горивото и на топлоносителя. В този експеримент се измерва сумата от двата коефициента.



Измерването на ТКР започва при състояние на реактора “критичен реактор” (КР) и мощност $\sim 1 \% N_{\text{ном}}$.

Експериментите се свеждат до разхлаждане на I контур с около 10-15 °C и последващо връщане в първоначалното състояние със стабилизирани параметри. Промените в реактивността се компенсират с преместване на управляващата група ОР СУЗ, чиято диференциална ефективност трябва да бъде предварително пресметната или измерена.

При експериментите всички останали параметри се поддържат постоянни и стойностите им се записват.

Не се допуска промяна на реактивността със скорост по голяма от $0.1 \beta_{\text{eff}}/\text{s}$ и период по малък от 90 s. Скоростта на изменение на температурата в I контур не трябва да надвишава 20 °C/час.

Определянето на $dp/dT(\text{H}_2\text{O})$ се извършва чрез определяне на промяната на реактивността чрез регулиращата група и съпоставяне на промяната на температурата от записи от датчиците на температура. Температурният ефект може да се определи само в температурния диапазон, в който се провежда експериментът.

1.2. Определяне на ефективността на аварийната защита на реактора (АЗ) и времето за спускане до долно крайно положение, определяне на ефективността на аварийната защита на реактора при условие на засяждане на максимално ефективния орган за регулиране

Според ТР органите за регулиране на системата за управление и защита (ОР СУЗ) трябва да осигуряват нормална работа на реактора, безопасността му в проектни режими на нарушаване на условията за нормална експлоатация и при аварии.

АЗ трябва да компенсира бързите промени на реактивността при аварийно намаляване на мощността на реактора от 100 % до 0:

- мощностен ефект, който се проявява в рамките на 1 - 5 s;
- температурен ефект от намаляване на температурата с 15-25 °C;
- паров ефект (за ВВЕР-1000, +0.2 %).

Бавнопроменливите ефекти са разотравяне от стационарното отравяне от ксенон след излизане от йодната яма (след около 28-30 часа при спиране от 100% $N_{\text{ном}}$), отравяне от разпадането на прометий-149, евентуално разхлаждане на I контур.

Същността на експеримента се състои в определянето на отрицателната реактивност, причинена от задействане на аварийната защита (чрез ключ АЗ или по друг начин) в

състояние на реактора "критичен реактор" и изчислена по промяната в неутронния поток чрез решаване на ОРУК.

Началното състояние на реактора е "КР", като промените в реактивността поради нестабилност на параметрите на I контур е по-малка от $0.1 \beta_{\text{eff}}/\text{час}$. Възможно е експериментът да се извърши при $\rho = 0$ или при известна надкритичност с период $> 60 \text{ s}$ поради предстоящото внасяне на много голяма отрицателна реактивност.

Тъй като реакторът е в състояние "КР" на мощност от порядъка на проценти от номиналната, не се наблюдава бързопроявяващ се мощностен ефект.

Очакваните ефекти са от порядъка 5 – 15 %, поради което е необходимо да се подбере подходящ диапазон на прибора.

При аварийно спускане на всички групи в зоната е възможно да се симулира и засядане на максимално ефективния кластер чрез предварителна подготовка на електрическата схема за експеримента.

Непотопянето в зоната само на един кластер може значително да намали ефективността на аварийната защита, тъй като останалите поглъщащи елементи изместват неутронния поток в области, където няма поглъщители. Ефективността на един поглъщащ елемент е $\propto \Phi^2$, поради което ефективността на един непотопен в зоната поглъщащ елемент значително се увеличава. Непотопения елемент намалява неутронния поток около потопените кластери и по този начин се намалява ефективността им.

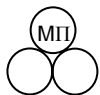
"Засядането" на максимално ефективен орана за регулиране може да намали ефективността на аварийната защита с около 1 %.

1.3. Определяне на коефициента на реактивност по концентрация на борна киселина

Същността на експеримента се състои в промяна на концентрацията на борна киселина и компенсиране на промяната на реактивността чрез регулиращите органи.

