

VÝCHODISKÁ NÁVRHU METODIKY JADROVEJ BEZPEČNOSTI KONTAJNEROV VYHORETÉHO PALIVA

THE METHODOLOGY PROPOSAL BASIS OF SPENT FUEL CONTAINERS NUCLEAR SAFETY

Peter SCHREIBER, Pavol TANUŠKA, Pavol VAŽAN,
Miroslav BOŽIK

Autori: **Doc. Ing. Peter Schreiber, CSc., Doc. Ing. Pavol Tanuška, PhD., Doc. Ing. Pavol Važan, PhD., Ing. Miroslav Božík**
Pracoviská: **Ústav aplikovanej informatiky, automatizácie a matematiky, Materiálovotechnologická fakulta STU,**
Adresy: **Paulínska 16, 917 24 Trnava**
E-mail: **peter.schreiber@stuba.sk, pavol.tanuska@stuba.sk, pavel.vazan@stuba.sk, miroslav.bozik@javys.sk**

Abstract

V článku opisujeme aktuálny stav v preukazovaní radiačnej bezpečnosti kontajnerov na prepravu vyhoretého paliva a súčasne rámcovo navrhujeme alternatívny spôsob pre toto preukazovanie. Alternatíva spočíva v určení radiačnej bezpečnosti kontajnera na základe fyzikálno-tepelných výpočtov z nameraných údajov. Tento spôsob vyplynul z požiadaviek Úradu jadrového dozoru na duplicitné preukazovanie a overovanie všetkých parametrov, ktoré vplyvajú na spoľahlivosť a bezpečnosť systémov používaných v jadrovej energetike. Metodika je predmetom riešenia projektu APVV-0308-07, riešeného v spolupráci MTF STU (zastúpenej ULAM) a VUJE a.s. Trnava.

A description of an actual status of documentation of nuclear safety of containers for burned-down fuel transport is given in this article. An alternative frame for this documentation is given at the same time, too. The alternative consists of physical-thermal computations of container nuclear safety from measured data. This method has resulted from Nuclear Regulatory of Slovak Republic requirements. The organization requires the duplicate proving of all reliability and safety parameters of systems used in nuclear power engineering. The suggested methodic is a topic of an APVV-0308-07 project, solved in co-operation of MTF STU (represented by Institute of Applied Informatics, Automation and Mathematics) and Research Institute of Power Plants (VUJE), joint stock company Trnava.

Key words

kontajner, vyhoreté jadrové palivo, bezpečnosť

container, spent nuclear fuel, safety

Úvod

V medzinárodných a slovenských legislatívnych dokumentoch (The IAEA Safety Standards Series TS-R-1, Zákon o mierovom využívaní jadrovej energie č. 541/2004, Vyhláška ÚJD č. 57/2006 o požiadavkách pri preprave rádioaktívnych materiálov a iné) sú okrem iného stanovené aj podmienky pre používanie kontajnerov vyhoretého jadrového paliva (VJP).

Sú definované parametre, ktoré je potrebné sledovať a preukázateľne dokladovať. Limitné a bezpečnostné parametre kontajnerov sú stanovované analýzami a výpočtami. Použité postupy, metódy a programy vychádzajú z výkonových (jadrovo-fyzikálnych) pomerov a sú schválené kompetentnými inštitúciami.

Prevádzkovateľom prepravných zariadení je JAVYS, a.s. Snahou prevádzkovateľa je verifikovať z pohľadu bezpečnosti rozhodujúce parametre obalov na základe meraní a alternatívnych výpočtov.

Predmetom tohto článku je náčrt metodiky, ktorá umožní overiť presnosť výpočtových jadrovo-fyzikálnych postupov na určenie zostatkového výkonu VJP prepravovaného v kontajneroch. Metodika je založená na vytvorení matematického modelu kontajnera ako tepelnej sústavy. Po nameraní relevantných veličín na kontajneri bude pomocou modelu možné určiť zostatkový výkon aj na základe fyzikálno-tepelných výpočtov a tým verifikovať doteraz používanú metodiku.

