VĚDECKÁ INFRASTRUKTURA PRO VÝZKUM MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ PRO POKROČILÉ PLYNEM CHLAZENÉ REAKTORY V ČR

Jan Berka[1,2], Ivan Víden[2]

[1] Centrum Výzkumu Řež, s.r.o., Hlavní 130, 25068 Řež, jan.berka@cvrez.cz
[2]VŠCHT Praha, Technická 1905, 16628 Praha 6

Pokročilé, plynem chlazené reaktory – vysokoteplotní plynem chlazený reaktor (VHTR) a plynem chlazený rychlý reaktor (GFR) patří mezi tzv. reaktory IV. Generace. Jedná se o zařízení, která ještě nejsou v provozu, nicméně na jejich výzkumu a vývoji se pracuje na světových výzkumných pracovištích. Na výzkumných projektech zaměřených na tyto typy reaktorů se podílí i Česká republika, jedná se např. o výzkum zaměřený na odolnost konstrukčních materiálů nebo chemii plynného chladiva. V Řeži u Prahy byla postavena experimentální smyčka simulující fyzikální a chemické podmínky chladiva vysokoteplotních reaktorů, výstavba dalších zařízení pro výzkum plynem chlazených reaktorů je plánována. Další vybavení využitelné pro tento výzkum se nachází na vysokých školách a dalších výzkumných institucích.

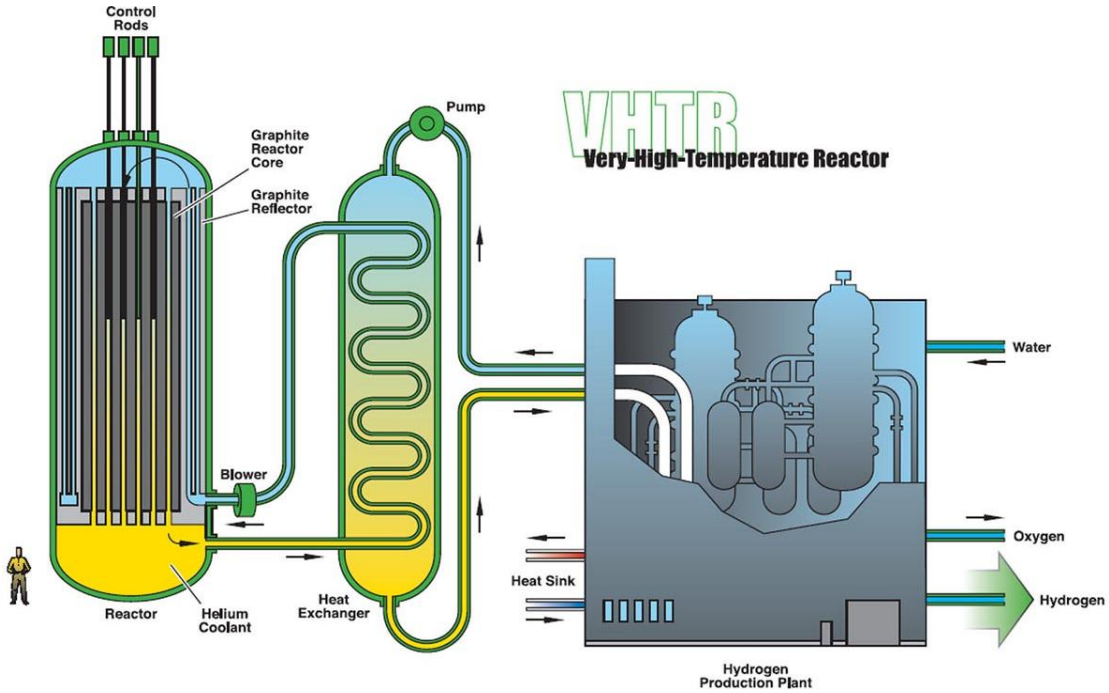
klíčová slova: plynem chlazené reaktory

Došlo 20. 2. 2014, přijato 5. 3. 2014

1. Úvod

Pokročilé, plynem chlazené reaktory patří mezi šest typů jaderných reaktorů označovaných jako jaderné reaktory IV. generace [1]. Tyto systémy by měly v porovnání se stávajícími reaktory dosahovat vyšší účinnosti při přeměně tepelné energie na energii elektrickou, lepšího využití jaderného paliva a rovněž by měly produkovat méně radioaktivních odpadů, dosažení vysokého stupně, zejména pasivní bezpečnosti, je samozřejmostí. Většina reaktorů IV. generace je koncipována jako reaktory využívající ke štěpení rychlé neutrony; tzv. rychlé reaktory principiálně umožňují výrobu štěpného materiálu např. z vyhořelého paliva z běžných jaderných reaktorů. Společnými charakteristikami reaktorů IV. generace je použití jiných druhů chladiva a dosažení vyšší teploty chladiva než v současných nejrozšířenějších (vodou chlazených) jaderných reaktorech. Jaderné reaktory IV. generace ještě nejsou v provozu, s jejich komerčním využitím se počítá nejdříve cca po roce 2030. V současnosti jsou tyto systémy předmětem výzkumu a vývoje na mezinárodní úrovni.

Plynem chlazené reaktory jsou mezi reaktory IV. generace zastoupeny dvěma základními typy – tzv. (velmi) vysokoteplotní reaktor (Very High Temperature Reaktor - VHTR) a rychlý plynem chlazený reaktor (Gas Fast Reaktor - GFR). VHTR (obr. 1) je reaktor chlazený heliem a moderovaný grafitem s termálním neutronovým spektrem.



Obr. 1: Schéma velmi vysokoteplotního reaktoru (VHTR) [1]

Teplota chladiva na výstupu z aktivní zóny by měla dosahovat až 1000 °C. Seznam hlavních parametrů reaktoru VHTR lze nalézt v tabulce 1.

Tabulka 1 Doporučené parametry VHTR [1]

Výkon reaktoru	600 MW_{th}
Teplota chladiva vstup/výstup	640/1000 °C
Tlak na vstupu/výstupu	Závisí na procesu
Průtok helia	320 $kg.s^{-1}$
Tepelné zatížení aktivní zóny	6-10 $MW_{th}.m^{-3}$
Palivo	UO_2 (U^{235} < 20 %), částice pokryté povlakem ZrC, bloky, jehlice nebo koule
Celková účinnost využití tepelné energie	>50 %

S využitím takto vysoké teploty chladiva se počítá nejen pro výrobu elektřiny, ale také pro přímé využití tepla chladiva v technologických procesech – tzv. kogeneraci. Jako příklad kogenerace, který je často spojován s plynem chlazenými reaktory, lze uvést pokročilé způsoby výroby vodíku pomocí tzv. termochemických cyklů (z nichž neznámější je tzv. jod-sírový cyklus [2-4]) nebo vysokoteplotní elektrolýza [5].

Dalším příkladem je zplyňování uhlí pomocí jaderné energie produkované vysokoteplotním reaktorem – projekt zaměřený na tuto problematiku běžel v Německu již v 70. letech 20. století [6]. Účinnost těchto procesů je přímo úměrná teplotě, proto je snaha o dosažení vysoké teploty chladiva. Pro dosažení maximální účinnosti při výrobě elektřiny počítají některé návrhy reaktoru VHTR s umístěním turbíny v primárním okruhu [1, 7], toto řešení ale dosud nebylo u plynem chlazených reaktorů realizováno.

