

Bezpečnost jaderné energetiky - pokročilý jaderný reaktor

Jana Petruš, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, petruj@vscht.cz

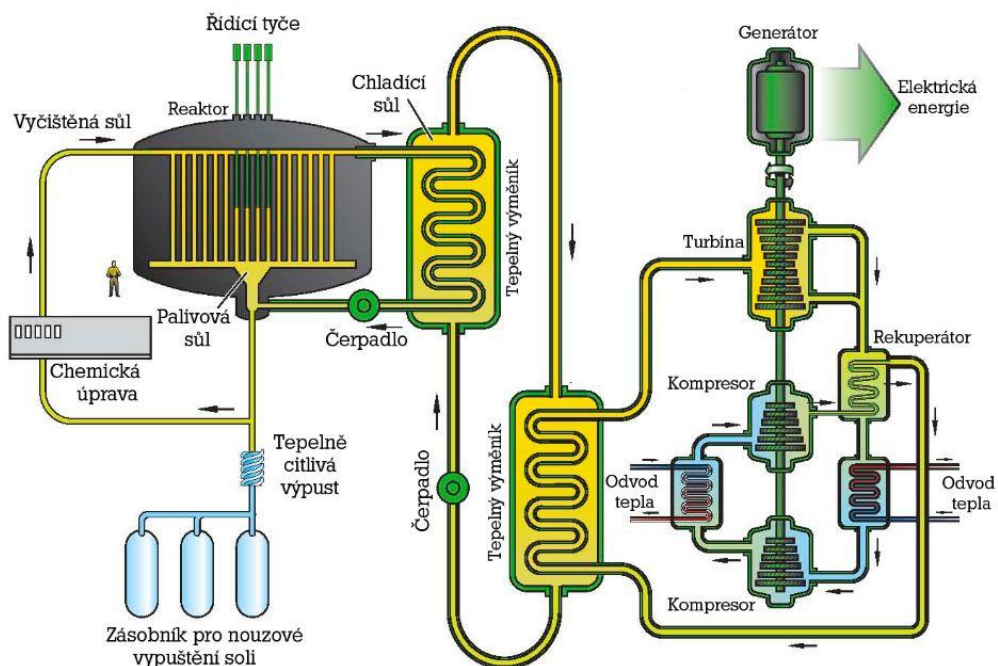
Souhrn

Snahou jaderné energetiky je neustále posilovat bezpečnost a zvyšovat účinnost jaderných zařízení a efektivitu využití paliva. To je také cílem projektu „ADAR – Pokročilý jaderný reaktor řízený urychlovačem“, který bude ve spolupráci českých vědeckých pracovišť VUT v Brně, ČVUT v Praze, VŠCHT Praha, UO v Brně, UJF AV ČR a amerického partnera TAMU studovat možnosti jaderného reaktoru řízeného urychlovačem s palivem/chladivem ve formě tekutých chloridových solí.

Klíčová slova: jaderný reaktor; tekuté chloridové soli

Úvod

Alternativou současných jaderných reaktorů by se mohly stát reaktory s tekutým palivem na bázi roztavených solí. Výhodami těchto reaktorů by byla větší bezpečnost – nepracují na rozdíl od současných tlakovodních reaktorů za vysokých tlaků, dochází tedy k menšímu namáhání konstrukčních prvků a omezuje možnost prasknutí některé části primárního potrubí. Samotný koncept reaktoru je také bezpečnější: v případě havárie lze soli z aktivní zóny pasivně vypustit do podzemních stíněných kontejnerů. Reaktor je provozován v podkritickém stavu a jako takový neumožňuje nekontrolovatelný rozvoj štěpné řetězové reakce. Další výhodou reaktoru je možnost spalovat ochuzený uran a také thorium, které je na zemi zastoupen ve větším množství než uran.



Obr. 1 Reaktor využívající roztavené soli [1]

Projekt ADAR

Cílem rozvíjejícího se projektu „ADAR – Pokročilý jaderný reaktor řízený urychlovačem“ je výrazně posunout úroveň vědeckého poznání v oblasti designu, vlastností a funkce pokročilého solného jaderného reaktoru řízeného urychlovačem ve spolupráci českého projektového týmu s Texas A&M University, College Station, TX, USA. Řešení projektu bude vycházet ze základního návrhu systému ADS (Accelerator Driven Systems), provedeného v USA na univerzitě TAMU v College Station a bude konkretizovat a upřesňovat bílá místa ve výzkumu urychlovačem řízených podkritických reaktorů s tekutým palivem/chladivem ve formě chloridových solí.

Uvedený výzkum je natolik komplexní, že jej není možné provádět v malém úzce zaměřeném týmu a bez mezinárodní spolupráce. Výzkum transmutačních reaktorů typu ADS probíhá pouze na několika místech světa – v Dubně, v Indii je výzkum zaměřený na výpočetní analýzy ADS metodami Monte Carlo a na experimenty zaměřené na středně vysoké energie neutronů, Evropská Unie společně s belgickou vládou financuje ADS systém zvaný MYRRHA, který je však projektován s pevným palivem a chladivem ve formě eutektiky Pb/Bi, výzkum kritických reaktorů s tekutými fluoridovými solemi (tedy bez vnějšího spalačního neutronového zdroje a bez urychlovače) probíhá např. v Oak Ridge National Laboratory ve spolupráci s českým Centrem výzkumu Řež. Výzkum využití thoria probíhá v Indii, výzkum kritických MSR reaktorů probíhá také v Číně. O výsledcích těchto projektů jsou však doposud pouze kusé informace, projekty stále pokračují.