^{10}B в естествената изотопна смес е 18%. ^{10}B изгаря в процеса на работа на реактора и при рециклиране на борна киселина процентното съдържание на ^{10}B трябва да се контролира. Изгарянето частично се компенсира от дренирането и изтичането на толоносител и подхранването с борен разтвор.

Химичния анализ дава сведение за наличието на елемента бор, но не и за процентното съдържание на ^{10}B в изотопната смес, поради което освен химични анализи трябва да бъдат



извършвани и анализи чрез поглъщане или разсейване на неутрони с прибори, наречени борометри.

1.4. Измерване на симетричността на зоната и зацепване на приводите

При зони с шестоъгълни касети най-често зоната се състои от 60 градусови симетрични сектори. Асиметрия може да възникне при неправилно проектиране на зоната, неправилно зареждане, при несъответствие на означенията на касета.

Презареждането включва съвкупност от дейности и представлява многостепенен процес: схема за презареждане, изработване на програма за движение на ЯГ, входен контрол на ядреното гориво, комплектоване на свежо ядрено гориво за презареждането, конкретното извършване на презареждането. Независимо, че по време на всеки етап се правят многократни проверки, вероятността от грешка не може да бъде изключена напълно. Например при входящия контрол няма възможност да се провери обогатяването на ядреното гориво и се разчита на верността на информацията в паспорта на касетата и на знака за нейното обогатяване.

Тъй като сгрешено обогатяване или размножаващи свойства ще повлияе най-силно върху формата на неутронния поток, то се очаква измерването на симетрията да потвърди че няма грешка в проектното зареждане на активната зона или най-малкото че тази евентуална грешка не е съществена (сгрешените касети са с близки размножаващи свойства).

Експериментът се състои в преместване на орган на регулиране от горно крайно положение до определена височина и компенсиране на реактивността чрез органа за регулиране в центъра на зоната, който в изходно състояние е потопен почти изцяло в зоната. Това се повтаря за всички органи за регулиране от дадена група и за всички групи.

При сравнение на компенсиращите премествания могат да се открият асиметрии в ефективностите на ОР с очаквана една и съща ефективност, което може да се дължи на обкръжението. Най-точни резултати могат да бъдат получени с вътрешнозонни детектори.

Заедно с провеждането на измерването на симетрията се прави проверка на зацепването – наблюдава се промяна в реактивността при движение на ОР.

1.5. Измерване на диференциална и интегрална ефективност на органи за регулиране

Диференциалната ефективност на ОР или група ОР се нарича ефективността на ОР на единица дължина.

Диференциалната ефективност не е еднаква по височина на зоната, тъй като ефективността е пропорционална на квадрата на неутронния поток. В двата края на зоната ефективността на единица дължина е най-малка.

Интегрална ефективност е ефективността на ОР или група ОР при цялостно потапяне или изваждане от активната зона.

При критичен реактор на малка мощност няма обратни връзки по мощност, поради което е възможно абсолютното измерване на диференциалната ефективност по промяна на неутронния поток и решаване на ОРУК чрез ПИР.

Възможни са два начина на процедиране при измерване на диференциални и интегрални реактивности:

- чрез компенсиране на реактивността на ОР или група ОР с "еталонна" група, ефективността на която е известна или ще бъде измерена. При този начин при период на реактора $T = \text{безкрайност}$ изследваният ОР се премества и реактивността от смущението се компенсира с регулираща група.

