Chemické Listy
Chemický průmysl
www.chemicke-listy.cz

STAV VÝVOJE TECHNOLOGIE PLYNEM CHLAZENÝCH RYCHLÝCH REAKTORŮ V ČESKU A EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Tomáš Melichar

Centrum výzkumu Řež s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež, Česká republika
tomas.melichar@cvrez.cz

Došlo 10.10.25, přijato 12.11.25.

V rámci uskupení V4G4 Centre od Excellence, které má zastoupení i v České republice, je vyvíjen koncept rychlého plynem chlazeného reaktoru typu GFR (Gas-cooled Fast Reactor). Vývoj probíhá v různých technologických oblastech a cílem je dosažení demonstrátoru zvaného ALLEGRO o výkonu 75 MW. V tomto článku je popsán stav vývoje GFR technologie s důrazem na aktivity probíhající v Česku, které zahrnují například technologický vývoj, studie chemických režimů a materiálové kompatibility. Jednou z nejvýznamnějších činností je experimentální provoz zařízení S-Allegro, které je provozované Centrem výzkumu Řež v Plzni. Jedná se o zmenšenou, elektricky vyhřívanou maketu reaktoru ALLEGRO o výkonu 1 MW, umožňující studie termohydraulického chování systému při běžných i havarijních podmínkách. Prezentovány jsou dosavadní experimentální výsledky a zmíněna je i návaznost na další aktivity v oblasti vývoje GFR technologie.

Klíčová slova: pokročilé jaderné reaktory, plynem chlazený rychlý reaktor, GFR, Gas-cooled Fast Reactor, termohydraulické experimenty, chlazení heliem

Úvod

Rychlý plynem chlazený reaktor (GFR, Gas-cooled Fast Reactor) je jedním z konceptů pokročilých reaktorů tzv. Generace IV. Cílem reaktorů Generace IV je zajištění konkurenceschopnosti jaderných energetických reaktorů, vysoká bezpečnost a spolehlivost, zvýšená ochrana proti zneužití, udržitelnost a efektivní nakládání s jaderným palivem včetně možností jeho přepracování a opakovaného využití (cit.[1]). Byť rozvoj a energetické využití takových reaktorů stále není otázkou blízké budoucnosti, jejich případná implementace má stále potenciál významného přispění k dosažení udržitelné a nízkoemisní energetiky. Do skupiny Generace IV patří šest konceptů, lišících se ve svém uspořádání, provozních parametrech, použitých materiálech a médiích a dalších technických a ekonomických parametrech. Článek se dále věnuje konceptu GFR, konkrétně pak stavu vybraných vývojových aktivit, jejichž těžiště je položeno v zemích Visegrádské skupiny s významným přispíváním českých výzkumných organizací. Pozornost je věnována především výzkumu v oblasti bezpečnostních aspektů spojených s efektivním odvodem zbytkového tepla při případných haváriích a nenominálních stavech, k čemuž slouží významná a velkoformátová experimentální infrastruktura provozovaná Centrem výzkumu Řež. Kromě toho je však uveden i širší náhled na technologii z hlediska její aplikovatelnosti a současných směrů vývoje a výzkumu.

Koncept plynem chlazeného rychlého reaktoru

Jedná se o reaktor využívající rychlé spektrum neutronů pro štěpení, tedy bez přítomnosti moderátoru v aktivní zóně. Jako palivo může být použit buď obohacený uran, nebo přepracované palivo složené z oxidu uraničitého a plutoničitého, tzv. MOX palivo. Samotné palivo se významně neliší od jiných typů reaktorů, a to jak svým složením, tak ani geometricky, kdy se předpokládá použití slisovaných pelet vertikálně umístěných v matricích palivových proutků. Koncept GFR umožňuje velmi kompaktní uspořádání aktivní zóny a relativně vysoké výkonové hustoty. Důležitým specifikem konceptu GFR, které vyžaduje zvýšenou pozornost v oblasti výzkumu a vývoje, je však právě materiál pokrytí palivových pelet. Pokrytí tvoří kromě samotné struktury paliva první ochrannou bariéru a musí být rezistentní nejen k již velmi vysokým teplotám při běžném provozu, ale odolnost musí být prokázána při ještě extrémnějších podmínkách odpovídajícím potenciálním haváriím. Jako vhodný kandidát pro vysokoteplotní pokrytí je karbid křemíku v kompozitním provedení SiC/SiC vláken v matrici, a to zejména z hlediska termomechanických a neutronově-fyzikálních vlastností. Avšak výrobní postupy je třeba dále zdokonalovat tak, aby byla právě zajištěna a spolehlivě prokázána strukturální pevnost v různých režimech provozu. Druhý vysokoteplotní koncept reaktorů Generace IV, rovněž heliem chlazený reaktor typu HTGR (High-Temperature Gas-cooled

