

The background image shows three massive, hyperboloid cooling towers of a nuclear power plant. They are constructed from a grid of metal panels. The scene is set at sunset or sunrise, with a sky filled with dramatic, orange and grey clouds. A beam of light breaks through the clouds, shining down on the towers. In the foreground, there is a dark, flat field. To the left, a smaller building with a red upper section is visible. The overall mood is industrial and atmospheric.

Dozimetrie a dozimetrické přístroje

Plzeň, 2015

M. Adámek

Výběr veličin a jejich jednotek

□ Dávka

- Je definována jako poměr střední energie dE , která byla předána ionizující látce o hmotnosti dm , a to dle vztahu:
 - $D = dE/dm$
- Zjednodušeně lze říci, že dávka, která byla absorbovaná, je energie absorbovaná v jednotce hmotnosti látky, která byla ozářená, v určitém místě. Jednotkou je gray (1 Gy) s rozměrem [J/kg]. Dávka zohledňuje pouze fyzikální účinky, nikoli účinky biologické.
- *Přirovnání: absorbovaná dávka 10 Gy způsobí akutní nemoc z ozáření. Pro muže o hmotnosti 80 kg to představuje energii 800 J. Sklenice vody o objemu 3 dcl se touto energií ohřeje o 0,6 stupně C.).*

Výběr veličin a jejich jednotek

□ **Dávkový příkon**

- Je definován jako přírůstek dávky za jednotku času. Udává se v Gy za sekundu [Gy/s]. V praxi je však více používáno jednotky nižší – $\mu\text{Gy/h}$.

Výběr veličin a jejich jednotek

□ Dávkový ekvivalent

- Stanovuje se ze vztahu: $H = D \cdot Q \cdot N$
- kde **D** je absorbovaná dávka v **Gy**,
- **Q** tzv. jakostní faktor (v podstatě to samé jako konverzní faktor příjmu)
- **N** součin ostatních modifikujících faktorů. *N* se v současné době doporučuje pokládat $N=1$. Jednotkou ekvivalentní dávky je sievert (Sv). V praxi je spíše využíváno jednotek podstatně menších mSv či μSv .

Výběr veličin a jejich jednotek

- ▣ Dávkový ekvivalent je biofyzikální veličinou, která vedle fyzikálních účinků zohledňuje i biologický účinek záření. Vyjadřuje podíl množství absorbované energie v jednotce hmotnosti určité látky, a to v závislosti na daném druhu ionizujícího záření.

Výběr veličin a jejich jednotek

□ Příkon dávkového ekvivalentu (PDE)

- Definuje se jako dH/dt . Čili změna dávkového ekvivalentu za jednotku času. Jednotkou je Sv/h.
- *Přirovnání: hrubým odhadem lze říci, že materiál s aktivitou 300 Bq nás ozáří dávkovým ekvivalentem 10 μ Sv (záleží však na druhu záření).*

Výběr veličin a jejich jednotek

□ Efektivní dávka

- Je dána součtem vážených středních hodnot ekvivalentních dávek v různých tkáních lidského těla. Značí se písmenem E . Jednotkou je sievert (Sv).

Výběr veličin a jejich jednotek

□ Aktivita

- Množství radioaktivní látky je charakterizováno aktivitou. Aktivita je dána počtem radioaktivních přeměn v látce vztažený na jednotku času. Jednotkou aktivity je 1 Bq (jeden Becquerel) s rozměrem $[s^{-1}]$. Označuje se A.