Projekt VHTR navazuje na prototypy vysokoteplotních reaktorů (tzv. HTR, HTGR), které byly provozovány ve Velké Británii, USA a Německu v 60. až 80. letech 20. století [8, 9]. V současnosti jsou v provozu dva experimentální reaktory tohoto typu: HTR-10 v Číně [10] a HTTR v Japonsku [11]. Projekty na výstavbu dalších prototypů HTR reaktorů ve světě stále existují [11, 12], ale některé z nich (jako např. PBMR v Jihoafrické republice) byly v poslední době pozastaveny. Zahájena byla výstavba demonstrační elektrárny HTR-PM v Číně [13, 14], dle databáze IAEA PRIS [15] by mělo jít o blok o elektrickém výkonu 200 MW. Přehled provozovaných reaktorů typu HTR je uveden v tabulce 2 [9].

Tabulka 2 Přehled v minulosti a současnosti provozovaných HTR reaktorů [9]

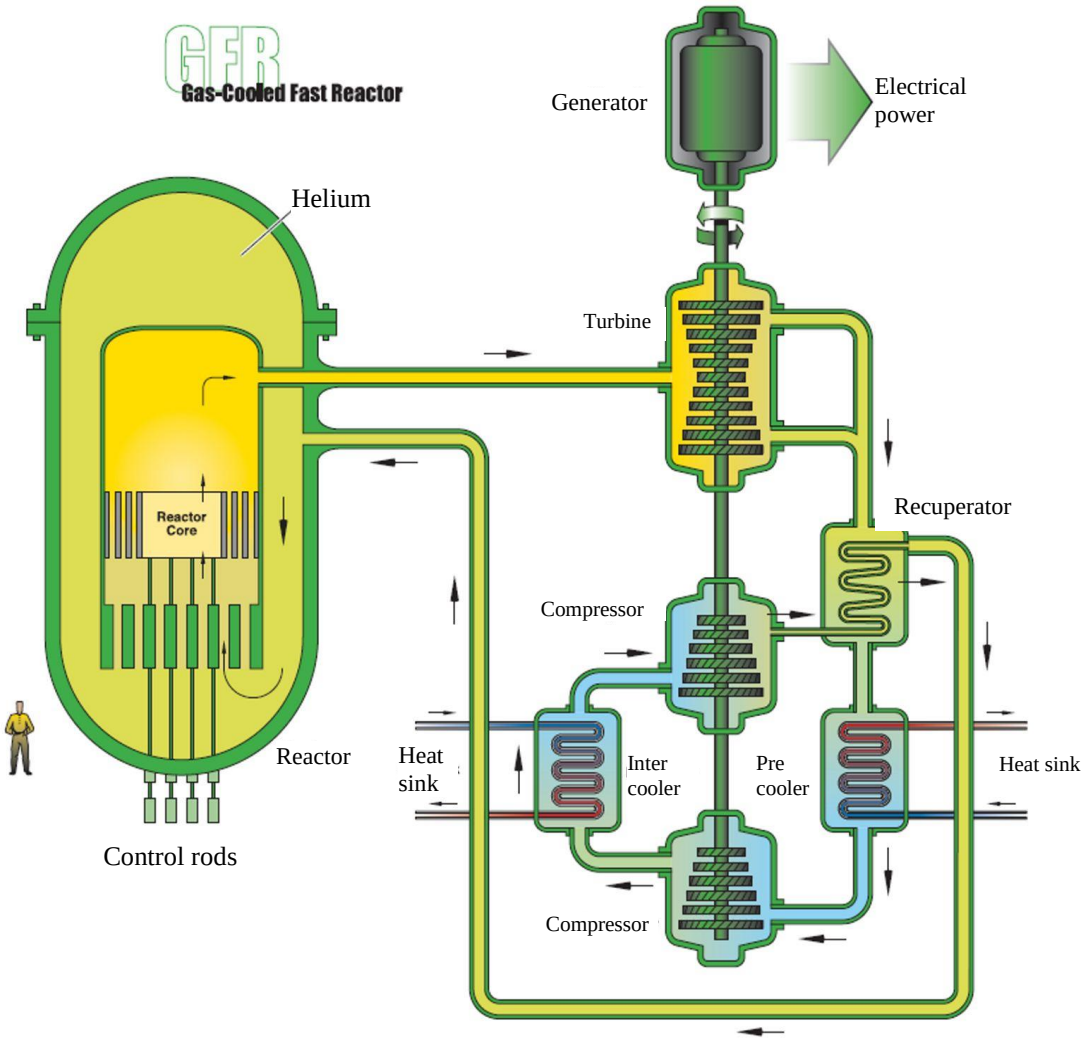
Reaktor	Typ	V provozu od - do	Typ AZ	Tlak chladiva (MPa)	Teplota chladiva vs./výs. z AZ (°C)
Dragon Velká Británie	Experimentální	1965 - 1975	Prismatická	2	350/750
Peach Bottom USA	Demo elektrárna	1967 - 1974	Prismatická	2,25	377/750
AVR Německo	Experimentální	1968 - 1988	Kulové lože	1,1	270/750-950
THTR 300 Německo	Demo elektrárna	1985 - 1989	Kulové lože	4 - 5	270/750
Fort St. Vrain USA	Demo elektrárna	1976 - 1989	Prismatická	4,8	400/775
HTR-10 Čína	Experimentální	2000 – stále v provozu	Kulové lože	3	250/750
HTTR Japonsko	Experimentální	1998 – stále v provozu	Prismatická	4	395/850-950

Reaktory typu HTR a VHTR se vyznačují vysokým stupněm pasivní bezpečnosti [13], což je dáno především jejich nízkým tepelným zatížením aktivní zóny (viz. tabulka 1). Riziko tavení aktivní zóny by mělo být vyloučeno i při úniku chladiva [16].

Oblastí výzkumu a vývoje souvisejících s reaktory VHTR je několik, mezi hlavní patří výzkum konstrukčních materiálů a jejich dlouhodobé odolnosti v podmínkách chladiva, vývoj paliva a palivového cyklu, design některých komponent (např. výměníků), vývoj plynové turbíny, bezpečnost a fyzika reaktoru nebo přímé využití procesního tepla v technologických procesech [1].

Plynem chlazený rychlý reaktor – GFR (obr. 2) - se od VHTR liší, mimo jiné, hlavně spektrem neutronů použitých na štěpení paliva a jednotkovým tepelným zatížením aktivní zóny. Oproti VHTR není v aktivní zóně přítomen grafit, což může mít vliv na obsah minoritních chemických látek v chladivu. Doporučené parametry reaktoru GFR jsou uvedeny v tabulce 3. Teplota chladiva by i u tohoto typu reaktoru měla dosahovat vysokých hodnot, což umožní přímé využití tepla v technologických procesech. Rychlé spektrum neutronů by mělo umožnit výrobu nového štěpného materiálu např. z vyhořelého jaderného paliva nebo ochuzeného uranu.

Rychlý reaktor chlazený plynem nebyl dosud v žádné zemi postaven ani provozován. Všechny doposud realizované rychlé reaktory byly chlazeny taveninou kovů. Realizaci zatím brání řada technických problémů týkajících se materiálů, fyziky reaktoru, bezpečnosti, atd., které je nutno vyřešit.



