

## 20. Система за вътрешнореакторен контрол на реакторите ВВЕР. Възстановяване на полето на енергоотделянето при ВВЕР-440 и ВВЕР-1000. Датчици и измерителна апаратура

За всеки енергетичен реактор е необходимо да се знае разпределението на енергоотделянето по цялата активна зона. Познаването на разпределението на енергоотделянето позволява да се изчислят коефициентите на неравномерност по цялата зона и да се сравнят с максимално позволените стойности. Освен това за реактор ВВЕР-1000 е необходимо да се знае аксиалният офсет във всеки един момент от времето.

Идеалната система за ВРК включва хиляди детектори с пренебрежимо малък обем и чувствителни само към *неутронния поток*. Чувствителността само към неутрони е необходимо условие, тъй като енергоотделянето е право пропорционално на неутронния поток.

При работа на 100 % мощност неутроните, получени в резултат на самоподдържаща се верижна реакция, са около 10 порядъка ( $10^{10}$ ) повече, отколкото неутроните, получени от спонтанно делене на трансурани ( $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{242}\text{Cm}$ ), образувани в по-ранни периоди, т.е. сигналът от неутронния поток не зависи от предисторията.

Ако детекторите регистрират само гама-кванти, съществена част от сигнала ще се дължи на гама-кванти, излъчени от радиоактивни продукти на делене, образувани преди момента на меренето. Например, ако реакторът работи на 100 % мощност, около 7 % от сигнала ще се дължи на емисията от продукти на делене, образувани преди момента на мерене. Ако се намали мощността от 100 % на 50 %, веднага след намаляването на мощността около 14 % от сигнала ще се дължи на лъчение от “стари” радиоактивни продукти на делене, като тази част ще намалява във времето. Ако мощността се поддържа по сигнала от гама-лъчите, в същност ще се поддържа по-малка мощност от исканата и освен това при бързи промени сигналът няма да следва точно мощността.

Почти всички реални неутронни детектори регистрират основно неутрони и с много малка чувствителност гама-кванти. Детекторите, използвани за ВРК при ВВЕР-1000, са чувствителни само към неутрони.

За ВРК не се използват импулсни детектори, тъй като те имат ограничена максимална скорост на броене –  $10^3$ - $10^5$  импулса в секунда за различните детектори. Външнозонни импулсни детектори се използват в пусковия диапазон поради голямата си чувствителност.



## 1. Детектори за неутрони, използвани за ВРК и контрол на мощността при ядрени енергийни реактори

### 1.1. Активационни детектори

Детекторите на неутрони, които не изискват захранване, са активационните детектори. Това най-често са метални фолиа, жици или малки топчета, които периодично се вкарват в сухи канали на активната зона, престояват известно време, след което се измерва активността им. Активността се мери най-често с оловни колиматори, които ограничават измерването само на определен участък, или определено топче. Детектира се или общата активност, или излъчването на определени линии с полупроводникови детектори.

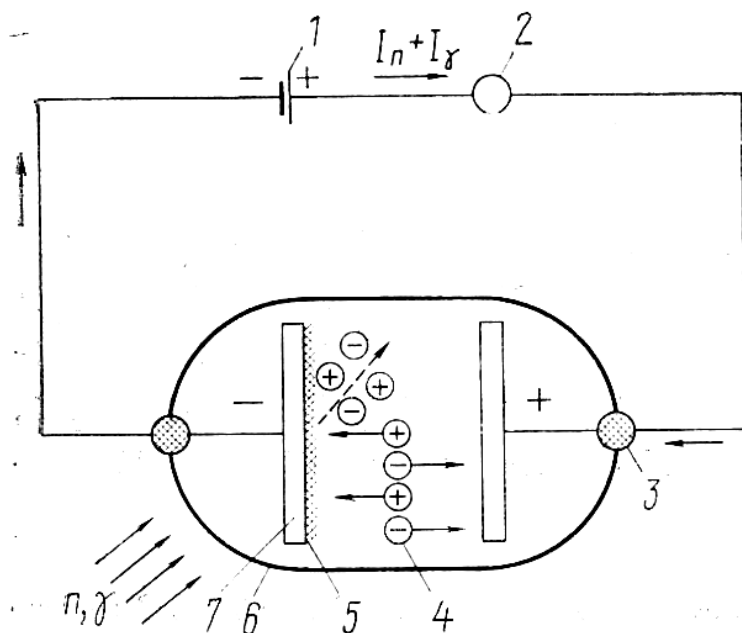
Използват се метални детектори от Mn, Co, Cu, Ag, V, In, Dy, Au.