Reactor), tuto problematiku řeší obalením paliva do grafitových kuliček, následně slisovaných do pevných struktur. Grafit zde plní roli moderátoru, jelikož palivo je zde štěpeno neutrony v tepelném spektru. Tento princip byl již v praxi ověřen, například u japonského experimentálního reaktoru HTTR (High-Temperature engineering Test Reactor) (cit.[2]), nebo pilotního energetického reaktoru HTR-PM (High-Temperature gas-cooled Reactor – Pebble bed Module) v Číně spuštěného v roce 2023 (cit.[3]). Avšak určitou nevýhodou proti GFR reaktoru je nutnost udržování chemického režimu chladiva a jeho kontinuálního čištění od uvolňujícího se grafitu. Ostatní reaktory Generace IV jsou provozovány na nižší teplotě a lze tak využít například pokrytí z nerezové oceli. Při nižších teplotách však může být provozován i GFR reaktor, což může být vhodná strategie především pro úvodní fáze provozu, kdy některé technologie charakteristické vysokoteplotní odolností nemusí být na dostatečném stupni vývoje.

Jako chladivo je využito helium, což do velké míry ovlivňuje uspořádání celého systému a přináší řadu výhod i nevýhod. Výhodou je bezesporu inertní charakter plynu, kdy i při vysokých teplotách dochází k nízké degradaci konstrukčních materiálů. Zároveň se jedná o netoxické, nehořlavé a nevýbušné médium. Helium je relativně dostupné a ani jeho rostoucí cena by vzhledem k poměrně malému potřebnému množství neměla znamenat překážku v jeho použití u této aplikace. Mezi plyny má nejvyšší tepelnou vodivost a měrnou tepelnou kapacitu, což je výhodné z pohledu přenosu tepla, avšak negativním faktorem je v tomto ohledu velmi nízká hustota. Proto je třeba systém provozovat za zvýšeného tlaku (7 MPa), kdy je hustota oproti atmosférickému tlaku až 70ti násobná. Vysokotlaký charakter reaktorové nádoby, heliových okruhů a dalších komponent klade zvýšené nároky na konstrukci, volbu materiálů i samotný provoz. Vlivem zvýšeného tlaku v kombinaci s malou molekulou helia je nutné věnovat zvláštní pozornost prevenci úniků helia ze systému prostřednictvím vhodných metod těsnění. Kombinace vysokého tlaku a teploty pak vyžaduje konstrukčně komplikované řešení potrubí i dalších komponent. Dostupné materiály neumožňují dlouhodobý provoz na plných parametrech. Řešením je snížení provozní teploty tlakového rozhraní koaxiálním uspořádáním potrubí. Horké helium vystupující z reaktorové nádoby proudí uvnitř koaxiálního potrubí, zatímco ochlazené helium proudící směrem k reaktoru proudí vně. Vnitřní horké potrubí je tak namáháno pouze teplotou a tlakové zatížení je přeneseno pouze na vnější, chladnější stěnu. Vnitřní potrubí je pak vystaveno vysoké teplotě, ale nízkému tlaku odpovídajícímu pouze tlakové ztrátě okruhu, resp. rozdílu tlaku mezi horkou a studenou větví. Pro zajištění efektivity provozu je však dále potřeba obě větve tepelně izolovat, což rovněž komplikuje konstrukční řešení.

Reaktorová nádoba je uspořádána podobně jako u tlakovodních reaktorů. Studené helium vstupuje v horní části reaktoru do sestupné šachty. Ve spodní části se směr proudění otáčí a helium vstupuje do aktivní zóny, kde proudí zdola nahoru. Po ohřátí v aktivní zóně helium proudí vnitřní větví primárního okruhu do primárního tepelného výměníku. Zde předá teplo sekundárnímu okruhu a vnější větví proudí směrem k sání primárního cirkulátoru, který usměrňuje chladivo zpět do reaktorové nádoby. Sekundární okruh je již koncipován jako energetický konverzní okruh s plynovou turbínou. Důležitým prvkem je tzv. DHR okruh (Decay Heat Removal), který má bezpečnostní funkci a slouží k zajištění pasivního odvodu tepla z aktivní zóny v případě havárie. Jedná se o vertikální koaxiální potrubí připojené k reaktorové nádobě, v horní části opatřené tepelným výměníkem pro odvod tepla. Spolehlivost tohoto systému je rovněž předmětem intenzivního výzkumu a jeho princip bude vysvětlen v dalších částech tohoto článku.