Súčasný stav

Technické riešenie kontajnera

Na základe rozhodnutia vlády SR o privatizácii Slovenských elektrární, a.s., rozhodnutiach FNM SR a po splnení všetkých podmienok 1. apríla 2006 prevzala spoločnosť JAVYS zodpovednosť za prevádzkovanie jadrovej elektrárne V-1, vyradovanie jadrových zariadení, nakladanie s rádioaktívnymi odpadmi a vyhoreným jadrovým palivom.

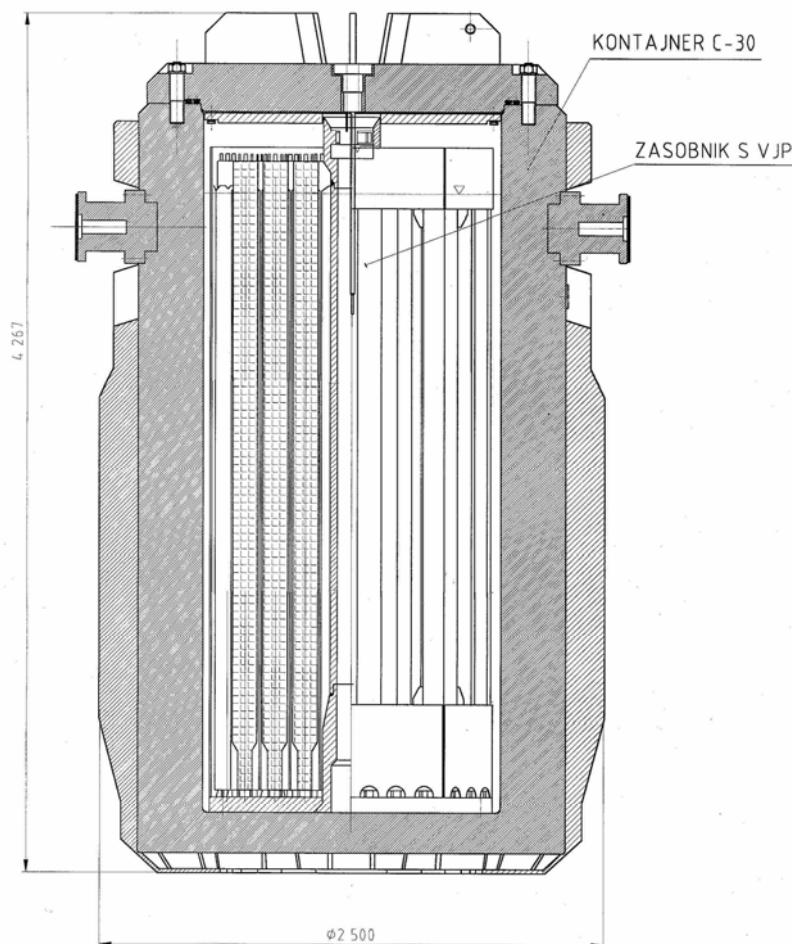
Na prepravu vyhoretého jadrového paliva pre palivo VVER-440 boli určené obalové súbory (kontajnery) C-30. Kontajner je určený pre transport a manipuláciu so zásobníkmi vyhorených kaziet. Pre JAVYS, teda vlastníka a prevádzkovateľa kontajnerov sú stanovené podmienky ich používania.

JAVYS v súčasnosti disponuje 4 kontajnermi typu C-30.

Teleso kontajnera je charakterizované masívnym tvarom s vonkajším axiálnym rebrovaním v tvare uzavretej valcovej nádoby (bližší opis v [1]).