Друг тип детектори, които не изискват захранване, са детекторите с малки количества делящ се изотоп като  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , поставени в капсула. След облъчване, капсулите съдържащи делящия се материал се спектрометрират по гама-лъчи и се измерва активността на продуктите на делене.

### 1.2. Йонизационна камера

Най-елементарният токов детектор за ядрени лъчения е йонизационната камера. Йонизационната камера представлява камера, напълнена с газ, и два електрода. На електродите се подава напрежение и се регистрира токът, създаден от заредени частици, преминали през газовия обем – Фиг. 20.1.

За да се регистрират електрически неутралните неутрони е необходим някакъв конвертор, при взаимодействието с който неутронът генерира заредена частица. Най-често се използва твърдо покритие върху електродите или стените на камерата от елемент или изотоп с голямо сечение за взаимодействие с неутрони. Използват се и детектори, газът на които се съдържа такъв елемент.



Фигура 20.1. Йонизационна камера за регистрация на неутрони. 1 – Източник на електрическо захранване, 2 – измерител на ток, 3 – изолатор, 4 – йони, 5 – слой от вещество, което поглъща неутрони и излъчва заредени частици, конвертор, 6 – корпус на камерата, 7 – електроди.

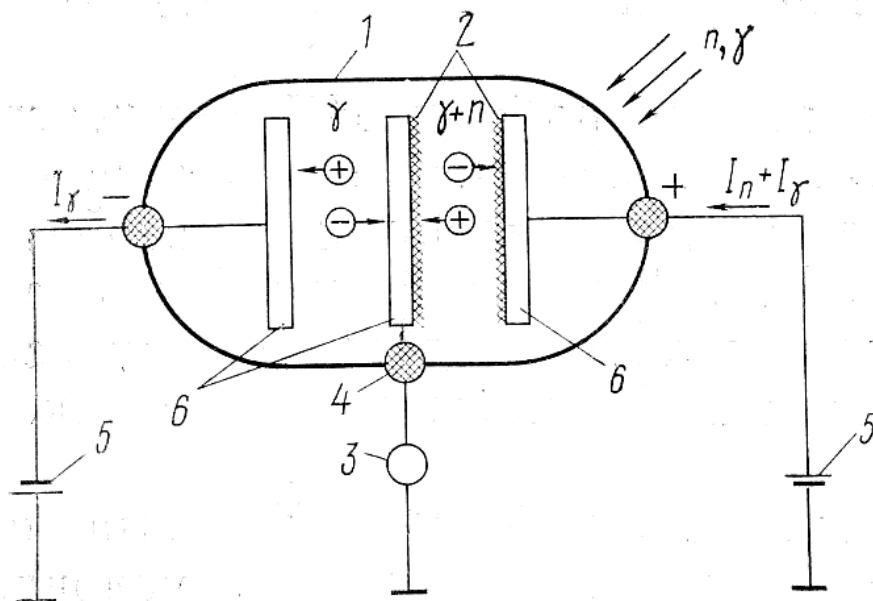
За топлинни неутрони се използват покрития най-често от  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ , В. При поглъщане на неутрон  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$  се делят, един от фрагментите на деленето излиза от слоя уран и предизвиква импулс. При покрития от бор се използва реакцията  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ . Литият и алфа-частицата се разлитат в противоположни посоки както фрагментите на делене и при излизане от твърдия слой една от частиците попада в чувствителния обем на детектора. За детектори без покрития се използва газ  $\text{BF}_3$ . В естествения бор изотопът  $^{10}\text{B}$  е 18%, но при детектори най-често се използва изотопно обогатен бор.