Диференциалната реактивност се получава от:

$$d\rho/dx = \Delta\rho/\Delta x,$$

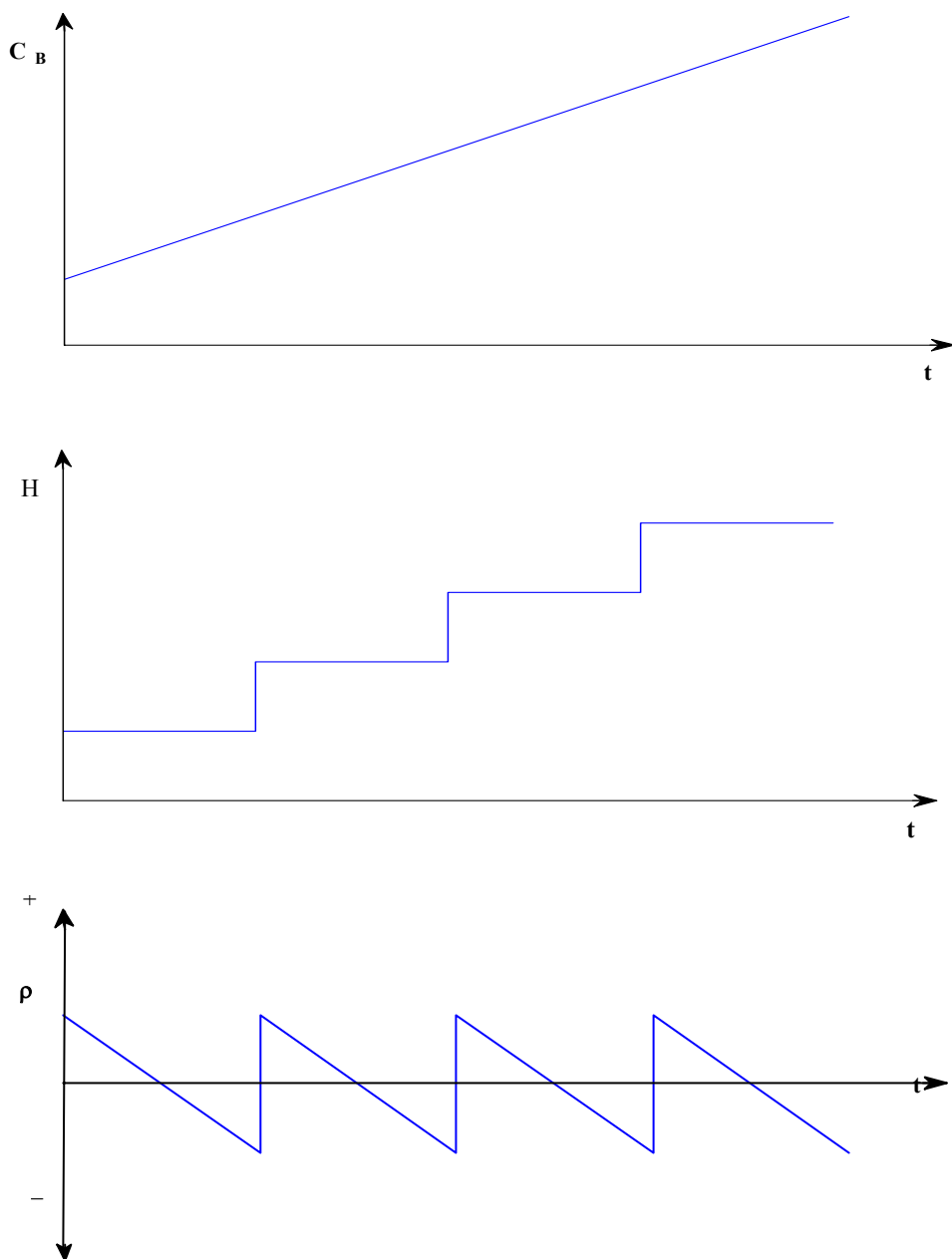
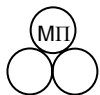
където $\Delta\rho$ е реактивността от преместването на еталонната група, Δx е преместването на изследвания ОР (група).

- изследваният ОР (група) компенсира бавни изменения на реактивността причинени от промяна на концентрацията на борна киселина.