Výhody a aplikace

Koncept GFR je rychlý reaktor a má tedy potenciál provozu v tzv. uzavřeném palivovém cyklu, kdy použité jaderné palivo lze do určité míry přepracovat a opakovaně využít. Tím by mohlo dojít k zajištění udržitelnosti z hlediska omezení nutnosti dlouhodobého ukládání vyhořelého paliva např. v hlubinných úložištích a zároveň k úspoře primárního zdroje ve formě přírodního uranu. Dalším specifikem je vysoká provozní teplota chladiva, kdy helium na výstupu z aktivní zóny v cílené konfiguraci dosahuje až 850 °C. Současně provozované jaderné reaktory jsou využívány k produkci elektrické energie a ve velmi omezené míře pro vytápění. Vysokoteplotní reaktory mají výrazně širší možnosti uplatnění, neboť poskytují teplo s vysokým energetickým potenciálem vhodné pro přímé využití v průmyslových procesech. V chemickém průmyslu se jedná například o výrobu ethylenu, styrenu, titanové běloby nebo kyseliny sírové. Mimo chemický průmysl má vysokopotenciální teplo využití například při výrobě cementu, v metalurgii, sklářském nebo i papírenském průmyslu. Uvedené provozy jsou ze své podstaty energeticky náročné a vítají jakoukoliv iniciativu vedoucí k úsporám energie. Řada z uvedených provozů má strategický význam a lze předpokládat, že v České republice zůstanou v nějaké míře zachovány i do budoucna.

Další aplikací je možnost výroby vodíku jakožto nositele energie prostřednictvím vysokoteplotní elektrolýzy nebo termochemickým způsobem. Samozřejmě je možný provoz primárně pro produkci elektrické energie. V tomto případě lze díky vysokým teplotám v případě volby vhodného uspořádání konverzního oběhu dosáhnout výrazně vyšší účinnosti přeměny tepelné energie na elektrickou, než tomu je například u tlakovodních reaktorů. Zajímavá je pak možnost provozu v hybridním režimu, kdy by došlo ke kombinaci více zmíněných aplikací. Zapojením různých typů akumulace energie může být dosaženo flexibility zdroje, čímž může být dle aktuální potřeby energetiky nebo průmyslu řízen výkon a typ výstupních energií při držení konstantního výkonu reaktoru. Tím je zajištěna maximalizace životnosti komponent primárního okruhu a optimalizace vyhoření paliva.

Vhodným principem akumulace energie ve spojení s GFR reaktorem je střednědobé ukládání energie ve formě tepla, kdy vysokoteplotní akumulační jednotku lze zapojit například mezi primární a sekundární okruh, a tím umožnit proměnný průtok média sekundárního okruhu a tedy i výstupního výkonu při konstantním průtoku okruhem primárním. Vhodným akumulačním médiem je například roztavená dusičnanová sůl nebo materiál v pevném skupenství kompatibilní s provozním teplotním rozsahem technologických okruhů. Tepelnou akumulaci je možné kombinovat s dalšími principy, například s elektrochemickými bateriemi pro krátké nabíjecí a vybíjecí cykly nebo s chemickým principem reprezentovaným vysokoteplotní elektrolýzou a produkcí vodíku nebo jiného nositele energie s možností dlouhodobé akumulace. Vhodnou kombinací akumulačních a konverzních technologií lze GFR reaktor provozovat flexibilně v různých podmínkách a aplikacích.

Výzkum a vývoj technologie plynem chlazeného rychlého reaktoru

Vývoj konceptu GFR v Evropě je soustředěn a koordinován v rámci konsorcia V4G4 Centre of Excellence zahrnujícího výzkumné organizace z Česka, Maďarska, Polska a Slovenska. Česko v konsorciu zastupuje ÚJV Řež a Centrum výzkumu Řež. Obě organizace hrají ve vývoji GFR technologie významnou roli. Do vývoje je však zapojeno mnoho dalších organizací a zemí v rámci projektů podpořených Evropskou komisí. I v Česku je téma vývoje vysokoteplotních heliových reaktorů v posledních dekádách hojně zastoupeno národními výzkumnými projekty s účastí řady výzkumných organizací, univerzit a průmyslu. V oblasti GFR je společným cílem vývoj demonstračního reaktoru ALLEGRO, který by měl mít tepelný výkon 75 MW a měl by demonstrovat provozuschopnost, spolehlivost a bezpečnost konceptu a validovat klíčové komponenty včetně inovativního paliva a materiálů[4]. Výzkumné a vývojové činnosti probíhají paralelně v několika oblastech zahrnujících návrh a optimalizaci aktivní zóny včetně paliva a palivového cyklu, výzkum a testování materiálů, termohydraulické analýzy s důrazem na studie spolehlivého odvodu tepla při normálních i havarijních podmínkách, inženýrské návrhy komponent, bezpečnost včetně proliferace jaderného materiálu a v neposlední řadě je důraz kladen na vzdělávání a předávání zkušeností mezi generacemi. Aktuálně řešeným projektem na evropské úrovni je projekt TREASURE, který zahrnuje velkou část zmíněných aktivit řešených v konsorciu významných partnerů. Kromě úzkého týmu V4G4 CoE například také University of Cambridge, Framatome zapojený do optimalizace paliva nebo český Státní úřad pro jadernou bezpečnost, jehož rolí je předběžné posouzení technologie z hlediska bezpečnosti na základě výsledků získaných při řešení projektu[5]. Kromě Evropy je výzkum GFR technologie relativně omezený. Koncept je rozvíjen pouze v USA, především společností General Atomics vyvíjející rychlý modulární reaktor typu GFR (cit.[6]).

