

10. Fyzikální měření na diagnostických kazetách VVER - 440

DACH K, JIROUŠEK V., KOTT J.,
HORÁK J., TEREN S. - ŠKODA
NĚMEC J. - VŠSE PLZEŇ

V práci jsou definovány hlavní vědecké cíle fyzikálních měření na diagnostických kazetách. Stručně je popsána instrumentace diagnostických kazet pro fyzikální měření. Pozornost je věnována metodice vyhodnocení.

1. Vědecké cíle fyzikálních měření na diagnostických kazetách

Základní vědecké cíle fyzikálních měření na DK jsou zejména :

1. Rozpracování a vývoj metod neutronové šumové diagnostiky a jejich provozní využití na reaktorech VVER 440 a 1000.
2. Prohloubení znalostí o fyzikálních vlastnostech aktivních zón reaktorů VVER, zejména při provozu v nenominálních režimech včetně případu varu chladiva.
3. Ověření a zpřesnění výpočtových programů a upřesnění kritérií jaderné bezpečnosti.
4. Získání podkladů pro dosažení optimální ekonomie využití jaderného paliva.

2. Instrumentace diagnostických kazet pro fyzikální měření

Pro fyzikální měření jsou diagnostické kazety vybaveny 3 druhy detektorů hustoty toku neutronů :

- a/ miniaturními štěpnými komorami
- b/ SPN - detektory
- c/ mikrok calorimetry

2.1 Miniaturní štěpné komory

Pro 1. variantu diagnostické kazety i dosud projektované kazety v rámci MDK-RVHP je plánováno použít polskou miniaturní štěpnou komoru s možností pohybu v suchém kanále po výšce aktivní zóny.

Základní charakteristické vlastnosti komory :

Citlivost :	$2 \cdot 10^{-6}$ imp/nv
Pracovní napětí :	300 V
Maximální teplota prostředí :	400°C
Citlivá délka :	25 mm
Maximální průměr :	5,5 mm
Detekční materiál :	10 % obohacený U^{235} /0,3mg/cm ³ /
Izolační materiál :	Al ₂ O ₃
Plynová náplň :	98 % Ar, 2 % N

Komora je vybavena integrovaným triaxiálním kabelem s keramickou izolací délky 15 m.

2.2 SPN - detektory

Pro 1. i další varianty je plánováno používat sondy NDR s 5 SPN detektory s Rh emitory ϕ 0,8 mm, aktivní délky 100 mm, v kompenzovaném provedení. Vnější průměr Rh-SPN detektoru je 1,8 mm. Izolace SiO₂ : 0,2 mm. Katalogová citlivost: $21,2 \cdot 10^{-20}$ Ac^m².s/nv.

Výhledově je uvažováno o nasazení SPN-detektorů s V - emitory. Citlivost těchto detektorů lze odhadnout pro ϕ 1 mm na $1,74 \cdot 10^{-20}$ Ac^m².s/nv pro ϕ 0,5 mm na $0,728 \cdot 10^{-20}$ Ac^m².s/nv.

2.3 Kalorimetry

Reaktorové kalorimetry ŠKODA jsou v oblasti fyzikálních měření osobitým příspěvkem ČSSR v rámci MDK - RVHP.

Cílem měření s reaktorovými kalorimetry se štěpným materiálem je určit absolutní hodnotu hustoty toku tepelných neutronů, distribuci toku neutronů po výšce palivového článku, kalibrovat absolutní hodnoty toku tepelných neutronů měřených pomocí DPZ během kampaně reaktoru a spolu s výsledky DPZ a miniaturní štěpné komory vyhodnotit celkovou uvolňovanou energii v palivové kazetě.

Měřenou veličinou každého kalorimetru jsou dvě teploty. Rozdíl těchto teplot, násobený kalibrační konstantou, dává přímo množství tepla, uvolňovaného v kalorimetru. Se zahrnutím ohřevu konstrukce kalorimetru a vlivu vnějšího γ -záření určíme tepelný výkon štěpení. Matematickou cestou se určuje absolutní velikost hustoty toku tepelných neutronů.