Детекторите могат да работят в токов режим и при по-високи напрежения в импулсен режим. В импулсен режим може допълнително с електронен праг да се дискриминират импулсите, предизвикани от взаимодействие на гама-кванти с електрон, който се регистрира в чувствителния обем, тъй като импулсите, предизвикани от гама-кванти, са с по-ниска амплитуда.

Описаните детектори са некомпенсирани по отношение на гама-фона. Единствено при импулсните детектори може да се постигне известна дискриминация.

### 1.3. Йонизационна камера за неутрони, компенсирана по гама-фон

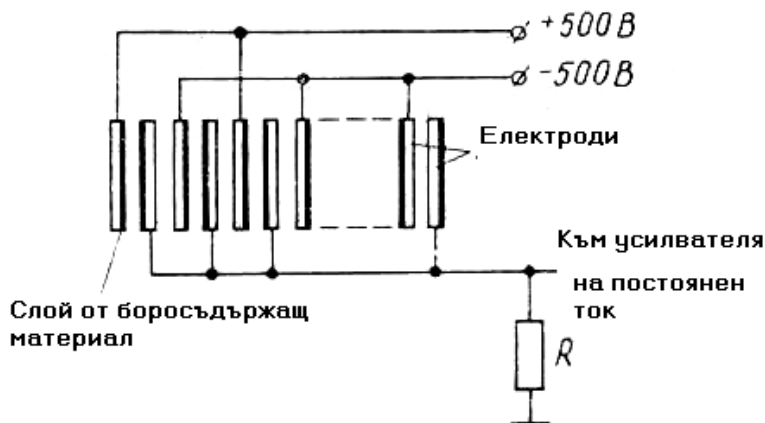
Извънзонните детектори за контрол на мощността най-често са компенсирани по гама-фон йонизационни камери. Елементарна схема на компенсирана по гама-фон йонизационна камера е показана на Фиг. 20.2. Йонизационната камера се състои от две отделения, едното е чувствителен към неутрони слой, другото отделение е без такъв слой и регистрира само гама-кванти. Първото отделение регистрира неутрони плюс гама-кванти, второто отделение регистрира само гама-кванти. Захранването е такова, че двата тока от двете отделения се вадят и остава само, токът причинен от регистрацията на неутрон.



Фигура 20.2. Компенсирана по гама-фон йонизационна камера. 1 – корпус, 2 – конверторен слой, 3 – измерител на ток, 4 изолатор, 5 – източник на електрическо захранване, 6 – електроди. В лявата половина на камерата се регистрират само гама-кванти. В дясната половина има конверторен слой 2 и поради това се регистрират гама-кванти и неутрони. Двата тока текат през измерителя на ток 3.

Компенсираните и некомпенсираните йонизационни камери могат да регистрират и бързи неутрони, ако се използва за конвертор слой от изотопи, които се делят от неутрони с енергия над определен праг, например  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , прагът на делене на които е около 1.1 MeV.

За извънзонни детектори се използват компенсирани неутронни камери, които се състоят от много двойки камери. На Фиг. 20.3 е показана такава камера.



Фигура 20.3. Компенсирана за гама-фон неутронна камери, която се състои от множество двойки камери.