Z hlediska jednotlivých výzkumných aktivit v Česku je v oblasti vývoje GFR technologie věnována pozornost především návrhu komponent zahrnujících tepelné výměníky, bezpečnostní prvky včetně například tzv. lapače koria, ale i tlakové ochranné obálky reaktoru nebo těsnicích elementů. Rozsáhlé aktivity jsou zaměřeny na materiálový výzkum jako jednu z klíčových potřeb před případnou implementací technologie. České výzkumné organizace disponují zařízeními umožňujícími simulování podmínek odpovídajících prostředí vysokoteplotních reaktorů a lze tak provádět testování konstrukčních materiálů, ale například i SiC/SiC materiálů. ÚJV Řež položil základy vlastnímu národnímu konceptu GFR reaktoru s názvem HeFASTo (cit.[7]). V tomto případě se jedná o potenciální návazný projekt k reaktoru ALLEGRO, který již bude mít plně energetické využití s tepelným výkonem 200 MW a maximální teplotou helia 900 °C (cit.[8]). Ačkoliv se jedná o dlouhodobou výzkumnou činnost, již nyní je registrován zájem o technologii z řad chemického průmyslu a energetiky a aktivně probíhají studie uplatnitelnosti.

České výzkumné organizace jsou silně orientované na experimentální činnost a disponují infrastrukturou, která je zásadní nejen ve skupině V4G4 Centre of Excellence, ale má prakticky i celosvětový dopad v oblasti výzkumu GFR. Největší a nejunikátnější infrastrukturou je zařízení S-Allegro, které je klíčovým elementem pro výzkum termohydraulické bezpečnosti, ověření fyzikálních principů spojených s přestupem tepla ve vysokoteplotních heliových reaktorech a testování komponent. Zařízení je využíváno primárně v rámci rozvoje demonstračního rektoru ALLEGRO, nicméně je plně využitelné i pro jakékoliv jiné návrhy GFR technologie.

Zařízení S-Allegro

S-Allegro je velké experimentální zařízení určené k termohydraulickému výzkumu vysokoteplotních heliových reaktorů. Zařízení provozuje Centrum výzkumu Řež v Plzni. Jedná se o neaktivní, elektricky vytápěnou maketu GFR reaktoru v konfiguraci a provozních parametrech odpovídajících vyvíjenému demonstrátoru ALLEGRO, která je z hlediska tepelného výkonu škálována v měřítku 1:75. To odpovídá maximálnímu výkonu topné sekce 1 MW. Cílem zařízení jsou studie termohydraulického chování reaktorového systému při nominálních, nenominálních i havarijních stavech. Umožněny jsou studie základních fyzikálních jevů spojených s přenosem tepla a prouděním chladiva, ale i simulace velmi komplexních systémových stavů zahrnujících vážné havárie a zapojení systémů pro zmírnění jejich následků.

Zařízení S-Allegro umístěné v experimentální hale Centra výzkumu řež v Plzni je uvedeno na obr. 1.

Jádrem zařízení je reaktorová nádoba opatřená topnou sekcí s elektrickým odporovým topením, které simuluje aktivní zónu reaktoru. K reaktorové nádobě je připojen primární okruh s hlavním cirkulátorem zajišťujícím nucenou konvekci helia jako primárního chladiva. Okruh je

Obr. 1. **Zařízení S-Allegro**

provozován na maximálním tlaku 7 MPa, teplotě 850 °C a průtoku 0,5 kg s^{-1}. Teplo z primárního okruhu je předáváno do okruhu sekundárního, jehož pracovní médium je rovněž helium o podobných maximálních parametrech. Ze sekundárního výměníku je teplo předáváno do vodního terciálního okruhu. Díky tomuto uspořádání lze studovat součinnost jednotlivých okruhů při různých provozních stavech.

S primárním okruhem je hydraulicky propojen okruh pro odvod zbytkového tepla, tzv. DHR okruh (Decay Heat Removal), rovněž připojený k reaktorové nádobě. Tento okruh je hlavním pasivním bezpečnostním prvkem GFR reaktoru a umožňuje odvod zbytkového tepla při havarijních stavech spojených s výpadkem napájení prostřednictvím přirozené cirkulace helia. V případě takové havárie dojde k výpadku cirkulátoru zajišťujícího průtok helia aktivní zónou a je nutné reaktor odstavit. I po odstavení však vzniká zbytkové teplo, které je třeba efektivně odvádět tak, aby nedošlo v krajním případě až k roztavení jaderného paliva. Vertikální okruh pro odvod zbytkového tepla umožní ustavení přirozené cirkulace na základě rozdílu teplot, potažmo hustot helia mezi reaktorovou nádobou a tepelným výměníkem umístěným v horní části okruhu. Jedná se o relativně složitý jev, který je ovlivněn mnoha parametry a jeho modelování pomocí výpočetních nástrojů je komplikované. Proto je nutná dostupnost experimentálních dat, pomocí kterých je možné validovat teoretické předpoklady a výpočetní nástroje a přispět tak k výzkumu jaderné bezpečnosti GFR reaktorů.