Obr. 2 Schéma rychlého plynem chlazeného reaktoru [1]

Tabulka 3: Doporučené parametry GFR [1]

Výkon reaktoru	600 MW_{th}
Účinnost elektrárny (přímý cyklus, chladivo – helium)	48 %
Teplota chladiva na vstupu a výstupu z aktivní zóny	490 °C/850 °C
Tlak chladiva	9 MPa
Tepelné zatížení aktivní zóny	100 $MW_{th}.m^{-3}$
Referenční složení paliva	UPuC/SiC (70/30 %) s cca 20 % obsahem Pu
Konverzní faktor	cca 1

Na mezinárodní úrovni se pracuje na návrhu prototypu rychlého plynem chlazeného reaktoru Allegro [17].

Tepelný výkon tohoto prototypu by měl být 50 až 80 MW, maximální dosažitelná teplota chladiva kvůli zvolenému typu paliva alespoň v prvních etapách provozu by měla dosáhnout „jen“ 550 °C. Na výzkumu a vývoji experimentálního reaktoru Allegro se podílí Česká i Slovenská republika, tyto země spolu s Maďarskem a Francií by se v budoucnu mohly podílet i na výstavbě tohoto reaktoru. Uvedené státy tvoří konsorcium mezinárodního projektu ALLIANCE (Preparation of ALLegro - Implementing Advanced Nuclear Fuel Cycle in Central Europe) financovaného v rámci 7. rámcového programu EU, cílem projektu je především příprava programu výzkumu, vývoje a požadavků na design a bezpečnost reaktoru Allegro.

2. Infrastruktura pro výzkum pokročilých plynem chlazených reaktorů ve světě

Významnými zařízeními pro výzkum plynem chlazených reaktorů jsou dva dosud provozované experimentální HTR reaktory v Číně a Japonsku [10, 11]. Tato zařízení se využívají např. na získání provozních zkušeností a to i při mezních provozních podmínkách, simulaci některých mimořádných událostí, studium kogenerace výroby elektřiny a výroby vodíku pokročilými technologiemi, ověření materiálů komponent

reaktoru, atd. Dalšími zařízeními jsou tzv. experimentální smyčky, tj. zařízení, která simulují některé parametry skutečného reaktoru, účelem experimentálních smyček je např. výzkum odolnosti materiálů, chování a změn fyzikálních parametrů provozního média, ověření komponent (výměníků, cirkulátorů, aj.). Smyčky pro výzkum korozní odolnosti konstrukčních materiálů se nacházejí např. v CEA a AREVA ve Francii [18] nebo výzkumných institucích v USA [19]. Tato zařízení umožňují simulovat složení chladiva a teplotu plynem chlazených reaktorů, mnohé korozní smyčky však nelze dosáhnout průtoku a tlaku srovnatelného s tlaky a průtoky v reálných reaktorech. Vliv plynného média na konstrukční materiály při nízkých a vysokých tlacích a průtocích může být rozdílný [7, 20]. Relativně známým zařízením je smyčka HELOKA (Helium Loop Karlsruhe) ve Forschungszentrum Karlsruhe v Německu [21]. Jedná se o zařízení primárně určené pro výzkum fyzikálního chování heliového chladiva pro prototyp fuzního reaktoru ITER, teoreticky by mohlo být ale toto zařízení i pro výzkum spojený s vysokoteplotními plynem chlazenými reaktory. Další zařízení pro výzkum VHTR lze nalézt ve studii OECD [22].

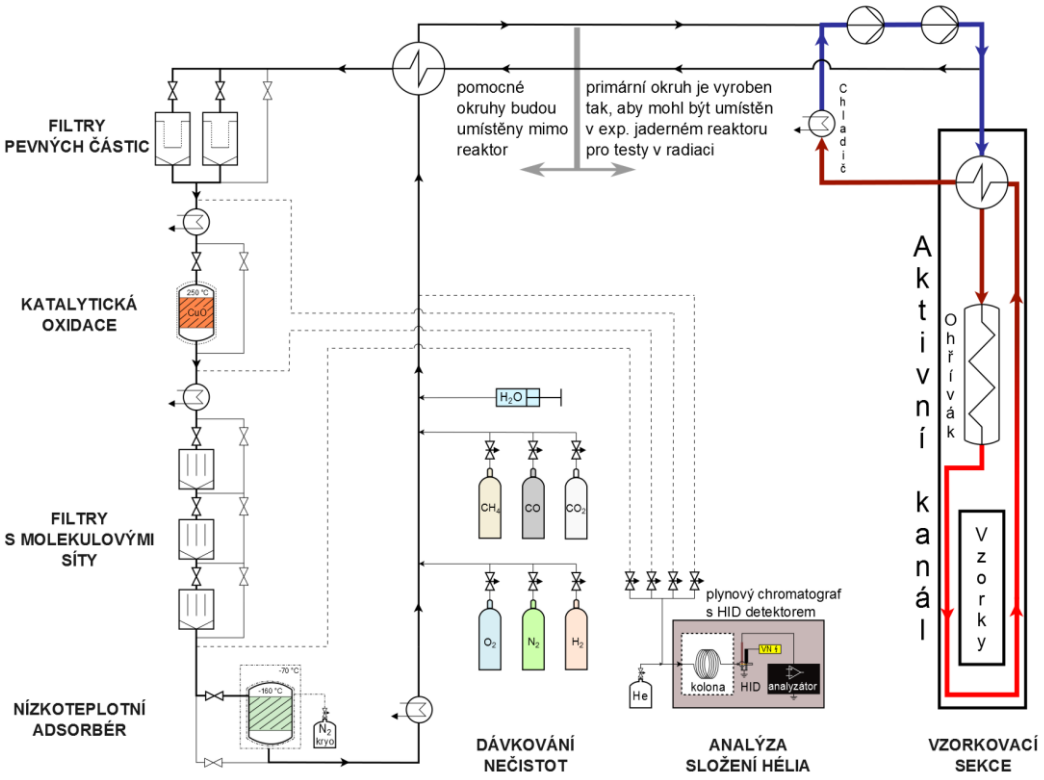
3. Infrastruktura pro výzkum plynem chlazených reaktorů v ČR

Vysoké školy, výzkumné instituce i průmyslové podniky v ČR se zapojují do národních a mezinárodních projektů, které jsou navázány na výzkum pokročilých jaderných reaktorů. Pro řešení těchto projektů jsou využívána jednak unikátní zařízení zkonstruovaná specielně pro výzkum plynem chlazených reaktorů a jednak zařízení víceúčelová. Mezi nejvýznamnější specielní zařízení v ČR patří Vysokoteplotní héliová experimentální smyčka (High Temperature Helium Loop – HTHL) v Řeži u Prahy.

3.1. Vysokoteplotní héliová experimentální smyčka

Jedná se o zařízení simulující chemické a fyzikální podmínky chladiva VHTR a GFR reaktorů. Účelem HTHL je testování odolnosti konstrukčních materiálů a výzkum chemie a čištění chladiva [23]. Zařízení se skládá z několika částí: aktivního kanálu, systému čištění, úpravy a kontroly čistoty helia. – viz. schéma na obr. 3 a foto na obr. 4. Původně se počítalo s umístěním aktivní části smyčky do zóny reaktoru LVR-15, což by umožnilo testy materiálů v heliu za vysoké teploty při působení proudu neutronů. V souvislosti s projektem SUSEN [24] však bylo rozhodnuto o výstavbě nové vysokoteplotní heliové smyčky pro provoz v reaktoru LVR-15. Stávající smyčka bude sloužit pro testy materiálů mimo reaktor a pro neaktivní experimentální provozní ověření konstrukce aktivního kanálu.