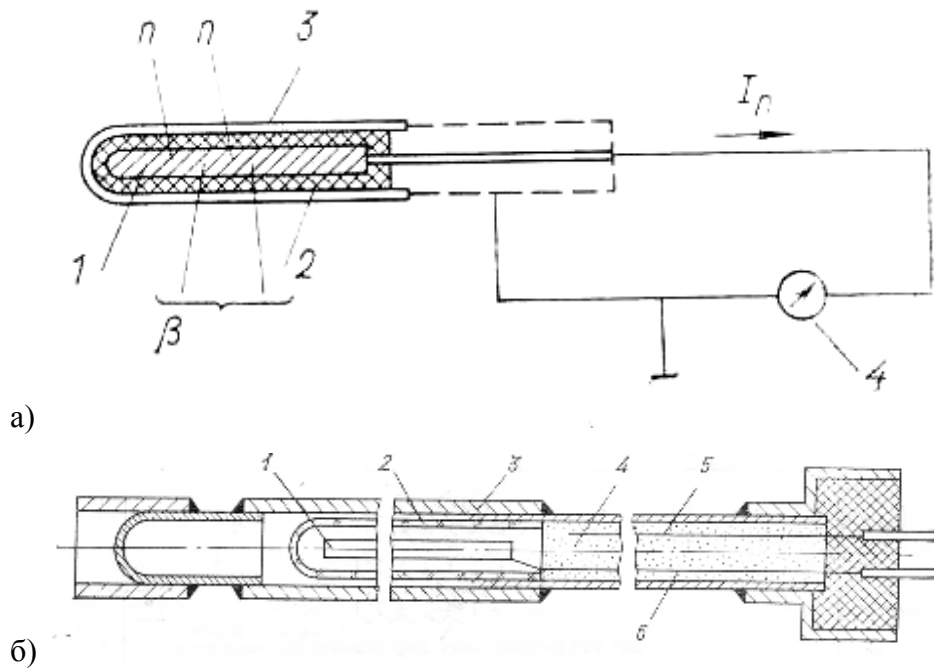
Основният недостатък на описаните детектори с неутронен конвертор е, че чувствителния елемент или изотоп с течение на времето “изгаря”. Чувствителният слой не може да се направи много дебел, за да има запас за изгаряне, тъй като фрагментите на делене, или алфа-частицата или литият при борните детектори, могат да излязат само от тънък слой. Освен това при детектори с чувствителен изотоп  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$  фрагментите на делене остават в камерата и се повишава собственият фон.

Друг недостатък е, че не може да се постигне повече от 1000 кратно потискане на фона от гама-кванти, поради което при нулеви нива на мощност (малко неутрони, много гама-кванти от фрагменти на делене) сигнала от такава камера е завишен и не отговаря на неутронния поток.

#### 1.4. Бета-емисионни детектори за неутрони (БЕДН)

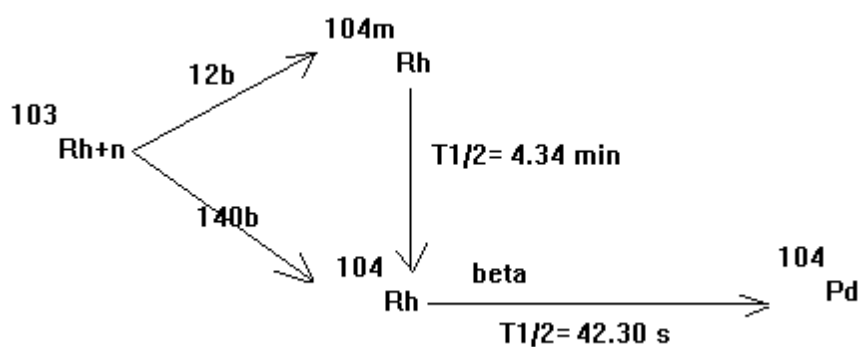
Схема на бета-емисионни детектори за неутрони, или както са известни “датчици с пряк заряд”, ДПЗ, е показана на Фиг. 20.4. Централният електрод съдържа такъв елемент или изотоп, който след поглъщане на неутрон е нестабилен по отношение на бета-разпадане и излъчва бета-частица. След преминаване през тънкия слой изолатор бета-частицата попада върху колектора. Токът от много бета-частици е пропорционален на неутронния поток. Освен сигналния проводник на емитера, има втори проводник, идентичен с този, свързващ емитера, който регистрира фоновия ток от гама-кванти.