S-Allegro dále umožňuje simulování nestandardních provozních podmínek celého systému. K dispozici je systém umožňující simulaci havárie spojené s únikem chladiva, ztrátou průtoku chladiva nebo výpadkem či poruchou komponent. Sledována je pak reakce systému při definovaném havarijním režimu. Systémem pro zmírnění následků havárie zahrnuje například havarijní vstřikování těžšího plynu (dusíku), čímž lze intenzifikovat odvod tepla při ztrátě chladiva.

Jedním z hlavních přínosů experimentálního provozu je tak produkce dat pro hodnocení spolehlivosti výpočetních nástrojů, které jsou dále využívány pro návrh již reálných jaderných reaktorových systémů. Na základě dat jsou výpočetní nástroje hodnoceny, validovány a případně vylepšovány. Další důležitou funkcí je testování komponent při relevantních provozních podmínkách. Vzhledem k paralelnímu vývoji v oblasti materiálů nebo výrobních technologií se v některých případech přistupuje k inovativním řešením, která je však třeba testovat a kvalifikovat, což zařízení v rámci provozních parametrů rovněž umožňuje.

Zařízení S-Allegro bylo realizováno v rámci projektu SUSEN – Udržitelná energetika. Projekt byl řešen ve dvou fázích v letech 2011–2017 a financován s podporou Evropské unie a vlády České republiky z operačních programů „Výzkum a vývoj pro inovace“ a „Výzkum, vývoj a vzdělávání“ řízených Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy. Cílem bylo posílení výzkumné infrastruktury v energetice[9]. Před zahájením projektu byly identifikovány výzkumné potřeby vybraných jaderných energetických směrů a jednou z nich byla právě potřeba integrálního velkoformátového zařízení pro podporu vývoje GFR technologie. Zařízení bylo dodáno společností ATEKO a předáno bylo v roce 2017. Vzhledem ke komplexní povaze a extrémním provozním parametrům bylo dalších několik let věnováno provozní optimalizaci a drobným úpravám jednotlivých částí tak, aby bylo možné efektivně a bezpečně realizovat experimenty identifikované jako klíčové pro rozvoj GFR technologie. Od roku 2021 pak probíhá plnohodnotný provoz, který prozatím gradoval provedením komplexních experimentů spojených se simulací havarijních stavů v roce 2024 v rámci evropského projektu SafeG (cit.[10]).

Výsledky experimentálního výzkumu

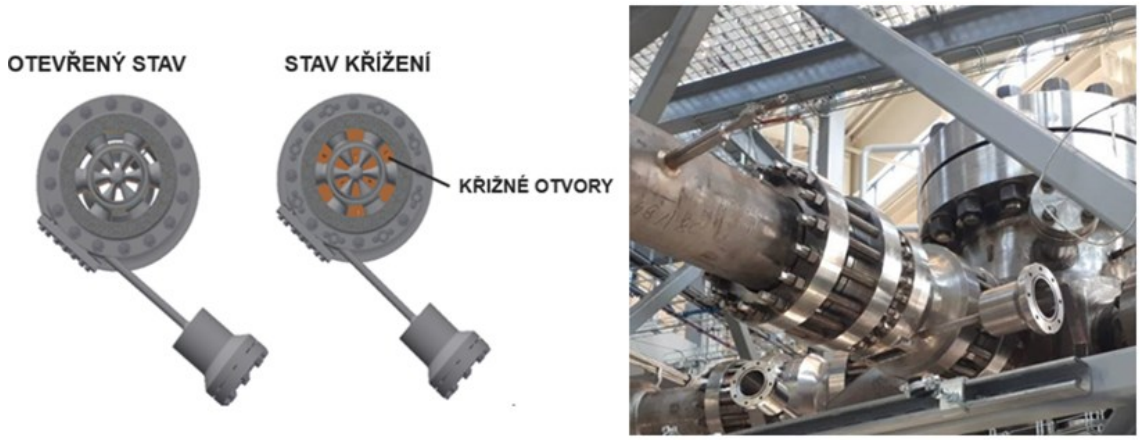
S-Allegro je od roku 2019 využíváno v rámci několika národních a evropských projektů. Postupně je plněna experimentální matice definovaná konsorciem V4G4 Centre of Excellence a dochází ke zkvalitňování dat postupným vylepšováním a odstraňováním výzkumných nejistot. Jak již bylo zmíněno, první provoz byl spojen převážně s optimalizací funkčnosti součástí a řídicího systému a získáváním provozních zkušeností operátorů. Byly provedeny i úpravy některých komponent a optimalizovány provozní postupy. Jedny z prvních experimentů byly realizovány v rámci projektu podpořeného Technologickou