При стабилизирани параметри в състояние КР на малка мощност и при непрекъснато подаване на борен разтвор в I контур (бавно "вкарване" на отрицателна реактивност) се премества ОР или група ОР с малка стъпка нагоре (положителна реактивност). По промяната на неутронния поток чрез ПИР се отчита положителната реактивност $\Delta\rho$ от преместването на ОР от позиция h до $h + \Delta h$. Изчаква се тази положителна реактивност да се компенсира от бавното увеличение на концентрацията на борната киселина или достигане на малка отрицателна реактивност и отново процедурата се повтаря - Фиг.23.1.

При този метод се постига абсолютно определяне на диференциалната реактивност $\Delta\rho(h)/\Delta h$.

Възможен е и обратният процес - вкарване на чист кондензат в I контур (бавно променлива положителна реактивност) и компенсация чрез движение на ОР на стъпки надолу.



Фигура 23.1. Измерване на диференциалната ефективност на ОР чрез въвеждане на бор в I контур и преместване на регулирания орган на малки стъпки нагоре.

Концентрацията се променя чрез вкарване на борен разтвор или чист кондензат. Едновременно с положението на ОР е необходимо да се извършва анализ на концентрацията на борната киселина с точно привързване по време.

Интегралната ефективност се пресмята като интеграл (сума) от експериментално измерените диференциални ефективности по височина на зоната.

Измерените диференциални и интегрални ефективности на МКН значително се различават от ефективностите при работа на мощност. При работа на мощност поради по ниската средна температура в долната част на зоната и отрицателния ТКР енергоотделянето и неутронния поток в долната част на зоната са по-големи. По-големият неутронен поток означава по-голяма ефективност на ОР в долната част на зоната.

Диференциалната ефективност зависи и от ксеноновите колебания поради промяната на неутронния поток по височина на зоната по време на тези колебания (за ВВЕР-1000).

Диференциалната ефективност зависи също от дълбочината на изгаряне, тъй като при работата на реактора се извършва преразпределение на енергоотделянето по зоната.

1.6. Измерване на барометричния коефициент на реактивност

Реактивността на активната зона се влияе от налягането на I контур.

Промяната на реактивността при единица промяна на налягането се нарича барометричен коефициент на реактивност.

Барометричният коефициент е свързан главно с промяната на плътността на водата при промяна на налягането. Поради малката свиваемост на водата ефектите от промяна на налягането са малки. Ако водата е без разтворен бор, барометричният коефициент на реактивност поради увеличението на плътността на водата, е положителна малка величина. При наличие на бор увеличението на плътността води до вкарване на бор и коефициентът става отрицателен.

Според ТР барометричният коефициент на реактивност трябва да е отрицателен.

Същността на експеримента се състои в това да се променя налягането в I контур при постоянни други параметри, като ефектите на реактивност се компенсират с регулиращата група.

Налягането в I контур се променя чрез регулиране налягането на компенсатора на обема (КО).

2. Експерименти при подкритичен реактор

При подкритичен реактор основните въпроси са свързани с достигане на критичност: измерване на реактивността (подкритичността), оценка на концентрацията, при която се очаква да се достигне критичност, очакван неутронен поток и период на реактора.

В подкритичен реактор с коефициент на размножение $0 < K_{\text{eff}} < 1$ скоростта на броене на неутронните детектори или токът на детекторите е величина пропорционална на $1/(1-K_{\text{eff}})$:

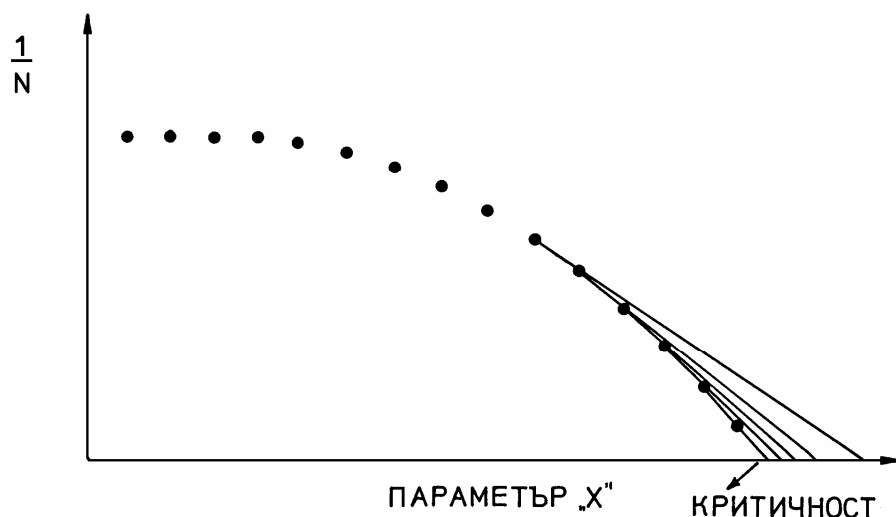
$$N \propto 1/(1 - K_{\text{eff}}), \text{ или когато } K_{\text{eff}} \approx 1, N \propto 1/\rho$$