Válcový prostor o průměru 50 mm a výšce 475 mm pro umístění vzorků materiálů se nachází ve spodní části aktivního kanálu smyčky. Hlavní maximální projektované parametry HTHL jsou následující: tlak plynu 7 MPa, teplota v prostoru pro umístění vzorku 900 °C a průtok plynu v aktivním kanálu 38 kg.hod^{-1}.



Obr. 3 Schéma vysokoteplotní heliové smyčky v Řeži

Obr. 4 Vysokoteplotní héliová experimentální smyčka - celkový pohled na zařízení od vstupu do experimentální haly. Aktivní kanál HTHL vpravo.

Tyto parametry se blíží reálným provozním parametrům VHTR reaktorů, z těchto důvodů hodnotí studie OECD [22] HTHL jako jedno z nejdůležitějších zařízení pro světový výzkum VHTR.

Délka aktivního kanálu je cca 6 m. Jeho důležitou součástí je dvoustupňový cirkulátor umístění na vrcholu aktivního kanálu (obr. 5), jehož pracovní teplota může dosáhnout až 200 °C.

Obr. 5 Oběhový cirkulátor HTHL

Systém čištění helia a dávkování nečistot zahrnuje přesné dávkování nečistot do proudu plynu, čistící okruh a systém kontroly čistoty. Hlavní typy nečistot očekávaných v chladivu VHTR jsou uvedeny v tabulce 4. Nečistoty se do plynného chladiva reaktoru mohou dostat průnikem z okolí, desorpcí z konstrukčních materiálů, mohou vznikat následnými reakcemi např. vlhkosti nebo kyslíku s grafitovým moderátorem v jádru reaktoru, atd. Pro porovnání jsou v tabulce 4 uvedeny koncentrace nečistot dosahované při stabilním provozu prototypů HTR [7, 18].

Tabulka 4 Nečistoty očekávané v chladivu VHTR

Nečistota	Koncentrace (vppm)		
	Očekávané rozmezí	AVR	DRAGO
H_2, tritium	20 – 500	30	1,0
H_2O	do 10	3	0,05
CO	1 – 300	30	0,6
CH_4	2 – 40	-	0,15
CO_2	0.1 – 10	10	<0,02
N_2	do 1,5	-	0,15
O_2	<1	-	-
prach	-	-	-

Dávkování přídavných složek do helia ve smyčce je řešeno pomocí přesných elektrických ventilů přes dávkovací nádobu, voda bude dávkována v kapalném stavu. Návrh systému čištění byl inspirován systémy čištění helia pro reaktory HTR, konkrétně čínský experimentální reaktor HTR-10 [25]. Princip odstranění nečistot je následující: Prach a korozní produkty obsahující radioaktivní částice (^{60}CO, ^{59}Fe) o průměru větším než 5μm se zachytí na mechanických filtrech. H_2 včetně radioaktivních izotopů (tritia) a CO se zoxidují na katalyzátoru (CuO) při cca 250 °C na vodu a CO_2. Voda a oxid uhličitý se následně zachytí na molekulových sítech (obr. 6) při pokojové teplotě. CH_4, O_2, N_2 a ostatní zbytkové nečistoty budou zachyceny na nízkoteplotním adsorbéru (obr. 7) při teplotě až -160 °C. Tento aparát má dvoustupňové chlazení, teploty do -70 °C jsou dosahovány kompresorovým chlazením, nižší teploty by měly být dosaženy chlazením kapalným dusíkem. Systém chlazení kapalným dusíkem ale nebyl v době vzniku tohoto článku dokončen, funkční je jen kompresorové chlazení. Systém čištění helia je propojen s aktivním kanálem smyčky, max. průtok skrz tento systém by se měl pohybovat kolem 10 % z celkového průtoku helia smyčkou. Systém je navržen jako variabilní, průtok je možno měnit, některé aparáty bude možno během experimentů bez nutnosti demontáže vyřadit z provozu. Jako náplň jednotlivých adsorbérů jsou navržena molekulová síta o velikosti pórů 4A nebo 5A, která byla využita v prototypech HTR reaktorů pro odstranění CO_2 a H_2O [11]) a různé typy aktivního uhlí pro zachycení CH_4 a ostatních typů nečistot zejména v nízkoteplotním adsorbéru.

Obr 6 Část systému čištění helia HTHL. Vlevo adsorbéry s molekulovými síty, v pozadí mechanické filtry a další součásti systému

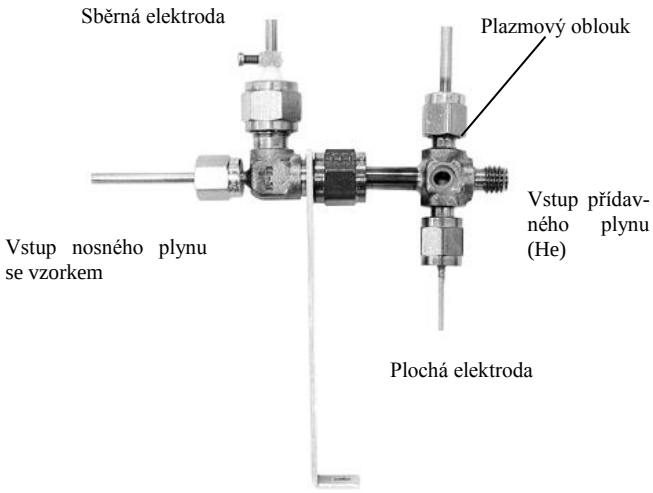
Obr. 7 Nízkoteplotní adsorbér s chladícím aparátem

V úvahu připadají též adsorbenty na bázi silikagelu, které byly rovněž používány na jaderných elektrárnách s plynem chlazenými reaktory [26].

Pro kontrolu složení plynného média ve smyčce je důležité přesné stanovení zejména látek uvedených v tabulce 4, které klade značné nároky na zvolené analytické metody a případně i odběr vzorku plynného média. Součástí HTHL jsou odběrové trasy zakončené odběrovými místy. Tyto trasy jsou navrženy tak, aby byla minimalizována kontaminace odebraného vzorku okolním vzduchem, což je zajištěno systémem evakuací a proplachu odběrových tras čistým plynem před odběrem vzorků. Vzorky ze smyčky lze odebírat např. do speciálních odběrových kanystrů, případně jiných zařízení pro následnou analýzu v laboratoři, pro sledování hlavních složek (viz. tabulka 4) je přímo k odběrovým trasám připojen plynový chromatograf (GC) s heliověionizačním detektorem (HID, obr. 8).

Obr. 8 Systém čištění, dávkování a kontroly čistoty helia s plynovým chromatografem v popředí

Vývojem analytické metody založené na využití GC-HID bylo dosaženo těchto detekčních limitů: H_2: 0,3 vppm, CO: 0,6 vppm, CH_4: 0,4 vppm, CO_2: 0,2 vppm, N_2: 0,1 vppm, O_2: 0,1 vppm. Detektor HID (obr. 9) má tedy velikou odezvu i na malé koncentrace látek, které se vyskytují v chladivu V/HTR.



Obr. 9 HID detektor

Princip detektoru je následující: Helium prochází prostorem mezi dvěma elektrodami, atomy helia jsou zde přivedeny do excitovaného stavu za vzniku heliové plazmy. Při návratu atomů helia do základního stavu dojde k vyzáření fotonu. Tento foton následně ionizuje molekuly vzorku, ionizovány jsou všechny látky s ionizačním potenciálem nižším, než 17,7 eV. Ionizované molekuly jsou přitahovány ke sběrné elektrodě, signál je poté zesílen a veden do vyhodnocovací jednotky [27].