Na obr. č. 1 jsou konstrukční délky kalorimetru pro měření reaktorového záření, který se skládá z tělíska ze štěpného nebo neštěpného materiálu, které je hermeticky uzavřeno v pokrytí, krčku, který odvádí uvolněné teplo, chladiče, který předává teplo do okolí a vakuotěsného pláště, který chrání vnitřní části čidla.

Detekční tělíska štěpná i neštěpná jsou na obr. č. 2. Standardizované průměry tělísek jsou ϕ 2 mm, délky štěpných tělísek jsou obvyklé v délkách 2 ÷ 4 mm, neštěpných do 8 mm.

Náročnost na preciznost prací vyjadřuje obr. č. 3.

Při nasazení termického detektoru v energetickém reaktoru, kde se hlavní důraz kladě na přesné určení štěpné energie, je nutné používat kompenzační kalorimetr s neštěpným materiálem, jehož radiační vývin tepla zahrnuje v podstatě parazitní vývin

tepla v konstrukci a tělísku kalorimetru od vnějšího γ záření. Vzájemné uspořádání štěpného a kompenzačního kalorimetru je na obr. č. 4. Kompenzační kalorimetr slouží za určitých předpokladů k výpočtu hustoty toku energie γ záření v reaktoru.

Pro měření teplotního spádu na krčku je každý kalorimetr vybaven 2 termočlánky. Kalibrační konstanta v jednotkách $\left[\frac{W}{mV}\right]$ se určuje laboratorní kalibrací při nahrazení radiačního vývinu tepla elektrickým ohřevem topného tělíska v daném /provocním/ režimu teploty.

Typická kalibrační křivka kalorimetru je na obr. č. 5. Matematickou závislost lze s dostatečnou přesností popsat parabolou 2 stupně.

Kalorimetrická sonda pro 1. variantu DK je konstruována pro zasunutí do suchého kanálu kazety s vnitřním ϕ 7,4 mm. V sondě je instalováno po výšce 5 axiálních kalorimetrů pro měření radiačního vývinu tepla v palivu a 1 kompenzační kalorimetr pro posouzení vývinu tepla vlivem γ záření.

Jednotlivé kalorimetry jsou vzájemně spojeny nosnou trubkou, která tvoří zároveň i komunikaci pro vývody z kalorimetrů. Celá kalorimetrická sonda je dlouhá 9,5 m a má ϕ 7 mm. Na horním konci sondy je připojen konektor umožňující napojení vývodů z kalorimetrů na kabelovou trasu od tlakové zátky DK /hlavice DK/ ke kabelovému konektoru reaktoru a dále k měřicí ústředně.

Vzhledem k nutnosti zajištění odvodu tepla z kalorimetrů i konstrukčních částí sondy přes vzduchovou mezeru a stěnu suchého kanálu do chladiwa reaktoru je třeba volit vhodné konstrukční materiály s dobrou tepelnou odolností a vhodnými technologickými vlastnostmi.

Nosné trubky sondy jsou spolu s kalorimetry svařeny po protažení vývodů v jeden celek.

Malé rozměry čidla zajišťují malou lokální deformaci hustoty toku neutronů v měřicím bodě a principiálně umožňují umístění kalorimetrické sondy do libovolného místa v roztečné mříži.

Vliv kalorimetrické sondy na rozložení neutronového toku v palivové kazetě byl počítán programem THESEUS pro obě varianty, tj. pro kalorimetrickou sondu v suchém kanálu i v kanálu zaplněném vodou. Výpočty byly provedeny pro tepelné neutrony, s konstantním zdrojem epitermálních neutronů v celé oblasti superbuňky. Obohacení paliva i detekčního tělíska kalorimetru se předpokládá 3,6 %, střední teplota moderátoru 285°C. Celkové ovlivnění kalorimetrickou sondou na úrovni 1. řady prutů je přibližně 3,5 % směrem k nižšímu výkonu a 2. řady kolem 2 %.