Ако при изменение на зададен параметър (концентрация на борна киселина, положение на ОР, температура) се знае приблизително реактивността ρ_0 , то на тази реактивност може да се съпостави определена скорост на броене N_0 . За друга скорост на броене N_1 реактивността е:

$$\rho_1 = \rho_0 N_0 / N_1$$

При достигане на $K_{\text{eff}} = 1$ се определя стойността на критичната концентрация на борна киселина и се сравнява с пресметнатата концентрация. Начинът за достигане на $K_{\text{eff}} = 1$ при бавно “вкарване на положителна реактивност” чрез водообмен е да се подмине $K_{\text{eff}} = 1$, т.е. да се появи измерим период, след което с малко спущане на регулиращата група се фиксира точно $K_{\text{eff}} = 1$.

Първоначално в реакторната физика се е използвал методът на “обратно броене”. Смисълът на този метод е в построяване на експериментална зависимост от вида $1/N$ като функция на параметъра, по-който се достига критичност (изтегляне на ОР, намаляване на концентрация на борна киселина, добавяне на гориво, забавител). Екстраполираната стойност при която се стига до $1/N \rightarrow 0$ е тази, при която реакторът се очаква да достигне критичност - Фиг. 23.2.



Фигура 23.2. Екстраполирана стойност на параметър “X”, при която се очаква реакторът да достигне критичност.

ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ

1. При понижение на температурата от 278 до 270 °C регулиращата група се е преместила от положение 85 cm до 77 cm. В продължение на 30 мин има линеен участък по намаление на температурата с 5.5 °C, по време на което рег. група се е потопила с 5.6 cm.

Да се определи:

- знакът на ТКР;
- стойността на ТКР;
- температурният ефект в диапазона на изменение на температурата.

Решение:

- знакът на ТКР е отрицателен. При понижение на температурата се освобождава положителна реактивност, която се налага да се компенсира с потопяване на групата;

- от НФХ за $\Delta h = 5.6 \text{ cm}$ $\Delta \rho = -12.1 \times 10^{-3} \%$. $\text{TKP} = \Delta \rho / \Delta T = -12.1 \times 10^{-3} / 5.5 = -2.2 \times 10^{-3} \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$.

По технологичния регламент е необходимо ТКР да бъде под $-1 \times 10^{-3} \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Ако грешката при определянето на T е 0.5 °C, $\text{TKP} = -2.2 \pm 0.2 \times 10^{-3} \%$;

Температурен ефект (278-270 °C) = $\rho(\Delta h) = 17.6 \times 10^{-3} \%$.

2. При спускане на АЗ от бутон "АЗ" неутронния поток намалява 20 пъти. Оценете ефективността на аварийната защита в единици β_{eff} .

3. Защо при измерване на симетричността на активната зона реактивността от отделните регулиращи органи се компенсира с централни ОР?

4. При експериментите по определяне на симетричност на активната зона първоначално при състояние КР се потапя един ОР от горно крайно положение до определена величина. При това в реактора се внася отрицателна реактивност. Може ли да се очаква, че след прекратяване на спускането на ОР неутронния поток:

- а) ще се стабилизира;
- б) ще продължи да намалява;
- в) ще започне да се увеличава.