За материал на централния електрод се използват елементите родий, сребро, кобалт, ванадий. Външния диаметър на стоманения колектор е 1.8-3 mm.



Фигура 20.4. Схема на бета-емисионни детектори за неутрони или “датчици с пряк заряд”, ДПЗ, горе – принципна схема, долу – схема на реален детектор. Неутрони се поглъщат от централния електрод 1, излъчват се в последствие бета-частици, които преминават през изолатора 2 и се събират от колектора 3 (горе), който е токов измерител. В реалните детектори се използва и кабел за фонов сигнал 5 (долу). Долу: 4 – кабел за централния електрод, 6 – кабел за колектора.

На реакторите тип ВВЕР се използват най-често родиеви “ДПЗ”. Схемата на разпадане на  $^{104}\text{Rh}$ , получен при залавянето от моноизоотопа  $^{103}\text{Rh}$ , е показана на Фиг. 20.5.



Фигура 20.5.  $^{104}\text{Rh}$  се разпада до  $^{104}\text{Pd}$  чрез бета-разпад с висока максимална енергия на бета-частицата, около 2.5 MeV. При поглъщане на неутрон с около 12 пъти по-малка вероятност се получава изомера  $^{104\text{m}}\text{Rh}$ , който се разпада до  $^{104}\text{Rh}$  основно чрез излъчване на конверсионни електрони с много ниски енергии: 28 keV, 54 keV, 74 keV. Поради малката вероятност за преминаване на конверсионните електрони през изолационния слой,

детекторът регистрира предимно бързата компонента с характерно време на задържане  $\tau = 42.3 \text{ s}/0.693 = 61 \text{ s}$ .

В таблица 20.1. са показани характеристиките на материалите използвани за емитери на ДПЗ.

Таблица 20.1. Характеристики на материалите, използвани за емитери на ДПЗ

Нуклид, разпространеност, (%)	$\sigma_{th}$ , b	Характеристики на получения нуклид				Гама-кванти, получени при радиационното залавяне	
		$T_{1/2}$ , s	$E_{\beta}$ , MeV	$E_{\alpha}$ , MeV	$E_{\gamma}$ , MeV	Брой гама-кванти	Средна енергия MeV
$^{103}\text{Rh}(100)$	140 12	42.3 260.4	2.448, 99.5 % 1.892, 1.89% 2.57, 0.13%	0.028, 41% 0.054, 39% 0.074, 42% 0.077, 11%	0.556, 2% 0.556, 0.13% 0.051, 48%	2.97	1.72
$^{50}\text{V}(0.24)$ $^{51}\text{V}(99.76)$	250 4.5	стабилен 225	2.542, 100%	- -	- 1.434 100%	3.3	2.68
$^{59}\text{Co}(100)$	16.9 20.2	624 $1.67 \times 10^8$ (5.27 г)	1.550, 0.24% 0.317, 99.93	-	1.332, 0.24% 1.332, 99.99% 1.173, 99.97%	2.06	3.3
$^{107}\text{Ag}(51.35)$  $^{109}\text{Ag}(48.65)$	31  887 33.2	138  24.2  $2.158 \times 10^7$ (249.8 дни)	1.65, 100%  2.235, 4.4% 2.892, 99% -	0.04-0.07, 10.7% (418 г)  -  91, 0.8%	0.433, 0.5% 0.511, 0.57% 0.619, 0.26 0.633, 1.76% 0.658, 94%	3.35 (108+ 110)	2.19

Продуктът, който се получава при кобалтовия детектор, е  $^{60}\text{Co}$  с период на полуразпадане 5.3 г., поради което този детектор с корекция за разпадане в същност се използва за измерване на интегралните ефективни денонощия в съответната част на активната зона.