Velmi citlivá je i metoda FTIR, lze pomocí ní stanovit ale pouze látky s různými atomy v molekule, např. molekuly N_2 nebo O_2 nelze touto metodou detekovat.

Metody založené na plynové chromatografii nejsou vhodné pro monitorování vlhkosti plynu, proto byl pro nepřetržité sledování obsahu H_2O v plynu ve smyčce použit systém BARTEC F 5673 (obr. 10). Řídící jednotka tohoto systému umožňuje zapojit až tři čidla pro měření obsahu vlhkosti v plynu. Obsah vody v plynu je tímto přístrojem stanovován na principu měření změny vlnové délky paprsku infračerveného světla [28].

Obr. 10 Analyzátor vlhkosti BARTEC 5673 s čidly vlhkosti [28]

Tato metoda je přesná především pro stanovení nízkých koncentrací vlhkosti – od 1 do řádově několika set vppm. Výhodou systému BARTEC oproti konkurenčním systémům je, že senzory vlhkosti není nutné během provozu zařízení pravidelně kalibrovat, kalibrace se provádí pouze jednou před prvním použitím nebo první montáží systému. Nevýhodou může být, že tato metoda vykazuje poměrně pomalou odezvu na skokovou změnu vlhkosti. Čidla pro stanovení vlhkosti jsou v HTHL umístěna na vstupu do systému dávkování nečistot a čištění helia, za adsorbéry s molekulovými síty a na výstupu ze systému čištění a dávkování (tj. za nízkoteplotním adsorbérem) - obr. 11.

Obr. 11 Čidlo hygrometru BARTEC 5673 integrované do smyčky HTHL

Smyčka HTHL prošla několika fázemi zkušebního provozu, během kterého musela být odstraněna celá řada poruch a nedostatků tohoto unikátního zařízení, často bylo třeba řešit nestandardní provozní situace. V cirkulujícím plynném médiu se objevilo znečištění organickými látkami (patrně zbytky maziv a odmašťovadel z výroby), které bylo nutné odstranit [30]. Dále bylo nutno řešit problémy s ohřevem aktivní části smyčky. Při vyšších teplotách docházelo ke snižování elektrického odporu keramických částí mezi topnými spirálami, rostlo riziko elektrického zkratu. Teploty 900 °C tak bylo možno dosáhnout až po zásadním vylepšení topných elementů [31]. Dále se projevila náchylnost aktivního kanálu k deformacím vlivem nestejnoměrného ohřevu. Tento jev byl zapříčiněn také poměrně složitou konstrukcí a rozměry (velmi úzký a několik metrů dlouhý). Jako dalšími problematickými komponenty se ukázaly být dávkovací ventily a cirkulátor, zvláště jeho druhý stupeň. V době dokončování tohoto článku je připraven ke spuštění první „ostrý“ test vzorků slitiny 800 H ve smyčce HTHL, vzorky by měly být exponovány v proudícím heliu obsahujícím typické nečistoty pro chladivo HTR 1000 hod. při teplotě 760 °C.

3.2. Ostatní experimentální zařízení

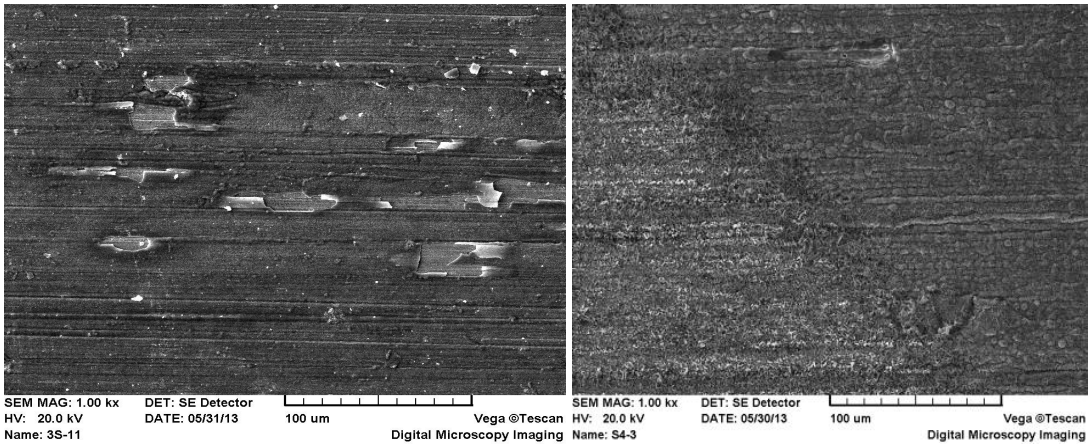
3.2.1 Vysokoteplotní héliová pec HTF

Dalším zařízením pro výzkum odolnosti materiálů za vysoké teploty v plynné atmosféře v Řeži u Prahy je tzv. vysokoteplotní pec (High Temperature Furnace - HTF - obr. 12).

Obr. 12 Vysokoteplotní pec (HTF) se zařízením pro řízené vlhčení plynu pro výzkum odolnosti materiálů v plynné atmosféře za vysoké teploty

Jedná se o zařízení s křemennou retortou o vnitřním průměru 39 mm, do které jsou umisťovány vzorky, do retorty je přiváděn plyn požadovaného složení, pro experimenty jsou používány většinou specielní plynné směsi připravené výrobcem technických plynů. Prostor pro vzorky se nachází cca uprostřed 50 cm dlouhé pece, délka tohoto prostoru je cca 15 cm. Před vstupem do retorty je do trasy plynu zařazeno zařízení pro řízené vlhčení plynu pro, které lze v případě potřeby z trasy plynu vyřadit. Před vstupem do retorty je kontrolována vlhkost plynu hygrometrem Bartec 673, vlhkost plynu je možno před vstupem do retorty odstranit na cca 0,5 m vysoké koloně naplněné molekulovým sítem 5A.

Ve výše popsaném uspořádání umožňuje HTF testy za nízkých tlaků (cca do 1 bar) a průtoků (cca do 1 $l.min^{-1}$, nedokáže tedy zcela simulovat podmínky chladiva skutečných reaktorů. Pro některé druhy experimentů však toto zařízení postačuje a navíc je provoz vysokoteplotní pece oproti provozu vysokoteplotní smyčky daleko méně nákladný a náročný na obsluhu. V korozním působení plynného média při zkušebním provozu HTHL v porovnání s testy v HTF při srovnatelné teplotě a složení plynné atmosféry však byly v některých případech zjištěny rozdíly. Jako příklad lze uvést korozní chování slitiny 800 H při teplotách do 760 °C – viz SEM snímky povrchů vzorků po 500 hod. na obr. 13.