agenturou ČR s názvem „*TK01030116 – Návrh konceptu bezpečnostně důležitých prvků rychlého heliem chlazeného demonstračního reaktoru ALLEGRO*“. Jednou z aktivit projektu byla optimalizace komponenty zvané křížový ventil. Jedná se o součást, která během nominálního provozu umožňuje přesměrování toku v koaxiálním potrubí, čímž se zajistí minimální průtok i okruhem pro odvod zbytkového tepla. V případě havárie spojené s výpadkem napájení se křížový ventil přestaví do otevřené polohy a díky tomu, že je v tomto okruhu již ustaven malý průtok helia, dojde v něm k rychlejšímu nástupu přirozené cirkulace a efektivnějšímu odvodu zbytkového tepla[11]. Křížový ventil byl vyvinut a patentován Centrem výzkumu Řež a v rámci zmíněného projektu byl otestován přímo na zařízení S-Allegro a následně byla optimalizována jeho konstrukce. Jedná se o relativně komplikovanou komponentu, která musí odolat vysokým tlakům a teplotám a zároveň musí být kompatibilní s koaxiálním charakterem potrubí. Aby byla dostatečně kompenzována vysoká termomechanická napětí, všechny potrubní trasy vysokoteplotních heliových reaktorů jsou řešeny koaxiálně. Křížový ventil, stejně tak jako celé zařízení, byl následně využíván v rámci navazujících experimentů. Model křížového ventilu v otevřeném stavu, v křížícím stavu a jeho instalace mezi reaktorovou nádobou a okruhem pro odvod zbytkového tepla je zobrazen na obr. 2.

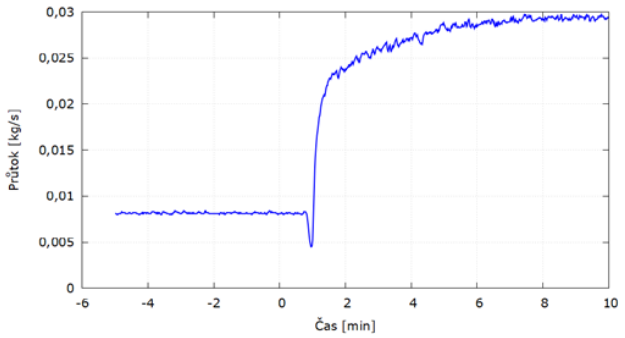
Komplexní experimenty byly provedeny v rámci evropského projektu SafeG. V první fázi byla ověřena data pro základní ladění výpočetních kódů a modelů. Především se jednalo o charakteristiky tepelných výměníků, jakožto geometricky nejsložitějších komponent, které ovlivňují chování celého systému. Následoval experiment zaměřený na hodnocení efektivity odvodu tepla přirozenou cirkulací helia při různých tlakových hladinách odpovídajících potenciální havárii se ztrátou chladiva (tzv. LOCA havárie). Čím nižší je tlak helia, tím horší je odvod tepla, roste teplota chladiva, a především teplota topných elementů (v případě reálného reaktoru roste teplota jaderného paliva). Měřeny byly průtoky při různých tlacích a sledován byl průtok způsobený přirozenou cirkulací helia a teplotní pole v reaktorové nádobě a celém okruhu pro odvod zbytkového tepla.

Dalším experimentem byla simulace vzniku a šíření přechodového stavu z nominálního provozu, kdy je v součinnosti primární, sekundární a terciální okruh v ustáleném stavu (což odpovídá běžnému energetickému provozu reaktoru). Následná iniciační událost odpovídá stavu výpadku napájení následovaná výpadkem hlavního cirkulátoru a snížením výkonu topné sekce, resp. reaktoru, na výkon odpovídající zbytkovému teplu. Jedná se o případ s havarijním odstavením reaktoru. Již během nominálního provozu je pomocí křížového ventilu zajištěn mírný průtok chladiva okruhem pro odvod zbytkového tepla. Jak bylo uvedeno výše, tento průtok ale není dostatečný pro uchlazení topných elementů, resp. jaderného paliva, a proto dochází ke změně polohy koaxiálního ventilu na primárním potrubí z otevřeného stavu do zavřeného a současně se otevírá křížový ventil. Tím je umožněn maximální průtok vertikálním okruhem pro odvod zbytkového tepla. Poté dochází k ustavování přirozené cirkulace a k dlouhodobému odvádění zbytkového tepla, jehož výkon pozvolna klesá. Rychlost ustavení dostatečně intenzivní přirozené cirkulace je klíčová pro dochlazení aktivní zóny v prvních vteřinách a minutách havarijního stavu.