Výpočet potvrzuje, že při zabudování kalorimetrické sondy do palivové kazety nedojde k lokálnímu zvýšení neutronového toku a tedy ani výkonu v palivu, naopak, sonda se projeví mírným poklesem hustoty toku a obě varianty tedy vyhovují z hlediska jaderné bezpečnosti provozu kazety.

Teplotní režim v kalorimetru byl kontrolován s použitím programu JEEZ pro samočinný počítač TESLA RPP-16.

Provedené výpočty potvrdily teplotnickou bezpečnost sondy pro umístění v suchém kanále diagnostické kazety 1. varianty.

Na obr. 6 je model sondy pro DK reaktoru Rheinsberg, který byl ověřován na reaktoru VVR-S v ÚJV Řež. Sonda obsahuje 2 štěpné a 1 kompenzační kalorimetr.

Kalorimetrická sonda pro II. variantu DK je konstruována pro zabudování do upravené palivové kazety místo jednoho palivového prutu.

Vnější průměr sondy a její délka jsou shodné s rozměry palivového prutu a sonda je v přímém styku s chladivem reaktoru.

Sondu tvoří obdobně jako u 1. varianty nosná trubka, která distancuje vlastní kalorimetry. Počet kalorimetrů je shodný s var. 1.

Na spodním a horním konci je sonda opatřena koncovkami pro zavedení do spodní nosné mříže a horní distanční mříže palivové kazety. Vývody z kalorimetrů, se zvýšenou odolností plášťů vůči chladivu reaktoru, jsou na horní distanční mříži svedeny ochrannou trubicí do centrální ochranné trubky vývodů z DK.

Nosná trubka sondy je opatřena otvory, takže je i vnitřní prostor sondy s povrchem kalorimetrů vyplachován chladivem.

Vlastní kalorimetr je konstruován analogicky jako u 1. varianty.

Vzhledem k příznivějším podmínkám přestupu tepla ze sondy přímo do chladiva reaktoru je teplotní bezpečnost sondy potvrzena výpočtem pro uspořádání varianty 1.

Konkrétní vyhodnocení radiačního ohřevu závisí na uspořádání měření a lze je zpracovat počítačem v systému on-line, samozřejmě se zahrnutím příslušných korekcí na místní deformaci neutronového toku, energetického spektra neutronů a vyhoření.

Výpočtové schéma prakticky sestává z dvou částí :

Program 1.

Na vstup přicházejí změřené údaje, tj. teploty z každého termočlánku a předávají se na výstup k následujícímu zpracování

- čas i-tého měření
- okamžitý vývin tepla v každém kalorimetru
- teplota moderátoru v bodě každého kalorimetru.

Tento program je základní pro zpracování výsledků on-line na elektrárně.

Program 2.

Na vstup přicházejí údaje výpočtů programu 1. Pro určení výstupních veličin se počítají :

- změny prostorového a energetického rozložení toku neutronů ve zkoumané oblasti /změna účinných průřezů/
- změny izotopického složení paliva a kalorimetru.

Výstupní veličiny jsou :

- toky neutronů na kótě kalorimetru a v palivu
- okamžitý vývin tepla okolních palivových proutků na zadaných výškách
- vyhoření kalorimetru a okolních palivových proutků na zadaných výškách.

Protože se předpokládá zpracování dat "on-line" a co nejmenší používání paměti počítače, program nezahrnuje mnogrupové transportní výpočty rozložení neutronů. Místo toho program provádí interpolaci v tabulce dat, získaných pomocí kompletních základních programů THESEUS a REMUR-IV.

V současné době byly sestaveny makropříkazy operačního systému George počítače ODRA k ovládní programů. Probíhá testování kódu REMUR 4 pro výpočty v rezonanční oblasti. Po dokončení testování bude programový komplex doplněn programem BURN pro počet vyhoření.

