

STAV VÝVOJE TEPELNÝCH sCO₂ OBĚHŮ

STATE OF DEVELOPMENT OF THERMAL sCO₂ CYCLES

Otakar Frýbort, Tomáš Melichar a Petr Hájek

Centrum výzkumu Řež s.r.o., Husinec – Řež, Hlavní 130, 250 68 Řež

Abstrakt

Vývoji tepelných oběhů se suprekritickým oxidem uhličitým (sCO₂ oběhy) jako pracovním médiem byla věnována zvýšená pozornost již v sedmdesátých letech minulého století. Zejména z důvodu nedostatečné úrovně dostupných materiálů a technologií bylo od dalšího vývoje na několik desítek let upuštěno. V současné době zažívají sCO₂ oběhy renesanci a v posledních deseti letech je jejich rozvoji věnována stále větší pozornost. Příspěvek shrnuje hlavní rysy, výhody a nevýhody tepelných sCO₂ oběhů. Dále uvádí přehled aktuálního vývoje sCO₂ oběhů ve světě i v České republice a přehled nejvýznamnějších experimentálních zařízení a demonstračních jednotek, které byly v poslední době realizovány, nebo jsou ve výstavbě. Také je zde uvedena informace o aktuálně řešených projektech a o aktuálně vyvíjené jednotce na testování sCO₂ turbín a kompresorů do maximálního výkonu 1,5 MW.

Abstract

Increased attention was given to the development of thermal cycles with supercritical carbon dioxide (sCO₂ cycles) as a working medium already in the 1970s. Mainly due to the insufficient level of available materials and technologies, further development was abandoned for several decades. Currently, sCO₂ cycles are experiencing a renaissance and in the last ten years more and more attention has been paid to their development. The paper summarizes the main features, advantages and disadvantages of thermal sCO₂ cycles. It also provides an overview of the current development of sCO₂ circuits in the world and in the Czech Republic and an overview of the most important experimental facilities and demonstration units that have recently been implemented or are currently under construction. Also information on currently solved projects and on the currently developed unit for testing sCO₂ turbines and compressors up to a maximum output of 1.5 MW is included.

Úvod

Parní oběhy se pro výrobu elektrické energie používají již více než sto let, první parní turbíny jsou potom datovány ještě mnohem dříve. Ruku v ruce s vývojem materiálů docházelo postupně k nárůstu maximálního tlaku a teploty v parních obězích za účelem zvyšování účinnosti oběhu. Účinnost většiny uhelných elektráren ještě v devadesátých letech jen lehce převyšovala 30 %. Dnešní moderní uhelné bloky dosahují účinnosti přes 40 % a ambiciózní studie ultrakritických bloků ukazují na možnost dosažení účinnosti přes 50 %. To však přináší značné technologické problémy. V současné době jsou intenzivně vyvíjeny tepelné oběhy, kde je voda, potažmo pára v oběhu nahrazena oxidem uhličitým. Podle parametrů CO₂ v oběhu je pak možné tyto oběhy dělit na podkritické, transkritické či superkritické. Zejména superkritickému oběhu je v současnosti věnována největší pozornost. Důvodem je zejména fakt, že tyto oběhy slibují srovnatelnou, nebo i vyšší účinnost zejména v oblasti vysokých teplot nad 550°C. To by ještě samo o sobě nebylo důvodem pro tak intenzivní vývoj nového oběhu, pokud by zároveň nesliboval řádově menší rozměry turbostrojů a s tím související výrazně snížené investiční náklady. Pro úplnost je možné zmínit, že pro provoz sCO₂ oběhu není v krajním případě nezbytné použít ani kapku vody, což může být v některých lokalitách hlavním důvodem pro uplatnění této technologie.

Historický vývoj CO₂ oběhů

První publikace zabývající se uplatněním CO₂ jako média pro pracovní oběh se začaly vyskytovat na přelomu sedmdesátých a osmdesátých let minulého století, například [1], [2]. Jednou z nejvýznamnějších, často citovaných publikací, je disertační práce V. Dostála „A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors“ [3]. Práce začaly poukazovat nejen na výhody použití CO₂, ale také na související problémy a nejednoduchost návrhu takových systémů. Stěžejní problémy byly a stále jsou například v přestupu tepla, absenci korozních dat konstrukčních materiálů, ale také ve vývoji komponent jako suché plynové ucpávky a podobně. Následně se začaly celosvětově objevovat první experimentální zařízení, které se snaží zmíněné problémy objasnit a vyřešit. Od roku 2007 jsou pravidelně ve Spojených státech amerických pořádány konference zaměřené pouze na tematiku sCO₂ oběhů. Tyto konference jsou pořádány s dvouletou periodou a těší se stále většímu zájmu. Obdobně je pořádáno evropské sCO₂ symposium od roku 2016. V roce 2021 se bude v Praze konat čtvrtý ročník tohoto symposia [4].