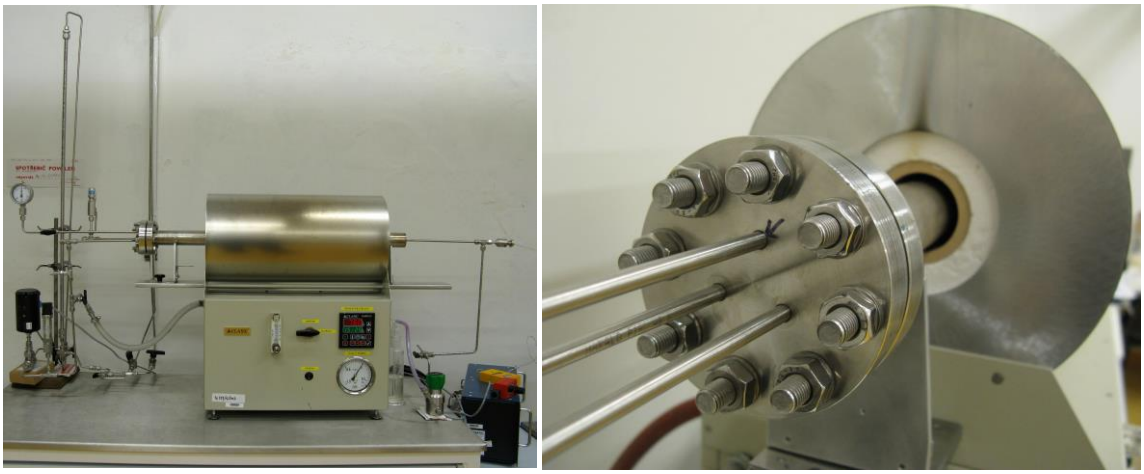
a b

Obr. 13 SEM snímek povrchu vzorků slitiny 800 H (rozhraní tepelně ovlivněné zóny a svaru) po 500 h. expozice při teplotě do 760 °C: a – v HTHL, b- v HTF

Během roku 2013 bylo celé zařízení HTF inovováno, plynové trasy byly přestavěny, v HTF byla zkušebně umístěna specielní inconelová retorta (vnitřní průměr 36 mm), která umožní testy při vyšších tlacích plynné atmosféry (až 1 MPa). Zařízení v novém uspořádání je na obr. 14. Retorta byla vyrobena v rámci projektu TAČR-CANUT [32, 33]. První test vzorků slitiny 800 H v nové retortě (760 °C/1500 hod.) je plánován v 1. pololetí r. 2014, při tomto testů budou ověřeny i vlastnosti retorty samotné. Zařízení HTF může sloužit i pro provádění korozních testů v plynné atmosféře s odlišným složením, než je charakteristické pro V/HTR nebo GFR chladivo. Např. je možné provádět korozní testy v simulovaných podmínkách spalin nebo jiných plynných médií.

3.2.2 Pracoviště a zařízení pro hodnocení exponovaných vzorků materiálů

Pro výzkum materiálů jsou nezbytná pracoviště vybavená zařízeními pro hodnocení metalografie, mikrostruktury, korozních vrstev a mechanických vlastností vzorků exponovaných ve vysokoteplotních zařízeních. Mezi tato zařízení patří např. elektronové mikroskopy (SEM, TEM), rentgenová spektroskopie, GD-OES [34] nebo přístroje pro provádění tahových testů. Pracoviště vybavená zmíněnými přístroji se nacházejí na celé řadě pracovišť, např. na vysokých školách (ČVUT Praha, VŠCHT Praha, VUT Brno a dalších) nebo Akademii věd ČR, pro hodnocení radioaktivních vzorků je vybaveno pouze pracoviště v ÚJV Řež a.s., výhledově takové pracoviště vznikne v rámci projektu SUSEN [24] i v Centru Výzkumu Řež s.r.o.



a b

Obr. 14 a: Nové uspořádání vysokoteplotní pece **b**: detail vysokoteplotní inconelové retorty

3.2.3 Zařízení pro výzkum chemie plynného chladiva

Pro výzkum chemie chladiva plynem chlazených reaktorů jsou potřeba, mimo jiné, přesné přístroje pro analytiku plynných směsí. Pracoviště zaměřené na analytiku, čištění a kontrolu čistoty plynných směsí lze nalézt např. na Ústavu plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší (ÚPKOO) a v Centrálních laboratořích VŠCHT Praha. Tato pracoviště spolupracovala s ÚJV Řež a.s. a Centrem Výzkumu Řež s.r.o. např. na návrhu čistícího okruhu pro smyčku HTHL, aplikaci specielních analytických metod pro kontrolu čistoty plynného média, speciální přístrojové vybavení VŠCHT Praha bylo také využito pro detekci organického znečištění plynu v první etapě zkušebního provozu HTHL a při testování adsorbentů pro čisticí okruh HTHL [35, 36] (obr. 15). Důležitými přístroji pro experimenty ÚPKOO VŠCHT Praha jsou plynové chromatografy, zejména plynový chromatograf s heliově-ionizačním detektorem (GC-HID) a infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR).

Obr. 15 Aparatura pro testování adsopčních postupů čištění helia s analyzátorem FTIR na VŠCHT Praha

Zvláštní pozornost z pracovišť VŠCHT Praha zabývajících se (mimo jiné) problematikou chemie chladiva energetických systémů chlazených plynem si zaslouží Laboratoř hmotnostní spektrometrie (LHS), která je jedním z osmi subjektů Centrálních laboratoří VŠCHT Praha (CL VŠCHT). LHS je vybavena špičkovou instrumentální technikou. Ve spektru přístrojového vybavení se nachází 5 hmotnostních spektrometrů ve spojení s různými separačními technikami anebo vybavené i možností přímého vnosu vzorku do analyzátoru. Tato škála přístrojů umožňuje analyzovat prakticky všechny typy vzorků organických sloučenin.

LHS disponuje dvoufokusačním sektorovým přístrojem Autospec Ultima, který umožňuje získat hmotnostní spektra těkavých anebo méně těkavých avšak termostabilních OS, dále dvěma tandemy plynový chromatograf – hmotnostní spektrometr s jednoduchým kvadrupólem a konečně dvěma přístroji pro spojení kapalinový chromatograf – hmotnostní spektrometr (LC-MS). Prvním z nich je trojitý kvadrupólový analyzátor, unikátním zařízením v LHS je ovšem vysokorozlišující LTQ Orbitrap Velos (obr. 16), pocházející z dílny vynálezce Alexandra Makarova. Oba LC-MS přístroje byly pořízeny na základě grantu pro Pražské vysokoškolské analytické centrum (PVAC), který VŠCHT získala. Vysoká citlivost a přesnost uvedených přístrojových sestav v LHS je ideální pro výzkum chladiva plynem chlazených reaktorů, zejména pak pro zjišťování stopových nečistot či reakčních produktů ve velmi malém množství se nacházejících příměsí v chladivu.

Obr 16 Vysokorozlišující LTQ Orbitrap Velos

Vedle přímých měření hmotnostních spekter disponuje LHS rovněž nemalými zkušenostmi s přípravou a úpravou různých druhů vzorků a matricí. Zcela unikátní je potom napojení trubičkového a kanystrového systému pro analytiku ovzduší a obecně všech plynných vzorků (obr. 17), kde v levé části je zachycen kanystrový karuselový autosampler, v pravé části systém trubičkový (oba systémy jsou chlazeny kapalným dusíkem, Dewarova nádoba je zčásti rovněž na obrázku rozpoznatelná).

Obr 17 Trubičkový a kanystrový systém s GC-MS pro analytiku plynných vzorků

V poslední době byl rovněž pořízen pro účely analytiky ovzduší a plynných vzorků systém Gerstel. Zejména kanystrový systém má velký potenciál pro využití při zkoumání plynných vzorků z různých částí vysokoteplotních plynových systémů, využit byl i pro analytiku vzorků plynného média odebraných při zkušebním provozu HTHL.

3.2.4 Další plánovaná klíčová zařízení

V rámci již zmíněného projektu SUSEN [24] je počítáno s výstavbou další rozsáhlé infrastruktury. Plánována je, mimo jiné, výstavba dalších dvou héliových experimentálních smyček. První z nich by měla sloužit k testování vzorků materiálů v reaktoru LVR-15 v Řeži. Konstrukce bude podobná smyčce HTHL (viz. kapitola 3.1), při konstrukci zařízení budou využity zkušenosti z provozu HTHL.