Experimentální ověřování

Vodivostní kalorimetry prošly čtyřletým vývojem. První krátkodobý experiment s prototypem vodivostního kalorimetru se uskutečnil v roce 1974 na reaktoru VVR-S v Řeži. Cílem experimentu bylo ověřit činnost kalorimetru v poli intenzivní radiace a porovnat údaje kalorimetru s výsledky měření s vanadovým a rhodiovým neutrokoaxem. V průběhu roku 1976 byla vyrobena kalorimetrická sonda se šesti vodivostními kalorimetry pro palivový článek reaktoru KS-150 elektrárny A-1, která byla v provozu několik měsíců.

V roce 1977 jsme opět na reaktoru VVR-S v Řeži provedli dvoutýdenní experiment s kalorimetrickou sondou se třemi čidly. Cílem tohoto měření bylo vyzkoušet provozuschopnost mikrokolorimetrů, navrhovaných pro použití v suchém kanálu první varianty experimentální kazety reaktoru jaderné elektrárny Rheinsberg.

Maximální hustota toku tepelných neutronů v místě kalorimetru byla $8 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{s}}$. Výsledky měření jsme opět porovnávali s údaji vanadového neutrokoaxu a ověřili jsme nový způsob kalibrace čidel speciálním elektricky vyhřívaným topným tělískem s měrným příkonem až $1000 \frac{\text{W}}{\text{cm}^3}$.

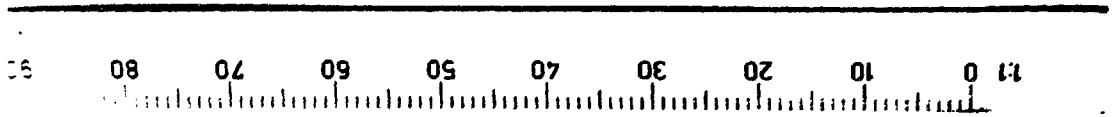
Ve skutečných podmínkách provozu na reaktoru VVER-440 byl miniaturní kalorimetr ověřen v rámci spouštění 3. bloku jaderné elektrárny NORD v NDR v závěru roku 1977. Měření se uskutečnilo ve standardním suchém kanálu č. 5 \varnothing 6,4 mm.

Kalorimetr tohoto typu je na obr. č. 7. Konstrukčně je upraven tak, aby se mohl pohybovat po výšce suchého kanálu, vnější rozměr je 5,5 mm, délka termočlánekových kabelů je 20 m.

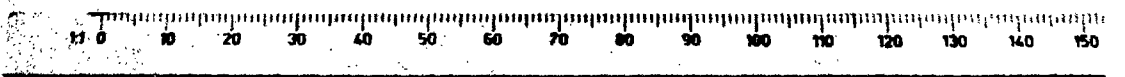
Normovaná distribuce hustoty toku neutronů v kanále č. 5 při 55 % výkonu reaktoru je na obr. č. 8 porovnána s normovanou hustotou toku neutronů měřenou v kanále č. 9 sondou DPZ. Z obrázku je zřejmé, že bodové provedení vlastního detektoru umožňuje precizní změření mikrostruktury hustoty rozložení hustoty neutronového toku po výšce za předpokladu, že je možné s celým systémem za provozu reaktoru pohybovat. Této skutečnosti je perspektivně možné využít v diagnostických kazetách. Detektor spolehlivě registruje deprese v mikrostruktuře distribuce toku neutronů, způsobené distančními mřížkami palivových článků.

V květnu letošního roku byl na reaktoru VVR-S v Řeži proveden srovnávací experiment za účasti odborníků NDR a PLR, jehož cílem bylo prověřit kompatibilitu jednotlivých detektorů použitých v DK - MDK. Dosavadní zkušenosti ukazují, že bude nutno vyvinout ještě určité teoretické úsilí k tomu, aby bylo možno spolehlivě interpretovat signály všech 3 typů detektorů z hlediska jejich prostorové vázanosti.