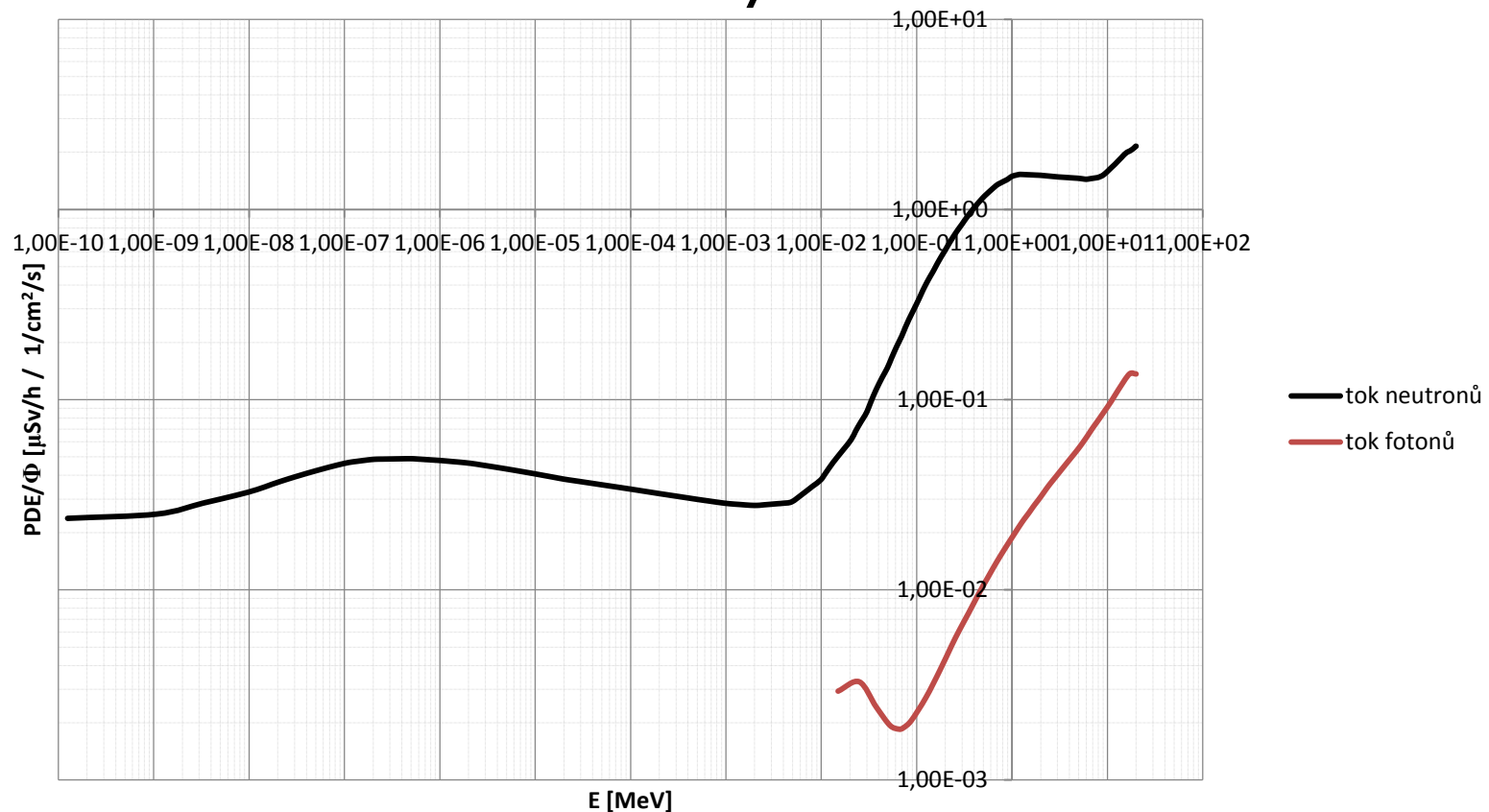
Výběr veličin a jejich jednotek

□ Konverzní faktor příjmu

- Koeficient udávající efektivní dávku připadající na jednotkový příjem. Udávány jsou konvenční hodnoty faktorů příjmu požitím a vdechnutím.
- Převádí příjem daného radionuklidu vyjádřený v aktivitě [Bq] na hodnotu v Sv. Označuje se písmenem h [Sv/Bq].

Výběr veličin a jejich jednotek

- Konverzní faktor přepočtu neutronového toku na velikost obdržené dávky



Výběr veličin a jejich jednotek

- Obrázek zobrazuje konverzní faktory přepočtu neutronového a fotonového toku na velikost obdržené dávky, kde PDE představuje příkon dávkového ekvivalentu, Φ hustotu toku částic a E energii částic.
- Jak lze z obrázku vidět, při energii 100 keV hodnota obdržené dávky od toku neutronů značně přesahuje hodnotu obdržené dávky od toku fotonů – **expozice lidského organismu neutrony je nebezpečnější.**

Biologické účinky radiace a ochrana proti nim

- Radiace emitovaná radioaktivním materiálem či produkovaná radiačním zařízením v případě styku s lidským tělem škodlivě působí na živé tělesné tkáně
- Účinky radiace jsou různorodé, mohou být dočasné, ale i velmi závažné
- Jedná se například o:
 - zkrácení délky života, snížení tělesné obranyschopnosti proti nemocem, výskyt šedého zákalu, leukémie či různých typů rakovin a poškození vyvíjejícího se plodu