Недостатък на бета-емисионните детектори е изгарянето на емитера. Родиевите детектори издържат до интегрален поток от топлинни неутрони от  $\sim 10^{22}$  неутрона/ $\text{cm}^2$ . При поток от около  $10^{14}$  n/s/ $\text{cm}^2$  това означава 3 г. експлоатация. Освен това сеченията на  $^{103}\text{Rh}$  силно се променят в топлинната и надтоплинната област, което налага корекции за ефективната неутронна температура.

Друг недостатък на бета-емисионните детектори е инерционността им, както в случая с  $^{103}\text{Rh}$ .



В момента на поглъщане на топлинния неутрон от емитера се излъчват мигновени гама-кванти (последните две колони на Таблица 20.1). Тези гама-кванти с известна вероятност избиват Комптън електрони от изолатора. Тъй като Комптън електроните се излъчват в телесен ъгъл около направлението на първичния кама-квант, регистрира се ток от т.н. мигновена компонента. Тази мигновена компонента следва без закъснение неутронния поток и се използва за анализ на флукуациите на неутронния поток, породени от вибрации на ВКУ и касети. В този случай детекторите с пряк заряд работят като комптън-емисионни детектори на неутрони (КЕДН). Описаните в Таблица 20.1 материали за емитери се използват за направата на детектори, които работят едновременно като бета-емисионни детектори на неутрони и като комптън-емисионни детектори на неутрони (БЕДН+КЕДН). Има детектори с емитери, които при залавяне на неутрон образуват стабилен изотоп и се използват само мигновените гама-кванти, образувани при залавянето му, т.е. тези детектори работят само като КЕДН.

## 2. Измерване на енергоразпределението в активната зона на реактор ВВЕР-440

Първоначално в системата за възстановяване на енергоразпределението в активната зона на реактор ВВЕР-440 в Козлодуй са се използвали бета-емисионни детектори и метална жица с диаметър 1 mm, която престоюва известно време в един от дванадесетте измерителни сухи канал в центъра на касетата и след това се спектрометрира с помощта на колиматор и полупроводников детектор.

Материалът на жичката съдържа около 0.5 % примеси Mn и не повече от 0.25 % примеси Cr и някои други примеси. Основният активиран изотоп  $^{55}\text{Mn}$  има сечение на активация на топлинни неутрони  $\sigma_a^{Mn} = 13.3 \pm 0.2$  барна, подчиняващо се на закона  $1/v$ . Периодът на полуразпадане на измерваният изотоп  $^{56}\text{Mn}$  е 2.58 часа, а на изотопа на  $^{55}\text{Cr}$  е 3.57 мин. Активационните детектори се вкарват в активната зона с определена скорост (30 см/сек), там се облъчват за 6 минути, изваждат се със същата скорост и се навиват на барабан в детектиращите устройства. След отстояване (12 мин.) се измерва получената активност, обусловена от  $^{56}\text{Mn}$  в проводника, която е пропорционална на разпределението на топлинния поток по височината на активната зона. Грешката при относителните измервания е  $e < 5\%$

Измерителната апаратура на системата позволява да се измерят и изчислят:



- стойността на плътността на потока топлинни неутрони в 32-те точки по височина на активната зона за всеки измерителен канал, т.е. да се определи разпределението на плътността на потока топлинни неутрони по височина на канала.
- максималната и средната стойност на плътността на потока топлинни неутрони във всеки един от 12-те измерителни канали;
- интегралната стойност на плътността на потока топлинни неутрони за всеки измерителен канал;
- коефициентът на неравномерност на разпределението във всеки канал.

За непрекъснат контрол на локалната стойност на неутронния поток във всеки измерителен канал са се използвали ДПЗ . В измерителните канал са поставени по четири родиеви ДПЗ с дължина по 250 мм и един ванадиев бета-емисионен детектор с дължина 2500 мм. Родиевите детектори са предназначени за измерване на разпределението на плътността на неутронния поток по височина на канала, а ванадиевите – за измерване на пълната неутронна мощност в канала.