Dosavadní zkušenosti s použitím kalorimetrů ŠKODA nás opravňují k závěru, že kalorimetr spojuje v sobě výhody měření přímo na vzorku UO_2 v podmínkách velmi blízkých provozu palivových proutků /teplota, hustota toku neutronů, vyhořívání/. Dosavadní teoretické i experimentální práce s tímto typem detektoru dávají všechny předpoklady jeho úspěšného nasazení v diagnostických kazetách VVER.

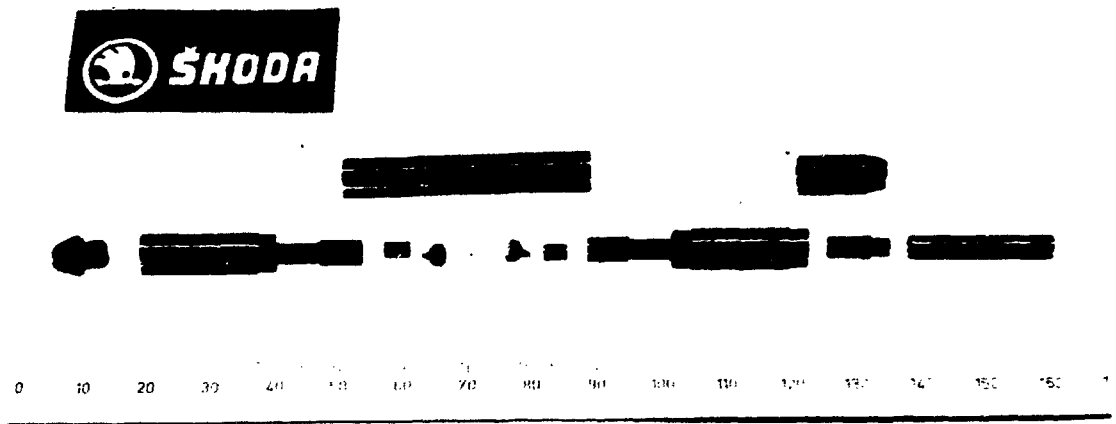


Obr.2. Detekční tělíska reaktorových kalorimetrů ze štěpného i neštěpného materiálu.