Biologické účinky radiace a ochrana proti nim

- Rozsah poškození závisí na výši obdržené dávky
- Následky jsou dosti individuální
- Lokální ozáření vs. ozáření celého organismu
- Vnitřní ozáření
 - Alfa, beta částice velmi nebezpečné – jejich energie se transformuje do citlivých tkání
- Vnější ozáření
 - Limitováno dobou expozice, vzdáleností od zdroje radiace a konečně stíněním

Biologické účinky radiace a ochrana proti nim

- X-paprsky a gama záření o vysoké permeabilitě a pronikavosti mohou nebezpečně, až smrtelně působit na celé tělo, a to jak zvenku, tak zevnitř
- Z těchto důvodů je důležité okolí zářičů a radioaktivních materiálů náležitě chránit, a to pomocí účinných radioaktivních chráničů a stínění

Biologické účinky radiace a ochrana proti nim

- Orgány a tkáně můžeme dělit podle relativní citlivosti na ionizující záření na:
 - ▣ velmi citlivé (gonády, mléčné žlázy, kostní dřeň)
 - ▣ citlivé (plíce a kůže)
 - ▣ středně citlivé (štítná žláza, oko)
 - ▣ málo citlivé (mozek, nervový systém, končetiny)

Biologické účinky radiace a ochrana proti nim

- **Okamžité účinky** podle ekvivalentní dávky jsou nejlépe prostudovány, vzhledem k individuální citlivosti na ionizující záření musíme však níže uvedené ekvivalentní dávky brát jako orientační.
 - nad 250 mSv – zjistí se změny krevního obrazu při laboratorním vyšetření
 - nad 1 Sv – lehká nemoc z ozáření (únava, nespavost, zažívací problémy)
 - od 2 až 3 Sv – střední nemoc z ozáření (poškození kůže, oční čočky apod.)
 - od 4 až 5 Sv – těžká nemoc z ozáření (úporné bolesti, odpor k jídlu)

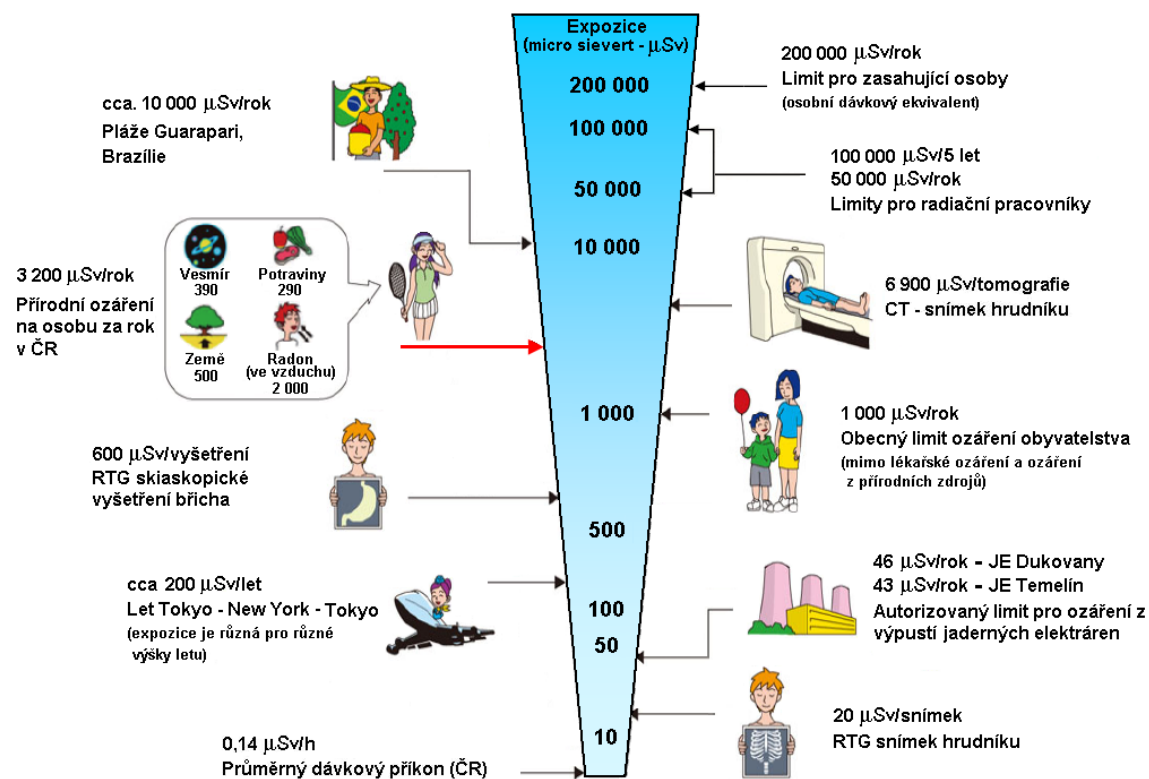
Biologické účinky radiace a ochrana proti nim