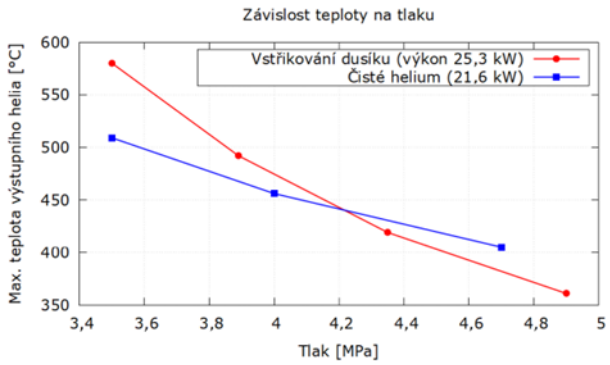
Průběh průtoku helia v okruhu pro odvod zbytkového tepla je znázorněn na obr. 3. První fáze odpovídá nominálnímu provozu, kdy okruhem protéká pouze malá část průtoku přes křížový ventil. V čase 0 s bylo zahájeno spuštění iniciační události, tj. odstavení primárního cirkulátoru, pokles výkonu a přestavení koaxiálních ventilů. Přibližně v čase 1 min je vidět krátký pokles průtoku, což je dáno právě přestavováním pozice ventilů a průtok byl tak krátkodobě omezen. Následně však začne průtok rychle narůstat a relativně brzo se ustálí na vyšší hodnotě. Z experimentu je patrné, že přirozená cirkulace je ustavena v rámci několika minut, což je pozitivní poznatek s ohledem na uchlazení aktivní zóny při havarijních podmínkách.



Obr. 2. **Model křížového ventilu (vlevo) a křížový ventil instalovaný na zařízení S-Allegro**



Obr. 3. **Vývoj průtoku helia při ustavování přirozené cirkulace**



Obr. 4. **Porovnání vlivu vstřikování dusíku a provozu DHR okruhu na čistém heliu**

Následně byly provedeny experimenty s hodnocením vlivu vstřikování dusíku do okruhu pro odvod zbytkového tepla. Možnost vstřikování dusíku je součástí systému pro zmírnění následku těžkých havárií, kdy při ztrátě chladiva a poklesu tlaku je pasivně vtlačen těžší plyn a tím by mělo dojít k intenzifikaci přirozené cirkulace a odvodu tepla. Test byl zahájen při provozu na přirozené cirkulaci na nižší tlakové hladině (3,54 MPa). Po ustálení byl tlak zvýšen vnesením dusíku jako těžšího plynu postupně na 39,2 MPa, 44,1 MPa a 49,5 MPa při konstantním výkonu elektrického topení. Na každé tlakové hladině byly ustáleny hodnoty a byl sledován vliv vnosu dusíku na průtok a teplotní pole. Prokázán byl relativně významný vliv vnosu dusíku na efektivitu odvodu tepla, kdy při celkovém navýšení tlaku přibližně o 1 MPa došlo k poklesu výstupní teploty helia o více než 200 °C oproti provozu s čistým heliem.

Závislost maximální výstupní teploty helia z topné sekce na tlaku je znázorněna na obr. 4. Modrá křivka odpovídá provozu na přirozené cirkulaci čistého helia, červená značí nárůst tlaku vlivem vstřikování dusíku. V obou případech je evidentní pozitivní vliv nárůstu tlaku na odvod tepla, jelikož maximální teplota helia z topné sekce se snižuje. Dále je patrné, že vliv vnosu dusíku má výraznější efekt, než je růst tlaku čistého helia, a lze tak konstatovat, že havarijní vstřikování dusíku má pozitivní dopad na intenzitu chlazení.

Navazující aktivity

Experimentální aktivity s využitím zařízení S-Allegro budou pokračovat s cílem maximálního využití jeho potenciálu. Předpokládá se pokračování v provádění komplexních experimentů spojených se simulováním havarijních podmínek. Dalším experimentem bude simulace havárie se ztrátou chladiva, tzv. LOCA havárie na primárním okruhu, kdy při nominálním provozu dojde k náhlému otevření ventilu simulujícího prasklinu nebo jinou netěsnost okruhu. Tím prudce poklesne tlak a následně je cílem experimentu sledovat a vyhodnocovat reakce systému. Tento experiment bude rovněž možné kombinovat se zapojením systému pro snížení dopadu havárie. Od roku 2025 je pak zařízení S-Allegro součástí projektu koordinovaného Mezinárodní atomovou agenturou. Projektu se účastní 20 institucí z 15 zemí světa. Cílem je modelování zařízení S-Allegro pomocí různých termohydraulických nástrojů a jejich validace na datech získaných z provozu zařízení. Tím by mělo dojít k posílení výpočetních schopností a vylepšení nástrojů v komunitě zabývající se vysokoteplotními, plynem chlazenými reaktory. Kromě experimentů v původní konfiguraci se do budoucna počítá i s rozšířením experimentálních úloh. Jednou z posuzovaných možností je doplnění zařízení o nový okruh s testovací sekcí umožňující hydraulické testování makety paliva. Nominální průtok 0,5 kg s^{-1} přibližně odpovídá průtoku jedním palivovým souborem reaktoru ALLEGRO, nabízí se tak kvalifikační neaktivní testy palivových maket s cílem hodnocení tlakových ztrát a dalších kritických parametrů, jako jsou například vibrace paliva vlivem nerovnoměrného proudění helia. Vzhledem k tomu, že zařízení prakticky simuluje GFR reaktor v malém měřítku, je další zajímavou možností připojení doplňkového systému s potenciálem zvýšení energetické významnosti a studie synergie takového zařízení s reaktorovými heliovými okruhy. Nabízí se například akumulační technologie ve formě tepelných akumulačních zásobníků nebo vysokoteplotního elektrolyzéru.