Hmotnosť prázdneho kontajnera (s vekom a tieniacou doskou)	67 300 kg
Hmotnosť veka	5 500 kg
Hmotnosť plného kontajnera (VJP + voda):	
- so zásobníkom KZ -48	84 600 kg
- so zásobníkom T-12	80 260 kg
- so zásobníkom T-13 (18 pal. kaziet)	79 150 kg
Celková výška kontajnera bez záchytnej hlavice veka	4 267 mm
Celková výška kontajnera so záchytnou hlaviceou veka	4 367 mm
Vonkajší priemer	2 500 mm
Vnútorňý priemer	1 475 mm

Vnútorňý objem	6 000 l
Maximálny prevádzkový tlak	0,7 Mpa
Skúšobný tlak	1,05 Mpa
Prevádzková teplota	-40 až 100 °C
Transportná a skladovacia poloha kontajnera a PK	vertikálna



Obr. 1. Kontajner vyhoretého paliva C-30

Transportný kontajner C-30 sa používa na prepravu palivových kaziet VVER-440 uložených buď v kompaktnom zásobníku KZ-48 alebo v zásobníku T-12, resp. netesných kaziet v zásobníku T-13.

Kompaktný zásobník KZ-48 môže obsahovať maximálne 48 palivových kaziet. Kazety pozostávajú z prútikov tvorených tabletami UO_2 a povlakom zo zirkóniovej zliatiny a sú v zásobníku usporiadané do trojuholníkovej mriežky. Hmotnosť uránu v kazete nesmie prekročiť 122,7 kg, čo je hodnota použitá pri preukazovaní bezpečnosti kontajnera voči kritičnosti.

Z dôvodov dodržania hraničných teplôt nesmie celkový zostatkový výkon prevážaného paliva prekročiť 24 kW, pričom výkon každej kazety musí byť nižší ako 605 W. Splnenie noriem na dávkové príkony žiarenia zasa vyžaduje, aby celková intenzita zdrojov neutrónov bola nižšia ako $7,95 \cdot 10^9$ neutrónov/s a zdrojov gama-žiarenia nižšia ako $1,65 \cdot 10^{17}$ fotónov/s. Únik rádioaktivity z kontajnera neprevýši dovolené hodnoty, ak celková aktivita prevážaného paliva nepresiahne $2,35 \cdot 10^{17}$ Bq.

Zásobník T-12 môže obsahovať maximálne 30 palivových kaziet reaktora VVER-440, rovnakých ako v predchádzajúcom prípade. Celkové hodnoty výkonu a aktivity paliva sú taktiež rovnaké.

Zásobník T-13 môže obsahovať maximálne 18 hermetických puzdier, z ktorých každé obsahuje 1 kazetu VVER-440. Vzhľadom na podobnosť konštrukcie a menší počet prepravovaných kaziet hodnoty pre zásobník T-12 platia aj pre zásobník T-13.

Výpočty fyzikálnych parametrov

Návrhové hodnoty fyzikálnych parametrov inventára kontajnera C30 s kompaktným zásobníkom KZ-48 alebo so zásobníkom T-12 sú dosiahnuteľné po určitom čase od skončenia ožarovania paliva v reaktore. Vyhorené kazety sa po odstavení bloku vyvezú z aktívnej zóny reaktora bazénov skladovania, kde prebieha ich postupné dochladzovanie. Súčasne s poklesom zostatkového výkonu dochádza aj k znižovaniu intenzity zdrojov žiarenia i aktivity štiepnych produktov v palive.

Z dôvodov obmedzenej kapacity bazénov skladovania je maximálna doba dochladzovania paliva limitovaná v závislosti od produkcie paliva v jednotlivých kampaniach reaktora. Tento počet s rastúcim obohatením paliva klesá a tým sa maximálna doba dochladzovania predlžuje. Analýzy vykonané pre palivo súčasnej konštrukcie ukázali, že jednotlivým obohateniam zodpovedajú nasledujúce maximálne doby pobytu kaziet v bazénoch skladovania: 3,6 % - 4 roky, 4,0 % - 4,5 roka, 4,4 % - 5 rokov.