□ **Pozdní účinky**

- Mohou se projevovat po letech ve formě např. nádorových onemocnění a leukémie. Statisticky byly tyto účinky prokázány např. u horníků v uranových dolech a u kterých se v pozdějším věku projevilo ve zvýšené míře onemocnění leukémií.

Příklady některých expozic ionizujícímu záření včetně limitů platných v ČR

Jednotky : μSv



Měřicí přístroje

- Detektory neutronového toku:
 - Neutrony nelze detekovat přímo (nulový elektrický náboj – neionizují prostředí)
 - Nutno využít některých jiných reakcí
 - (n, α) reakce na boru
 - (n, f) reakce na ^{235}U nebo ^{239}Pu
 - (n, γ) reakce na Rh, Ag, V a dalších prvků vedoucí k tvorbě umělých radioisotopů

Měřicí přístroje

□ **(n, α) reakce na boru**

- ▣ Vznik nabitých částic α , které ionizují plynovou náplň detektoru

□ **(n,f) reakce na ^{235}U nebo ^{239}Pu**

- ▣ Vznik štěpných produktů vlivem štěpení – vysoké energie
(lze jednoduše rozpoznat od ostatních druhů záření)

□ **(n, γ) reakce na Rh, Ag, V**

- ▣ Nabité částice β vznikají až cestou radiačního zachytu
- ▣ Okamžitě vzniká γ
- ▣ Nutné použít izotopy s krátkým poločasem rozpadu

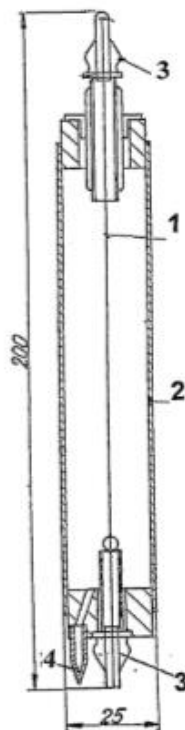
Měřicí přístroje

- Z hlediska činnosti vnějšího vyhodnocovacího obvodu lze detektory rozdělit:
 - ▣ Přístroje **pulzní**, kde jednotlivé detekované neutrony se registrují individuálně a četnost těchto pulsů udává velikost neutronového toku
 - ▣ Přístroje **proudové**, kde se vyhodnocuje výsledný ionizační proud, který je úměrný neutronovému toku

Měřicí přístroje

- ❑ Čidla (detektory) neutronového toku se provádí ve tvaru válcovité komory, jejíž plášť obvykle tvoří jednu elektrodu a v její ose je koaxiálně a izolovaně umístěna druhá válcová elektroda menšího průměru (eventuelně přímo drát)
- ❑ Tento celek je umístěn do hermetického pouzdra, které zajišťuje stálost plynové náplně
- ❑ Elektrody jsou kovové, vodivé (nerezavějící ocel)

Měřicí přístroje



Obr. 18 Konstrukce proporcionálního počítače s náplní BF_3

- 1- kladná elektroda (kolektor)
- 2- záporná elektroda (plášť)
- 3- izolátory počítače
- 4- plnicí otvor počítače

Měřicí přístroje

- Pro plynovou náplň se užívají různé plyny, jako vodík, helium, dusík, argon, kysličník uhličitý i jiné, nebo přímo plyn obsahující citlivou látku jako je BF_3 nebo helium ^3He
- Tlak plynové náplně může v závislosti na druhu plynu, rozměrech komory a celkovém fyzikálním návrhu detektoru nabývat hodnot od deseti do stovek kPa

Měřicí přístroje

- ❑ **Proporcionální počítač plněný plynem BF_3**
- ❑ **Neutronový počítač s elektrodami pokrytými borem**
- ❑ **Impulsní štěpná komora**
- ❑ **Neutronové ionizační komory**
- ❑ **Kopenzované neutronové komory**
- ❑ **Beta emisní detektory pro in core měření**