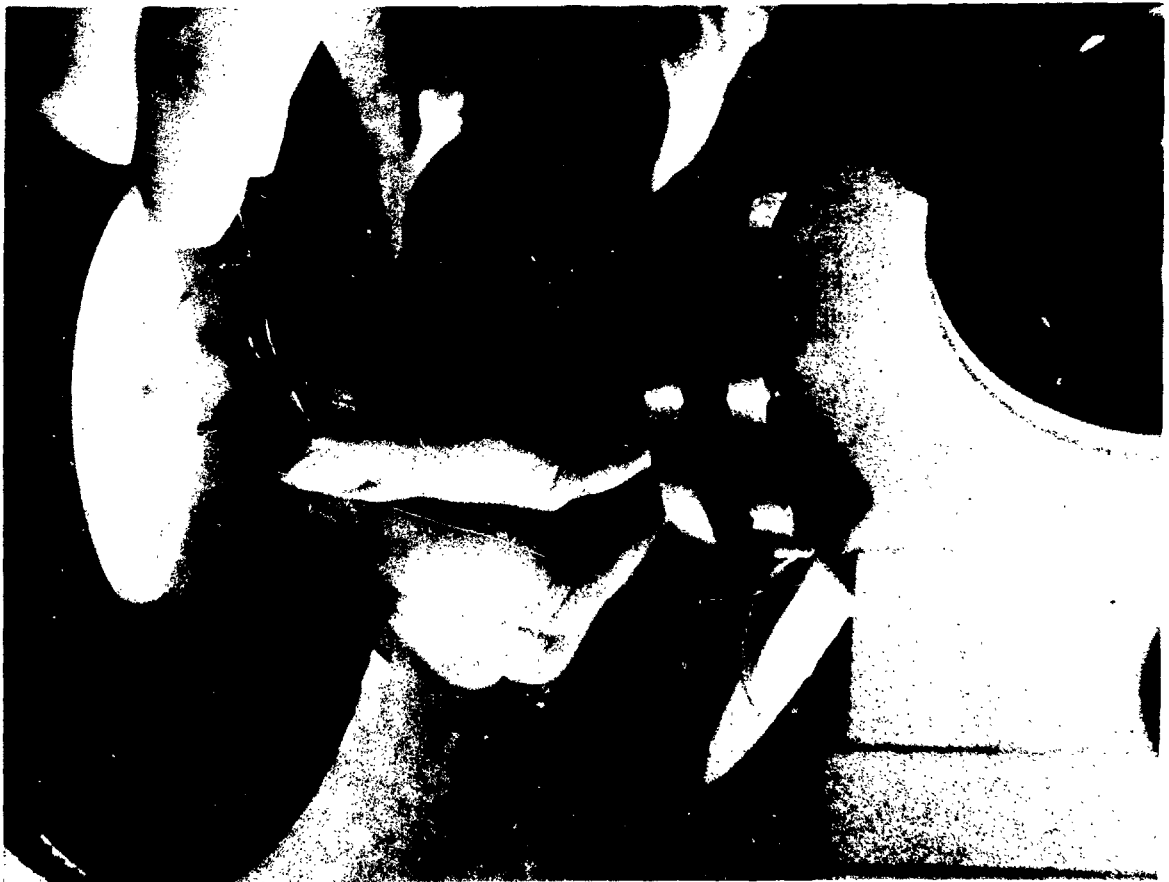


Obr.1. Hlavní díly kalorimetru pro měření reaktorového záření

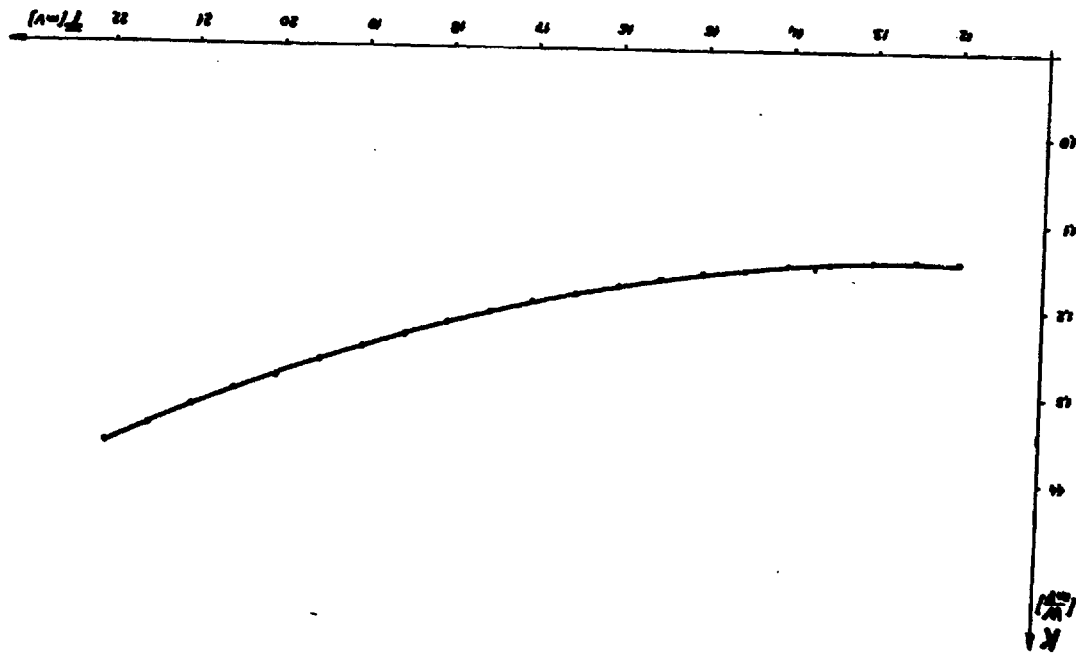
Obr. 4. Uspořádání dvojice štěpného a kompenzačního kalorimetru.