Problematika urychlovačem řízených podkritických systémů (ADS) bude tedy řešena ve spolupráci několika vědeckých organizací, které budou navzájem sdílet výsledky a umožní tak vznik komplexních modelů chování inovativních jaderných technologií v oblasti solného systému ADS. Základní návrh a výsledky multi-fyzikálních výpočetních analýz z Texas A&M University budou základem pro detailní analýzy prováděné na VUT v Brně. Bude vytvořena sada experimentálních solných stendů pro studium transportu neutronů a validaci základních neutronických výpočetních modelů a experimentální metoda měření neutronového spektra tepelných a rezonančních neutronů a jejich oddělování ze spalačního vysokoenergetického spektra. Výsledkem budou také experimentální hodnoty účinných průřezů pro vytipované materiály ADS MS reaktoru.

Hlavním výsledkem UE FS ČVUT bude termohydraulický model ustálených i přechodových stavů primárního okruhu reaktoru (celého bloku) s tekutým palivem ve formě chloridových solí a s intenzivním externím zdrojem neutronů.

Na VŠCHT Praha budou řešeny korozní charakteristiky navržených konstrukčních materiálů v prostředí chloridových solí a analyzovány povrchy vytvořené oxidické vrstvy a změny ve složeních testovaných solných směsí. Bude navrženo a zkonstruováno vlastní experimentální zařízení pro práci s taveninami.

Výsledkem řešení na UO bude pokročilý systém gama detekce a spektrometrie.

Výsledkem ÚJF bude soubor změřených reakčních rychlostí a mikroskopických účinných průřezů materiálů potenciálně využitelných pro systém ADS MSR.

Korozní chování materiálů v taveninách solí

Dílním úkolem projektu bude studium korozního chování konstrukčních materiálů v prostředí tavenin chloridových solí, studiu podmínek reaktorových systémů s tekutými chloridovými solemi, návrhu a konstrukci experimentální aparatury. Výzkum různých typů chemicky a teplotně odolných materiálů bude probíhat ve vysokoteplotních autoklávech ústavu energetiky, VŠCHT Praha za různých teplot a v různých směsích solí. Bude studován i vliv vlhkosti a nečistot přítomných v solích na životnost

jednotlivých materiálů. Exponované vzorky kovů budou následně analyzovány metodou XPS (X-ray photoelectron spectroscopy), metalograficky a gravimetricky.

V první fázi projektu budou na základě konzultací s americkými partnery zvoleny vhodné slitiny s předpokládanou dostatečnou korozní odolností v agresivním prostředí chloridových tavenin a výběr vhodných směsí solí s důrazem na jejich teplotu tání. U jednosložkových systémů solí by byla potřebná provozní teplota příliš vysoká, použitím směsi, obvykle tří- až čtyř-složková směs, dochází k výraznému snížení teploty tání, záleží i na vzájemném poměru složení jednotlivých solí ve směsi (Tab. 2). Zdroje informací o chování směsí solí jsou ovšem velmi omezené a výběr ideální směsi solí, také s přihlédnutím k potenciálnímu nebezpečí rozkladu složek směsi při vyšších teplotách, bude neskutčný.

V dalších fázích projektu bude navržen experimentální autokláv pro testování vzorků materiálů v různých směsích solí za různých podmínek prostředí.

Tab. 1 Charakteristika některých chloridových solí [2]

	$t_{\text{tání}}$	t_{varu}	ρ
	(°C)	(°C)	(g.cm ⁻³)
PuCl ₃	767	1765	5,71
NaCl	801	1413	2,163
MgCl ₂	708	1412	2,352
LiCl	605	1382	2,456
KCl	770	1390	2,13
CaCl ₂	782	1600	2,24

Tab. 2 Charakteristika směsí chloridových solí [3,4,5]

složky směsi	poměr složek / %	teplota tání / °C
NaCl : KCl	50 : 50	645
BaCl ₂ : LiCl	25 : 75	514
LiCl : KCl	58,2 : 41,8	352

Financováno z účelové podpory na řešení projektu výzkumu a vývoje MŠMT, id. kód LTAUSA18198 s názvem *ADAR - Pokročilý jaderný reaktor řízený urychlovačem*.

Literatura

[1] Reaktor využívající roztavené soli (MSR – Molten Salt Reactor). In: www.cez.cz [online]. Praha: ČEZ, 2019 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/nove-jaderne-zdroje/jaderna-energie/budoucnost-jadernych-technologii.html>

[2] KOSTEČKA, Jan. *Studium chování jaderného reaktoru chlazeného tekutými solemi* [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/107814>. Diplomová práce. VUT v Brně.

[3] BOLIVAR, Rafael; FRIEDRICH, Bernd. The influence of increased NaCl: KCl ratios on Metal Yield in salt bath smelting processes for aluminium recycling. *World of Metallurgy—ERZMETALL*, 2009, 62: 366-371.

[4] BASIN, A. S., et al. The LiCl-KCl binary system. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2008, 53.9: 1509-1511.

[5] VERSEY, Joshua R.; PHONGIKAROON, Supathorn; SIMPSON, Michael F. Separation of CsCl from LiCl-CsCl molten salt by cold finger melt crystallization. *Nuclear Engineering and Technology*, 2014, 46.3: 395-406.