Měřicí přístroje

- ❑ **Proporcionální počítač plněný plynem BF_3**
 - ❑ Impulsní detektor
 - ❑ Nejcitlivější detektor tepelných neutronů
 - ❑ V kovovém válci je izolovaně umístěna koaxiálně tenká sběrná elektroda
 - ❑ Válec je naplněn plynným fluoridem boritým o vhodném tlaku, samotný bor bývá pro zvýšení citlivosti čidla obohacen isotopem ^{10}B

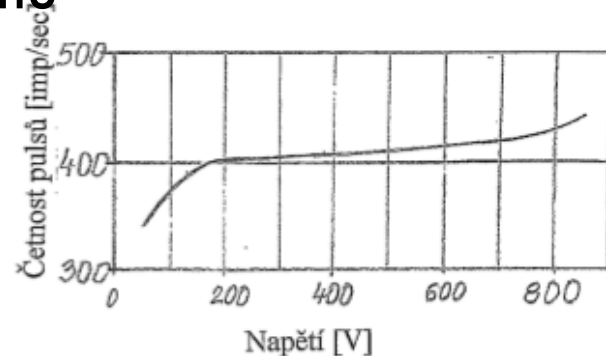
Měřicí přístroje

□ Princip činnosti

- Částice α i ionizovaný atom lithia ^7Li vylétávající z místa srážky při reakci neutronu s borem ionizují na své dráze atomy plynu a vytvářejí statisíce iontových párů, jež urychlovány elektrickým polem mezi elektrodami vyvolávají další ionizaci a zesilují prvotní ionizaci
- Zesílení prvotní ionizace je žádoucí pro zvýšení velikosti pulsů
- Nábojový impuls iontů sebraných elektrodami (jsou-li pod napětím) vyvolá proudový impuls na přívodech elektrického proudu do detektoru a proudový impuls dále vyvolá napěťový impuls na zatěžovacím odporu v přívodu

Měřicí přístroje

- Četnost pulsů, jež je údajem o velikosti měřeného neutronového toku, závisí však do jisté míry i na velikosti napětí přiloženého k elektrodám čítače
- Výstupní impulsy před jejich čítáním je však možno podrobit ještě tzv. amplitudové diskriminaci, která lépe a ostřeji potlačí nepravé pulsy, pocházející od α , β , γ záření, nebo i od elektronického šumu
- Použití vhodné pro toky o hodnotě 10^{-2} až 10^5 [n/cm²s]



Obr. 20 Napěťová charakteristika počítáče s náplní BF₃

Měřicí přístroje

- **Neutronový počítač s elektrodami pokrytými borem**
 - Podobný princip jako předešlý
 - Bór obohacený o ^{10}B je však nanesen na povrchu jedné či obou elektrod k sobě obrácených
 - Plynovou náplň může tvořit jakýkoli inertní plyn
 - Má menší citlivost než předešlý
 - Je robustnější a má vyšší životnost
 - Používají se pro detekci při spouštění
 - Pro rozsahy $(10^{-1} - 10^5) [\text{n}/\text{cm}^2\text{s}]$

Měřicí přístroje

□ Impulsní štěpná komora

- Impulsní detektor
- Podobná konstrukce předešlému, elektrody jsou však pokryty štěpitelným materiálem (např. ^{235}U či ^{239}Pu)
- Použití tam, kde gama pozadí značně převyšuje neutronový tok (např. při znovunajíždění reaktoru po předchozím odstavení z velkého výkonu)
- Užití v systémech řízení reaktoru

Měřicí přístroje

□ Princip činnosti

- Detekované neutrony vyvolávají štěpení uranu a štěpné produkty, které jsou těžké, ionizované a nesou velkou energii, způsobují ionizaci plynu, jímž je komora naplněna, a to v řádově větší míře, než ostatní radioaktivní záření – veliká přednost (možno dosáhnout vysoké selektivity)

Měřicí přístroje

- Přirozenou vlastností impulsních štěpných komor je to, že spontánní štěpení uranu doprovázené emisí α částic způsobuje, že komora dává impulsy (menší amplitudy) i když se nenachází v prostředí s neutronovým nebo gama zářením
- Této vlastnosti lze jednoduše využít ke kontrole správné funkce jak komory, tak i připojené elektronické aparatury ještě před výskytem gama nebo neutronového toku v místě komory
- Konstrukcí čidla, tloušťkou vrstvy štěpitelného materiálu a volbou plynové náplně lze zvyšovat citlivost počítače