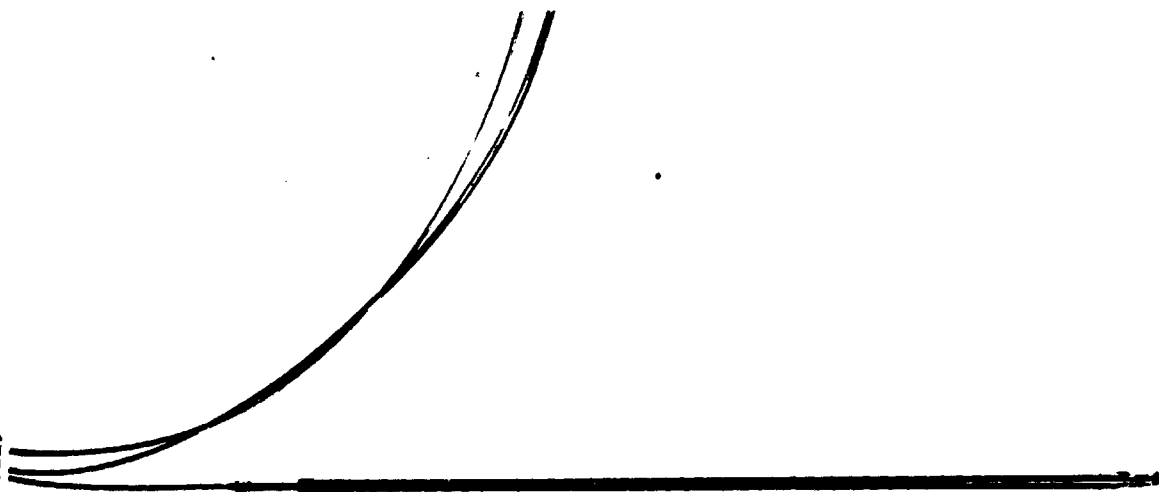
Obr. 3. Záběr z montáže miniaturních reaktorových kalorimetrů.