Сега тази система, наречена “Волна”, не се използва.

Подобни системи съществуват при други реактори. Например в Германия при 1300 MW реактори се използват малки стоманени топчета, съдържащи манган или ванадий (Ø 1.6 mm), които по пневматичен път се вкарват в 30 сухи канали.

Понастоящем възстановяването на енергоотделянето *само по височина* се извършва с външнозонни детектори и предположения за общата зависимост на разпределението на енергоотделянето. Системата “Инев” се състои от 6 детектора, 3 детектора на 120° по средата на горната половина на зоната, 3 детектора на 120° по средата на долната половина на зоната.

Най-общо, за възстановяването на енергоразпределението по височина на активната зона се използва разлагане в ред по ортогонални базисни функции:

$$F_N(z) = \sum_{i=1}^3 A_i \cdot Y_i(z) \quad 20.1$$

където:

$A_i$  - амплитуди на базисните функции;

$$Y_1(z) = a_{11} \cdot \sin(u) + a_{13} \cdot \sin(3u) + a_{15} \cdot \sin(5u) \quad 20.2$$

$$Y_2(z) = a_{22} \cdot \sin(2u)$$

$$Y_3(z) = a_{31} \cdot \sin(u) + a_{33} \cdot \sin(3u);$$

$$u = \frac{\pi \cdot z}{H + 2\Delta}; H - \text{височина на активната зона}; \Delta - \text{екстраполирана добавка (= 15 см);}$$



Константите  $a_{11}$ ,  $a_{13}$ ,  $a_{15}$ ,  $a_{22}$  и  $a_{31}$  са определени при голям брой калибрационни експерименти. Стойностите на амплитудите  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  пред базисните функции се определят по тока от неутронните детектори.

При тази система не може точно да се контролира радиалното разпределение на енергоотделянето. Съвременните реактори не могат да осигурят достатъчен контрол за състоянието на горивото без системи за вътрешнореакторен контрол, изградени най-малко от БЕДН и в някои случаи КЕДН

### **3. Измерване на енергоразпределението в активната зона на реактор ВВЕР-1000.**

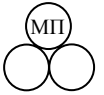
Енергоразпределението в активната зона на ВВЕР-1000 се следи от 64 комплекта за контрол на неутронния поток – КНИ, поставени в 64 сухи канала. Всеки комплект КНИ се състои от 7 бета-емисионни детектора (ДПЗ) един над друг. Токът за всеки един от детекторите в един комплект се коригира чрез изваждане на фоновия ток. Така се постига контрол в 448 точки.

**Възстановяването на енергоотделянето се постига чрез решаване на дифузионното уравнение и нормиране на неутронния поток в елементарни обеми чрез измерените стойности.**

Поради наличието на мигновена компонента е възможно да се следи за бързите флукутации на неутронния поток и за вибрациите на касетите. Постигнато е определянето на скорост на движение на топлоносителя във вертикална посока по скоростта на преместване нагоре на нееднородности в топлоносителя, които се отразяват на регистрирания неутронен поток.

### **ВЪПРОСИ И ЗАДАЧИ:**

1. Какви детектори за неутрони се използват за ВРК и контрол на мощността при ядрени енергийни реактори?
2. Какъв е принципът на действие на йонизационната камера?
3. Какъв е принципът на действие на компенсирана по гама-фон йонизационната камера?
4. Какъв е основният недостатък на детекторите с неутронен конвертор?
5. Какъв е принципът на действие на бета-емисионни детектори за неутрони (БЕДН, ДПЗ)?



6. Каква система се използва за възстановяване на на енергоразпределението в активната зона на реактор ВВЕР-440?

7. Каква система се използва за възстановяване на на енергоразпределението в активната зона на реактор ВВЕР-1000?