Měřicí přístroje

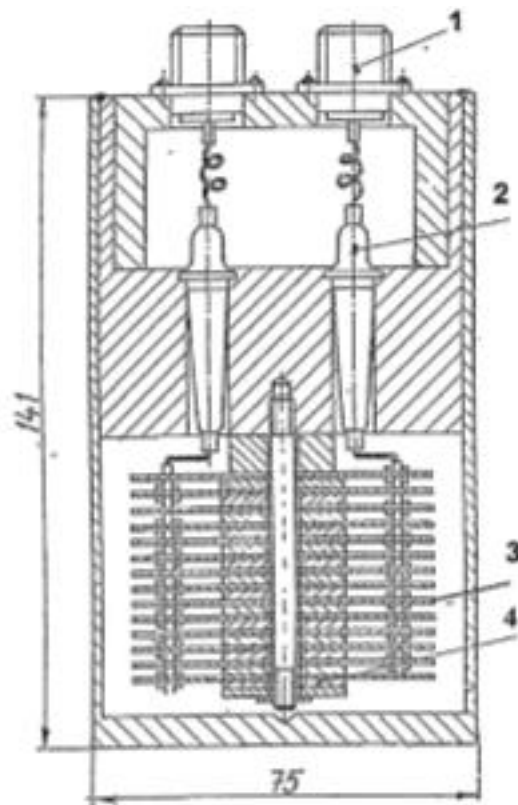
❑ Neutronové ionizační komory

- ❑ Neutronové ionizační komory využívají opět některého z principů detekce neutronů již uvedených, tj. jaderné reakce na boru ^{10}B nebo na uranu ^{235}U
- ❑ Registruje se však ustálený ionizační proud tvořený spojitou kolekcí milionů emisních párů
- ❑ Vhodné pro měření vysokých neutronových toků
- ❑ Nelze u nich však rozlišit signál neutronového toku a gama pozadí (potlačení jiného radioaktivního záření lze dosáhnout stíněním čidla)

Měřicí přístroje

- Při jmenovitém výkonu reaktoru, kdy je neutronová složka ionizačního proudu o dva až tři řády vyšší, než příspěvek od gama, to takový problém však není
- Při nízkých tocích a výkonech pod 1% N_n (provozní spouštění, hluboká regulace výkonu) by docházelo k nepřijatelným chybám
- Použití v obvodech automatické regulace
- Velice spolehlivý detektor, a to i ve vysokých tocích
- Rozsah toků 10^7 až $10^{11} [\text{n}/\text{cm}^2\text{s}]$

Měřicí přístroje



Obr. 19 Konstrukce štěpné komory

- 1- koaxiální konektor
- 2- skleněná průchodka
- 3- desky elektrod
- 4- keramické izolátory

Měřicí přístroje

□ **Kompenzované neutronové komory**

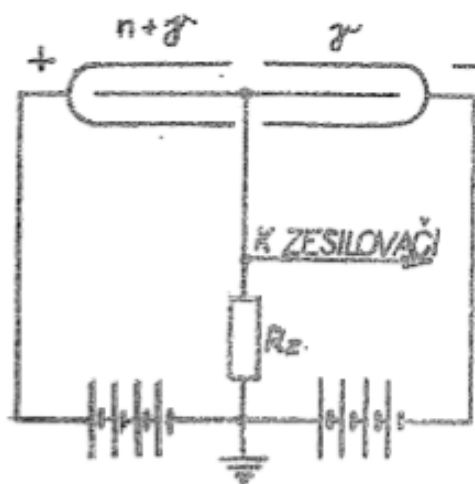
- Snaha o rozšíření použitelnosti neutronových ionizačních komor pro oblast středních a nižších toků i při přítomnosti reaktorového gama záření vedla k vývoji a konstrukci tzv. kompenzovaných neutronových komor
- Kompenzací zde rozumíme vyloučení, nebo alespoň podstatné potlačení vlivu gama záření na údaj komory
- Konstrukční spojení dvou identických komor