Druhá heliová smyčka by měla sloužit k ověření systémového chování reaktorů GFR při odvodu zbytkového tepla (zejména při nestandardních provozních situacích), dále pro validaci kódů vysokoteplotního helia. Postavena by měla být v Plzni.

V rámci projektu SUSEN se počítá i s pořízením celé řady zařízení pro testování a hodnocení vlastností materiálů.

4. Projekty zaměřené na výzkum plynem chlazených reaktorů a souvisejících aplikací

Výše popsaná zařízení jsou využívána při řešení projektů zaměřených na výzkum a vývoj pokročilých plynem chlazených reaktorů, kterých se instituce v ČR účastní. Většinou jsou tyto projekty podporovány z veřejných prostředků prostřednictvím Evropské komise, případně některé tuzemské instituce (MPO, TaČr, atd.) Z již ukončených projektů zaměřených na plynem chlazené reaktory lze jmenovat např. projekt 6. rámcového programu EU RAPHAEL (Reactor for Process Heat, Hydrogen and Electricity Generation) a MTR+I3 (Integrated Infrastructure Initiatives for Materiál Testing Reaktor Inovations) [37], kterých se za Českou republiku zúčastnilo ÚJV Řež a.s. Významný byl i projekt podporovaný MPO v rámci programu TIP „Vysokoteplotní plynové systémy“ (2A-1TP1/100) [38] řešený ÚJV Řež a.s. ve spolupráci s VŠCHT Praha v letech 2006 – 2010. V rámci tohoto projektu byly získány a experimentálně ověřeny zkušenosti o korozní odolnosti a změnách vlastností austenitických a feriticko-martenzitických ocelí (316S a P91) v plynné atmosféře simulující chladivo VHTR reaktorů při teplotách do 750 °C [39], dále byly navrženy a zkonstruovány některé komponenty smyčky HTHL, byly ověřeny některé postupy čištění helia pomocí adsorpce (obr. 23) a vyvinuty a ověřeny analytické metody pro monitorování plynných nečistot v heliu [36].

V současné době je v rámci České republiky Centrum výzkumu Řež s.r.o. (CV Řež) zapojeno do několika mezinárodních projektů 7. rámcového programu. Na materiály, technologie a bezpečnost reaktorů VHTR je zaměřen projekt 7. rámcového programu ARCHER (Advanced High-Temperature Reactors for Cogeneration of Heat and Electricity R&D) [40] s dobou řešení 2011 - 2015. Projektu se účastní celkem 33 organizací (výzkumných institucí, průmyslových podniků, vysokých škol, atd.) z evropských zemí. Úkolem CV Řež v rámci projektu ARCHER je provedení testu korozní odolnosti slitiny 800 H, která je jedním z materiálů uvažovaná pro konstrukci tepelně namáhaných částí reaktorů VHTR [7].

Projektem zaměřeným na výzkum a vývoj reaktoru GFR, kterého se účastní i ČR, je projekt GoFastR (European Gas Cooled Fast Reactor) [33] s dobou řešení 2010 - 2012. Projektu se účastní celkem 24 institucí z evropských zemí, mezi nimi i CV Řež. Úkolem CV Řež v rámci tohoto projektu, je, mimo jiné vypracování návrhu okruhu čištění chladiva a dalších komponent pro prototyp rychlého reaktoru. V Rámci projektu GoFastR byly prezentovány některé poznatky týkající se chemie plynného chladiva získané v rámci zkušebního provozu smyčky HTHL. Dalším projektem zabývajícím se technologiemi pro GFR – Allegro je projekt ALLIANCE zmíněný v úvodu tohoto článku. Projekt je financován v rámci 7. rámcového programu EU, na řešení se podílejí instituce z ČR, Slovenska,

Maďarska, Francie, Německa a Polska. Poměrně významným mezinárodním projektem podporovaným v rámci 7. rámcového programu EU je projekt NC2I-R [41, 42], jehož řešení bylo zahájeno v říjnu r. 2013. Tento projekt je navázán na SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform), do projektu je zapojeno celkem 21 evropských institucí, ČR zastupuje CV Řež s.r.o. Projekt koordinovaný polským NBCJ (Narodowe Centrum Badan Jadrowych) je zaměřen na kogeneraci – tj. kombinaci výroby elektřiny a využití tepla z jaderných energetických výroben pro další účely. Mimo jiné se projekt zaměřuje na problematiku zplyňování uhlí pomocí tepla vyrobeného reaktorem typu HTR nebo jiným jaderným zdrojem; jedná se o návaznost na takto zaměřené německé projekty ze 70. a 80. let 20. století.

Od r. 2013 jsou řešeny dva komplementární projekty podporované TaČr v rámci programu Alfa. Jedná se o projekty TA03010849: „Materiály pro pokročilé jaderné reaktory“ [43] a TA03020850 „Technologie pro pokročilé aplikace v energetice“ [44], oba s plánovaným řešením do r. 2016. V rámci obou projektů spolupracují výzkumné organizace (CV Řež a VŠCHT Praha) s průmyslovými partnery (ESTCOM CZ – oxidová keramika a.s., Prague Casting Services a.s., ÚJV Řež a.s., EVECO s.r.o. a MICo spol. s.r.o.). První projekt je zaměřen na vysokoteplotní kovové a keramické materiály a výzkum jejich odolnosti. Zaměřením druhého projektu jsou technologie čištění a kontroly čistoty plynných médií a vývoj specielních těsnění. Jedním z cílů řešení obou projektů je transfer výsledků do jiných průmyslových oblastí, než jsou jaderné reaktory IV. Generace. Celkový plánovaný rozpočet obou zmíněných projektů TAČR přesahuje 100 mil. Kč (dohromady za oba projekty a celou dobu řešení).

Další projekty zaměřené na GFR, ve kterých se počítá se spoluprací více výzkumných organizací z ČR, jsou připravovány.

5. Závěr

V České republice se nachází poměrně rozsáhlá infrastruktura využitelná pro výzkum pokročilých plynem chlazených reaktorů. Do této infrastruktury patří i unikátní zařízení, jejichž význam pro výzkum VHTR a GFR je celosvětový. Výzkumné instituce z ČR se účastní národních i mezinárodních projektů zaměřených na tuto problematiku, do některých projektů jsou zapojeny i průmyslové podniky. Výstavba další infrastruktury probíhá. V budoucnu by se ČR mohla např. podílet na výstavbě prototypu rychlého plynem chlazeného reaktoru ALLEGRO.

Poděkování

Předložená práce vznikla díky projektům TAČR programu Alfa TA03010849 a TA03020850 a za finančního přispění projektu SUSEN CZ.1.05/2.1.00/03.0108, který je realizován v rámci Evropského fondu regionálního rozvoje (ERDF).