Paralelně dále pokračují drobnější úpravy a vylepšení systému pro snížení experimentálních nejistot. Doplňována jsou nová čidla, postupně jsou implementovány také nové principy těsnění pro snížení nežádoucích úniků helia. Předpokládá se, že zařízení S-Allegro bude nadále klíčovou infrastrukturou v oblasti vývoje GFR technologie.

Závěr

Článek popisuje stav vývoje technologie rychlého, vysokoteplotního, plynem chlazeného reaktoru ve světě a především v Česku. Těžiště vývoje technologie v Evropě je soustředěno v rámci uskupení V4G4 Centre of Excellence, jehož klíčovými členy jsou české výzkumné organizace. Ačkoliv je reálná energetická aplikace relativně vzdálená, stále se jedná o koncept, který má oproti jiným konceptům reaktorů nezpochybnitelné výhody a širokou škálu aplikovatelnosti. K realizaci prvního energetického

bloku, nebo alespoň jaderného demonstrátoru, musí pokračovat výzkumné a vývojové činnosti v mnoha oblastech zahrnujících například materiálový výzkum, vývoj a kvalifikaci komponent, fyzikální a bezpečnostní analýzy, ale i rozvoj lidských zdrojů. K tomu všemu přispívá provoz zařízení S-Allegro, jemuž je ve článku věnována zvláštní pozornost, stejně tak jako vybraným výsledkům z dosavadního experimentálního provozu. Směřování dalšího vývoje je totiž do jisté míry ovlivněno výsledky experimentů a získanými zkušenostmi z provozu tohoto zařízení.

Prezentované výsledky byly realizovány v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.

Prezentované výsledky byly získány s využitím infrastruktury CICRR, která je finančně podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LM2023041.

LITERATURA

1. The Generation IV International Forum (GIF): Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy System, 2014. https://www.gen-4.org, staženo 8. 11. 2025.
2. Nagatsuka K., Noguchi H., Nagasumi S., Nomoto Y., Shimizu A., Sato H., Nishihara T., Sakaba N.: Nucl. Eng. Des. *425*, 113338 (2024).
3. World Nuclear News: China's demonstration HTR-PM enters commercial operation, https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-HTR-PM-Demo-begins-commercial-operation, 2023, staženo 5. 10. 2025.
4. V4G4 Centre of Excellence, ALLEGRO Reactor, https://allegroreactor.cz/, staženo 5. 10. 2025.
5. Projekt TREASURE, https://www.projecttreasure.eu/project/about/, staženo 5. 10. 2025.
6. Darrin L., Hangbok C., John B., Alexander D., Oscar G.: *Fast Modular Reactor Nuclear Design Parameters of Fuel Cycle and Power Distributions*, 2022, doi: 10.13182/PHYSOR22-37765.
7. Vácha P.: Jaderná energie *5*, 14 (2024).
8. ÚJV Řež, a.s., HeFASTo Small Modular GFR Reactor, https://www.hefasto.eu/, staženo 5. 10. 2025.
9. Kvizda B., Bebjak S., Mayer G., Vácha P., Melichar T., Ding C.: EPJ Nuclear Sci. Technol. *11*, 25 (2025).
10. Melichar T., Frýbort O., Hájek P., Šefl J., Dočkal K., Radomír F.: Jaderná energie, Speciální číslo/2020, *1* [66], 75 (2020). https://jadernaenergie.online/archiv/special-2020/, staženo 18. 11. 2025.

T. Melichar *(Research Centre Řež, Husinec-Řež, Czech Republic):* **Status of GFR Fast Reactor Technology Development in the Czech Republic and the Experimental Program**

As part of the V4G4 Centre of Excellence, which also has its representation in the Czech Republic, the concept of a gas-cooled fast reactor (GFR) is being developed. The development includes various technological areas in order to achieve a 75 MW demonstrator known as ALLEGRO. This article describes the current state of GFR technology development, with an emphasis on activities taking place in the Czech Republic, including technological advancements, studies of chemical regimes, and material compatibility. One of the most significant activities is the experimental operation of the S-Allegro facility, operated by the Research Centre Řež in the city of Plzeň. It is a scaled-down, electrically heated mock-up of the ALLEGRO reactor with a power output of 1 MW, enabling studies of the system's thermo-hydraulic behavior under both normal and accidental conditions. The article presents the experimental results achieved so far and outlines the connection to further activities in the development of GFR technology.

Keywords: advanced nuclear reactors, gas-cooled fast reactor, GFR, thermal-hydraulic experiments, helium cooling

Acknowledgements

The presented results were obtained using the CICRR infrastructure, which is financially supported by the Ministry of Education, Youth and Sports – project LM2023041.

The presented work has been realized within Institutional Support by Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic.

Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.