Měřicí přístroje

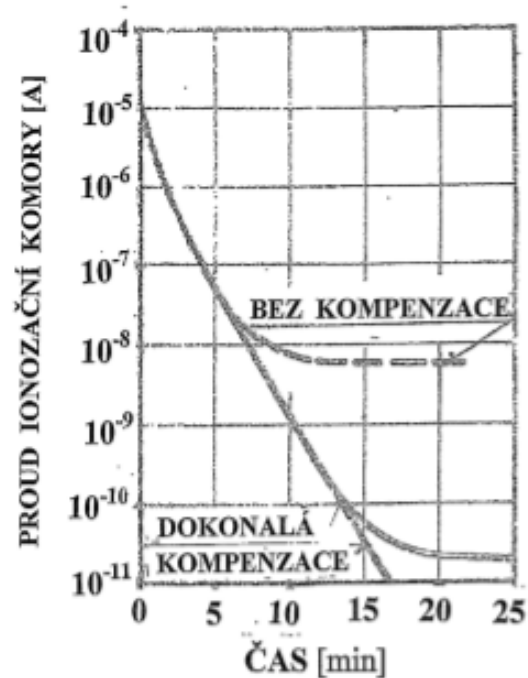
□ Princip činnosti

- Obě komory jsou stejně citlivé na záření gama, ale jen jedna je navíc opatřena na elektrodách povlakem boru ^{10}B nebo ^{235}U , takže současně měří i neutronový tok
- Obě komory mají společnou sběrnou elektrodu, ale jejich budící elektrody jsou připojeny k napětím různé (opačné) polarity, takže ve vnějším obvodu se jejich signály odčítají a na zatěžovací odpor se vede signál závislý jen na velikosti neutronového toku

Měřicí přístroje



Obr. 22 Schéma zapojení kompenzované ionizační komory



Obr. 23 Údaj kompenzované ionizační komory po zastavení reaktoru v závislosti na kompenzaci

Měřicí přístroje

- Čidlo tohoto typu je použito v modernizovaném Systému kontroly a řízení (SKŘ) jaderných reaktorů typu VVER v JE Dukovany jako čidlo pro najíždění a pro provoz při jmenovitém výkonu
- Při seřízené kompenzaci mají čidla měřící rozsah $(10^3 - 10^{11})[\text{n}/\text{cm}^2\text{s}]$
- Jejich elektrody jsou pokryty borem B^{10} o tloušťce $1\text{ mg}/\text{cm}^2$, náplň tvoří vodík s 1% helia o tlaku 1 bar.

Měřicí přístroje

□ **Beta emisní detektory pro in core měření**

- Velmi rozšířený typ detektoru
- Pro vnitroreaktorové měření
- Snadná konstrukce
 - Na drát z citlivé látky (emitor) přes vrstvu izolace je navlečen těsně tenký kovový (vodivý) plášť
- Problém s vyvedením signálu z AZ a vůbec z reaktoru
- Izolace (zejména Al_2O_3) má vysokou isolační pevnost do vysokých teplot a lze ji spolehlivě vyrobit i při malé tloušťce – tím se dá vyrobit čidlo miniaturních rozměrů (průměr od ~ 1 mm, délky podle potřeby)
- Jako plášť čidla (je současně sběrnou elektrodou) se používá nejčastěji nerezavějící ocel

Měřicí přístroje

- Na jádro čidla (emitor) se vybírají látky s velkým účinným průřezem pro aktivační pohlcení, jejichž betaaktivní izotop má krátký poločas rozpadu, aby signál detektoru nevykazoval nepřijatelné zpoždění za průběhem velikosti neutronového toku (^{103}Rh , ^{109}Ag , ^{51}V)
- Jsou používána k měření uvnitř reaktoru a palivových kazet, kde jsou neutronové toky vysoké
- Zpoždění signálu detektoru za průběhem intenzity měřeného neutronového toku lze elektronicky odstranit

Měřicí přístroje

□ Princip činnosti:

- Pracují na principu aktivace určité (citlivé) látky cestou radiačního záchytu neutronů v měřeném poli
- Tato absorpce může být, ale také nemusí být, doprovázena okamžitým zářením α nebo γ , ale nás v tomto případě zajímá beta záření radioaktivního izotopu vzniklého aktivací citlivé látky, která se tím stává emitorem (emitující elektrodou)
- Fyzikálně tato beta aktivita je emisí elektronů o jisté energii, která umožňuje elektronům překonat bariéru eventuelního izolantu i odpudivý účinek napětí, které vzniká akumulací dopadajících elektronů na tzv. sběrné elektrodě