Východiskové údaje

Pri výpočtoch fyzikálnych parametrov inventára sa vychádzalo z predpokladu, že stredné vyhorenie kaziet 50 MWd/kgU sa dosiahne pobytom paliva v reaktore počas 5 kampaní s jednotnou dĺžkou 290 efektívnych dní a maximálnym vyhorením kazety 55 MWd/kgU. Počiatočné obohatenie paliva sa uvažovalo 4,4 %. Pri výpočtoch globálnych hodnôt charakterizujúcich celú náplň kontajnera sa predpokladalo jeho zaplnenie 48 (kompaktný zásobník KZ-48) alebo 30 (zásobník T-12) identickými kazetami so stredným vyhorením 50 MWd/kgU. V prípade maximálne vyhorenej kazety bol určovaný len zostatkový výkon s cieľom získať konzervatívne podklady pre hodnotenie lokálneho prestupu tepla. Výpočty všetkých fyzikálnych parametrov inventára boli vykonané pre dobu chladenia paliva od 2,5 do 5 rokov.

Metóda výpočtu a výsledky

Na výpočet fyzikálnych parametrov inventára sa používa americký výpočtový komplex SCALE 4.3. (moduly SAS2 a ORIGEN-S). Tento modulárny systém je určený na vykonávanie analýz vlastností čerstvých i vyhorených palivových súborov.

Vlastný výpočet zostatkového výkonu, zdrojov žiarenia a aktivity sa vykonáva modulom ORIGEN-S. Základom jeho algoritmu je sústava lineárnych diferenciálnych rovníc 1. rádu opisujúca vznik a zánik nuklidov v jadrovom palive. Výsledkom výpočtov sú zostatkový výkon [kW], aktivita [Bq], intenzita zdrojov fotónov [f/s] a intenzita zdrojov neutrónov [n/s] v závislosti od doby dochladzovania. Výpočty sú podrobne opísané v [1].

Náčrt metodiky

Keďže Úrad jadrového dozoru vyžaduje verifikáciu doteraz používanej metodiky, bol navrhnutý projekt riešený v spolupráci MTF STU a VUJE. a.s. Cieľom je návrh novej metodiky určovania zostatkového výkonu VJP v kontajneroch a jej využitie v rámci experimentálneho spôsobu určovania tohto parametra paralelne k jadrovo-fyzikálnemu výpočtu z výkonových pomerov.

Hlavné etapy navrhovanej metodiky sú nasledovné:

1. Vytvorenie matematického modelu kontajnera ako tepelnej sústavy tak, aby bolo možné určovať zostatkový výkon výpočtom z nameraných a zo známych veličín. Model umožní počítať zostatkový výkon prepravovaného inventáru (VJP) v kontajneri v nadväznosti na kombináciu počiatočného obohatenia, vyhorenia a minimálnej doby dochladenia VJP (parametre VJP) v bazéne skladovania v kontajneroch rôznych typov za rôznych podmienok.
2. Špecifikácia spôsobu merania a výpočtu potrebných veličín (tepelné koeficienty, teploty a pod.).

Veličiny potrebné pre ďalší postup vyplynú z matematického modelu. Niektoré parametre kontajnerov sú známe z technickej dokumentácie, prípadne zo správ o riešení výskumných úloh (potrebnými zdrojmi disponuje najmä riešiteľ VUJE, a.s.), iné bude treba merať alebo získať experimentmi. Úlohou tejto etapy je špecifikovať, akým spôsobom sa veličiny budú získavať, merať, počítať a počítačovo evidovať a spracovávať. Etapa bude nasledovať bezprostredne po vytvorení modelu.

3. Realizácia systémov pre experimentálne merania.

Na meranie veličín bude potrebné navrhnuť a zhotoviť špecifické metodiky, zariadenia, systémy, prípravky, pomôcky a uskutočniť úpravy na kontajneri VJP podľa záverov 2. etapy. Aj tu bude snaha využiť existujúce prístrojové vybavenie, systémy a metodiky, kde nositeľom know-how je VUJE, a.s.

4. Experimentálne merania.

V rozsahu podľa bodu 2. bude potrebné realizovať experimenty a získať potrebnú databanku údajov, pričom s vlastnými meraniami sa začne potom, ako budú vytvorené meracie systémy (bod 3).