Seznam použitých zkratek

CL VSCHT	Centrální laboratoře VŠCHT Praha
CV Řež	Centrum výzkumu Řež s.r.o.
FID	Plamenový ionizační detektor
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
GaČr	Grantová agentura České Republiky
GC-MS	plynová chromatografie s hmotnostním spektrometrem
GD-OES	Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy
GFR	plynem chlazený rychlý reaktor
HELOKA	Helium Loop Karlsruhe
HID	Heliový ionizační detektor
HTF	Vysokoteplotní pec
HTHL	Vysokoteplotní héliová experimentální smyčka
HTR	Vysokoteplotní reaktor
IAEA	International Atomic Energy Agency
LHS	Laboratoř hmotnostní spektrometrie
LTQ	Linear Trap Quadrupole
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu
PBMR	Pebble-bed modular reactor
PRIS	Power Reactor Information Systém
PVAC	Pražské vysokoškolské analytické centrum
SEM	rastrovací elektronový mikroskop (scanning electron microscope)
TAČR	Technologická agentura České Republiky
TCD	Tepelně-vodvostní detektor
TEM	transmisní elektronový mikroskop
VHTR	Velmi vysokoteplotní reaktor

Literatura

1. A technology roadmap for Generation IV Nuclear Energy System, U.S. DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, 2002, dostupné z http://www.gen-4.org/PDFs/GenIVRoadmap.pdf, staženo 1.2.2014
2. Verfondern V., Barnert H., von Lensa W.: The Production of Nuclear Hydrogen by means of Process Heat from HTGRs Proceedings of ICAPP, Cordoba-Spain 2003
3. Zhang P., Chen S. Z., Wang L. J., Yao T. Y., Xu J. M.: International Journal of Hydrogen Energy 35, 2010, 10166
4. Vitart X., Le Duigou A., Charles P.: Energy Conversion and Management 47, 2006, 2740
5. Bo Y., Wenqiang Z., Jingming X., Jing C.: International journal of hydrogen energy 35, 2010, 2829
6. Neff H. J., Weisbrodt I.: Nuclear Engineering and Design 54, 1979, 157

7. Natesan K., Purohit A., Tam S. W.: report NUREG/CR-6824: Materials Behaviour in HTGR Environments, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, 2003
8. Beck J. M., Pincock L. F.: High Temperature Gas-Cooled Reactors Lessons Learned Applicable to the Next Generation Nuclear Plant, Idaho National Laboratory 2011, dostupné z: http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/4655299.pdf, staženo 1.2.2014
9. Kissane M.P.: Nuclear Engineering and Design 239, 2009, 3076
10. Wu Z. , Lin D., Zhong D.: Nuclear Engineering and Design 218, 2002, 25
11. Ogawa M., Nishihara T.: Nuclear Engineering and Design 233, 2004, 5
12. Hittner D., Bogusch E., Futterer M., de Groot S., Ruer J.: Nuclear Engineering and Design 241, 2011, 3490
13. Xiangwen Z., Zhenming L., Jie Z., Bing L., Yanwen Z., Chunhe T., Yaping T.: Nuclear Engineering and Design 263, 2013, 456
14. Zhang Z., Wu Z., Sun Y., Li F.: Nuclear Engineering and Design 236, 2006, 485
15. http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByType.aspx, staženo 17. 2. 2014
16. Brinkmann G., Pirson J., Ehster S., Dominguez M. T., Mansani L., Coe I., Moormann R., Van der Mheen W.: Nuclear Engineering and Design 236, 2006, 463
17. Stainsby R., Peers K., Mitchell C., Poette C., Mikityuk K., Somers J.: Nuclear Engineering and Design 241, 2011, 3481
18. Cabet C., Terlain A., Girardin G., Kaczorowski D., Blat M., Séran J. L, Dubiez Le Goff V. : Benchmark CEA – AREVA NP – EDF of the Corrosion Facilities for VHTR Proceedings of ICAPP 2007 Nice, France, May 13-18, 2007, Paper 7192
19. Mixed Stream Test Rig (MISTER) Startup Report, Idaho Nationla Laboratoiry, Idaho 2011, dostupné z http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/4886691.pdf, staženo 1. 11. 2012
20. Cappelaere M., Perrot M., Sannier J.: Nucl. Technol. (1984). v. 66(2) p. 465-478
21. Ghidersa B. E. , Ionescu-Bujor M., Janeschitz G.: Fusion Engineering and Design 81, 2006, 1471
22. Experimental Facilities for Gas-cooled Reactor Safety Studies, OECD-NEA No 6864, 2009, dostupné z: http://www.nea.fr/nsd/reports/2009/nea6864-TAREF.pdf, staženo 30. 11. 2013
23. Berka J., Matecha J., Černý M., Víden I., Sus F., Hájek P.: Nuclear Engineering and Design 251, 2012, 203
24. http://susen2020.cz/ staženo 17.2.2014
25. Yao M. S., Wang R. P., Liu Z. Y., He X. D., Li J.: Nuclear Engineering and Design 218, 2002, 163
26. Collins A. C., Gliddon B. J., Phennah P. J.: Component design in high temperature reactors using helium as a coolant. 1972. , Conference on component design in high temperature reactors using helium as a coolant. London, UK. 3 May 1972, 105
27. Dostupné z: www.srigc.com/HIDman.pdf, staženo 20.10.2012
28. Dostupné z: http://www.jontech.nl/hygrophil_fr2.pdf staženo 12. 5. 2010
29. Prokeš O., Tenkrát D.: Stanovení vlhkosti v heliu, technická zpráva 015/08, VŠCHT Praha 2008
30. Berka J., Víden I., Kozmík V.: Chem. Listy 106, 2012, 980
31. Berka J., Rotek A., Vít J.: Paliva 5, 4, 2013, 123
32. http://www.tacr.cz/dokums_raw/centrum_pokrocily ch_jadernych_technologii_canut.pptx staženo 18.2.2014
33. http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=TE01 020455 staženo 18.2.2014
A. Kříž, P. Šmíd: Použití metody GD-OES, dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/Pouziti_metody_GD-OES.pdf staženo 22.10.2010
34. Berka J., Černý M., Tekáč V.: Paliva 2, 2010, 133
35. Matěcha J., Berka J., Sus F., Černý M., Lengyel J., Tekáč V.: Nuclear Engineering and Design 251, 2012, 208
36. Dostupné z: http://www.mtri3.eu/ staženo 20. 10. 2012
37. Dostupné z: http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=2A-1TP1%2F100 staženo 20. 10. 2012
38. Berka J.: Paliva 5, 4, 2013, 136
39. Dostupné z: http://archer-project.eu/ staženo 20. 10. 2012
40. http://www.ncbj.gov.pl/en/node/2790 staženo 19.2.2014
41. http://www.snetp.eu/www/snetp/images/general_assembly/nc2i.pdf staženo 19.2.2014
42. http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=TA03 010849, staženo 18.2.2014
43. http://www.isvav.cz/projectDetail.do?rowId=TA03 020850 staženo 18.2.2014

Summary

Jan Berka[1,2], Ivan Víden[2]
[1]Centrum výzkumu Řež, s.r.o., Husinec-Řež, Hlavní 130, 25068 Řež, jan.berka@cvrez.cz

[2]Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 1905, 16628 Praha 6

Scientific infrastructure for investigation of materials and technologies of advanced gas cooled reactors in CR

Advanced gas cooled reactors is a specification for Very High Temperature Reactor (VHTR) and Gas Cooled Fast Reactor (GFR). This reactor belongs to the group of so called Generation IV (GIV) reactors. These devices have not been built and operated yet, but research program in many countries in the world is aimed to R&D concerned GIV. Czech republic also participate in this R&D program concerning e.g. investigation of stability of candidate structural materials, helium coolant chemistry, design of main components, etc. High temperature helium loop for material testing and coolant chemistry investigation has been built in Rez near Prague, building of another helium loops is planned. Other devices used for this research are situated at universities and other research institutes.