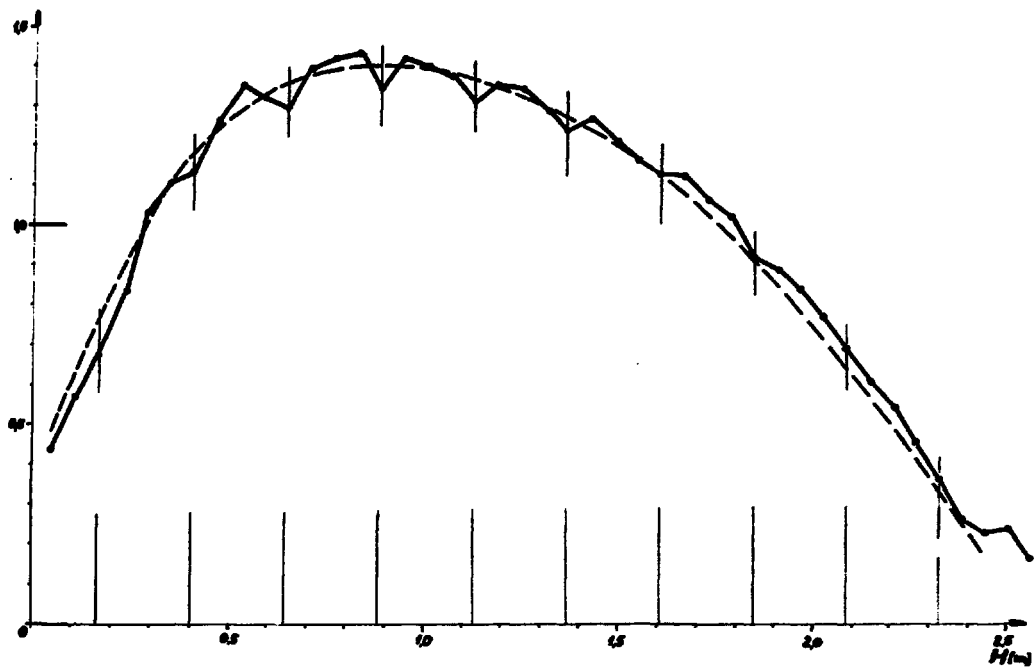


Obr. 5. Typická kalibrační křivka miniaturního kalorimetru.

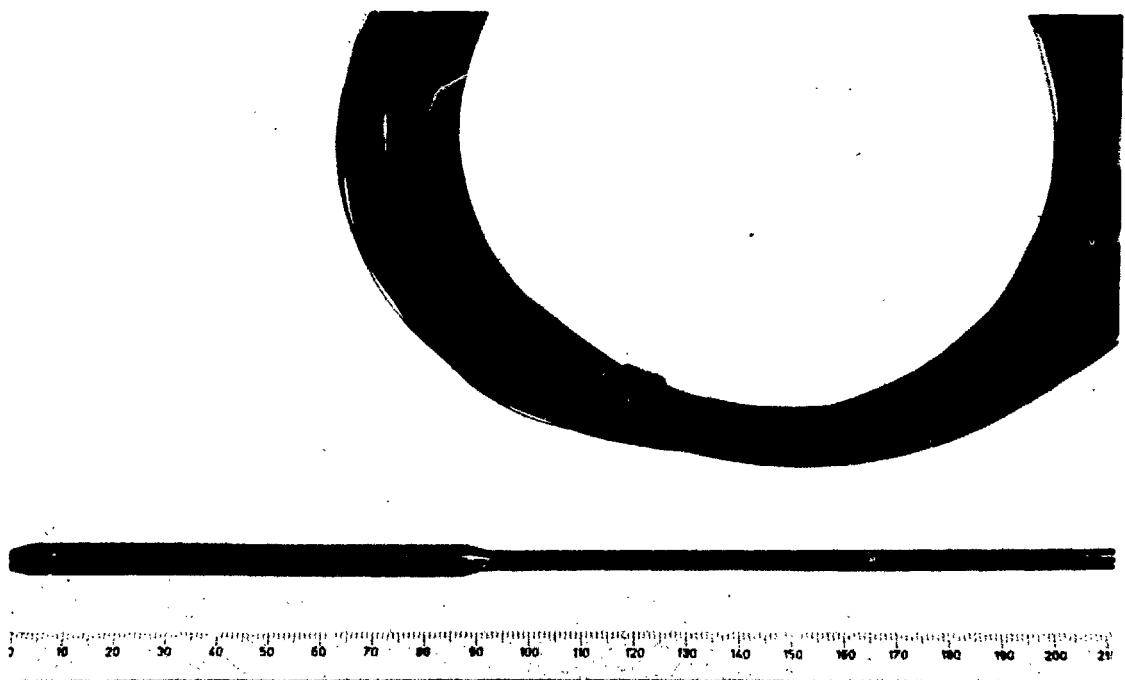


Obr. 6. Zkrácený model sondy 1. varianty DK pro ověření na reaktoru VVR-S v Řeži.





Obr.8. Relativní rozložení hustoty toku neutronů z měření kalorimetrem (plná čára) v porovnání s relativním rozložení hustoty toku neutronů z vyhodnocení SPN detektorů.



Obr.7. Kalorimetrická sonda pro ověřovací měření v suchém kanálu reaktoru VVER - 440 (NORD).