5. Vyhodnotenie experimentov a príprava podkladov pre návrh metodiky.
6. Implementácia metodiky.

Bod 1 je ťažiskom novej metodiky. Je riešený v [2], kde je odvodený a zdôvodnený nasledujúci vzťah:

$$P = S.a \left(-Te - \frac{Ti \sum_{i=1}^N e^{-\frac{t_i Sa}{K}} - \sum_{i=1}^N Yi - Ti \sum_{i=1}^N e^{-2\frac{t_i Sa}{K}} + \sum_{i=1}^N e^{-\frac{t_i Sa}{K}} Yi}{\sum_{i=1}^N e^{-2\frac{t_i Sa}{K}} + N - 2 \sum_{i=1}^N e^{-\frac{t_i Sa}{K}}} \right)$$

kde

S je plocha povrchu kontajnera,
a je stredná hodnota koeficientu prestupu tepla,
 T_e je teplota okolia,
 T_i je počiatková teplota kontajnera,
 T_{inf} je konečná teplota kontajnera,
K je tepelná kapacita kontajnera.

Podotýkame, že koeficient a a plocha povrchu kontajnera S sa dajú určiť pomocou známeho privádzaného výkonu P (dodaného napr. pri elektrickom ohreve) z rozdielov teplôt kontajnera $T_f - T_e$ po a pred ohrevom:

$$a.S = \frac{P}{T_f - T_e}$$

Z uvedeného vyplýva, že ťažiskovým problémom je meranie teplôt. Meraniami samotnými a spôsobom vyhodnocovania výsledkov sa zaoberajú body 2 – 5 metodiky. Doteraz dosiahnuté výsledky sú opísané v [3].

Ďalší postup a očakávané prínosy

Namerané veličiny budú slúžiť ako vstupné údaje pre výpočet v aplikačnom programovom systéme, ktorého implementácia je zavŕšením metodiky. Systém realizuje výpočet, zobrazí ho v tabuľkovom a grafickom tvare a vykoná porovnanie s výsledkom z fyzikálno-výkonových parametrov. Implementácia tohto systému je plánovaná na rok 2009.

Predkladané riešenie považujeme za nové a originálne nielen v rámci SR, ale v danej oblasti aj na medzinárodnej úrovni.

Hlavným vedeckým prínosom práce bude návrh novej technológie (metodiky) preukazovania relevantnosti aplikovaných výpočtových programov používaných na stanovovanie parametru zostatkového výkonu VJP v prepravných kontajneroch typu C-30. Je predpoklad, že ponúknuté riešenie bude možné registrovať a chrániť formou priemyselného vzoru a prípadne aplikovať pre iné typy kontajnerov na prepravu VJP.

Spoločenským prínosom riešenia je potvrdenie údajov v bezpečnostnej dokumentácii stanovených matematicko-analytickými metódami. Zvýši sa stupeň dôvery verejnosti k používanému spôsobu prepravy VJP v danom type prepravného zariadenia.

Tento príspevok bol vypracovaný za podpory a v rámci projektu **APVV-0308-07 „Metodika preukázania jadrovej a radiačnej bezpečnosti kontajnerov na prepravu vyhoretého jadrového paliva pomocou experimentálne získaných údajov“**.

Zoznam bibliografických odkazov:

- [1] BOŽIK, M. *Metodika preukázania bezpečnosti prepravného zariadenia na prepravu vyhoreného jadrového paliva. Písomná práca k dizertačnej skúške*. Trnava: MTF STU, 2008, 71 s.
- [2] BARTOŇ, S. Stanovení zbytkového výkonu jaderného paliva. In Materials Science and Technology [online]. 8/2008. Dostupné na internete <<http://www.mtf.stuba.sk>>
- [3] Kopček M., Eliáš, A.: REALIZÁCIA SCADA SYSTÉMU AKO PODPORNÉHO NÁSTROJA PRE NÁVRH METODIKY ZISŤOVANIA ZOSTATKOVÉHO VÝKONU VYHORENÉHO JADROVÉHO PALIVA. Internetový časopis MTF STU, 9/2008.