Experimentální zařízení sCO₂

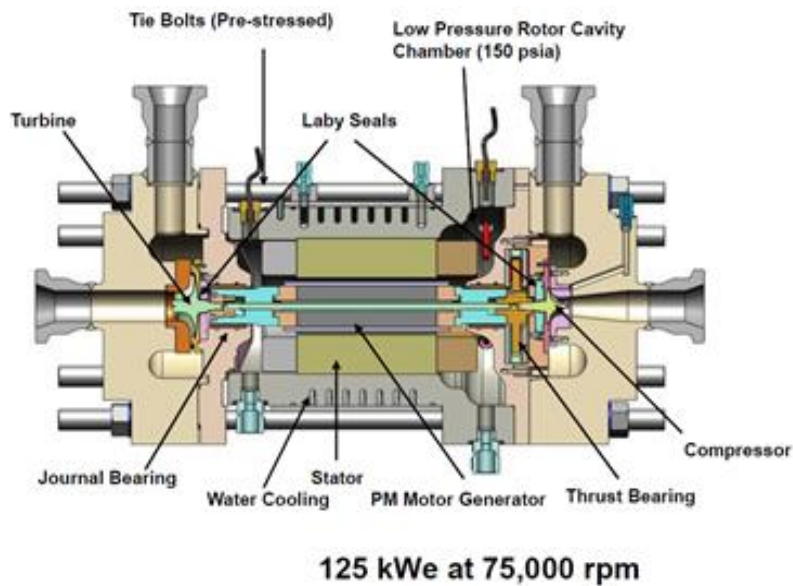
První sCO₂ experimentální oběh

Pravděpodobně první experimentální zařízení simulující sCO₂ oběh bylo realizováno v České republice v obci Běchovice v letech 1995 až 2000. Jednalo se dvě zařízení, první umožňující měření termodynamických dat, zejména tepelnou kapacitu při tlaku až 500bar a teplotě až 480°C. Vybudovaná experimentální smyčka potom simulovala jednoduchý Braytonův oběh s regenerací. Jako zdroj tlaku sloužil bezmazný kompresor s výtlakem až 500bar, který byl dodán firmou Sigma a umožňoval dosažení tlaku až 25MPa. Tento kompresor byl modifikací katalogového vysokotlakého plunžrového čerpadla na vodu. Oběh byl potom vybaven svazkem trubkových výměníků a elektrickými ohříváky, které umožnily dosáhnout maximální teploty až 300°C. Namísto expanzní turbíny byl ve smyčce umístěn plynový expandér s řízením expanze regulovaným otevíráním ventilů. Tento expandér byl vybaven elektrickou brzdou, která umožnila mařit získaný výkon. Zařízení bylo v provozu přibližně dva roky a jeho provoz provázely technické problémy. Jedním z hlavních byly značné vibrace zařízení způsobené pravděpodobně pístovým expandérem. Kvůli nutnosti opuštění pronajímaných prostor bylo zařízení demontováno a postupem času zlikvidováno. Výsledky provedených experimentálních prací bohužel nebyly nikdy publikovány, byly pouze vykázány poskytovateli dotace ve formě výzkumných zpráv. Veškeré uvedené informace byly získány od PhDr. Petra Hájka, CSc, který celé zařízení realizoval za financování Ministerstva průmyslu a obchodu.

Sandia National Laboratories recompression loop

První zařízení demonstrující sCO₂ oběh včetně točivých turbostrojů v laboratorním měřítku realizovala Sandia National Laboratory (SNL). Práce na návrhu zařízení byly započaty v roce 2005. Turbosoustroj v SNL je řešeno jako hermetické, pravděpodobně proto, aby nebylo nutné řešit problematiku ucpávek. Motorgenerátor je umístěn mezi plynovými ložisky a kompresorový a turbínový stupeň je umístěn vždy na převislém konci hřídele. Kompresorový stupeň dosahuje izentropické účinnosti 66,5 % a turbínový stupeň 70,1 %.

Zařízení bylo původně realizováno jako jednoduchý Braytonův oběh, následně bylo vybaveno rekuperačním výměníkem, a nakonec bylo rozšířeno do podoby rekompresního oběhu. Maximální elektrický výkon zařízení se pohybuje na úrovni 125 kW. Nejvyšší tlak v zařízení je na úrovni 14 MPa a maximální teplota oběhu dosahuje 538 °C. Smyčka je vybavena mikrokanálovými rekuperačními výměníky. Jako zdroj tepla slouží elektrický ohřívák o výkonu 500 kW. Zařízení je v současné době využíváno pro získávání dat při nenávrhových stavech oběhu a ke studiu systémového chování oběhu.



Obr. 1: Řez turbosoustrojím vyvinutého v Sandia National Laboratories

Echogen EPS100

První sCO₂ oběh, který dosahuje výkonu v řádu megawattů (MW) byl realizován společností Echogen [5]. Experimentální jednotka EPS 100 byla navržena na využití zbytkového tepla plynových turbín. Nominální výkon zařízení je 7 až 8 MW elektrických při admissní teplotě 400 až 485 °C. Tato jednotka byla dokončena v roce 2014 a posléze byla testována. Na konferenci ve Vídni v roce 2016 byla prezentována ukázka z testování jednotky, kdy turbína dosahovala výkonu 3,1MWe. Jako zdroj tepla byla použita pára, která umožňovala dosažení maximální teploty na vstupu do turbíny na úrovni 275 °C. Z toho i vyplývá maximální dosažený výkon generátoru. V současné době chystá Echogen nasazení jednotky k plynové turbíně na přečerpávací plynové stanici.



Obr. 2: Vizualizace jednotky EPS100

Další realizovaná zařízení a jednotky ve výstavbě

V současné době je po světě provozována řada menších experimentálních zařízení. V Evropě je to například smyčka Scarlet [6] ve Stuttgartu, experimentální zařízení SCARABEUS na vídeňské univerzitě TU Wien [7], nebo sCO₂ experimentální smyčka provozovaná v Centru výzkumu v Řeži [8]. Další je potom možné najít ve Spojených státech amerických nebo Jižní Koreji.

Jednotka o výkonu 10 MW je aktuálně ve výstavbě na Southwest Research Institute (USA) a další vyvíjí Čína za podpory francouzské EDF. Čínská jednotka bude realizována v poušti Gobi při existující solární elektrárně, kde sCO₂ okruh nahradí stávající parní oběh. V Evropě se nyní připravují podmínky pro výstavbu evropské demonstrační jednotky na podobné výkonné úrovni.



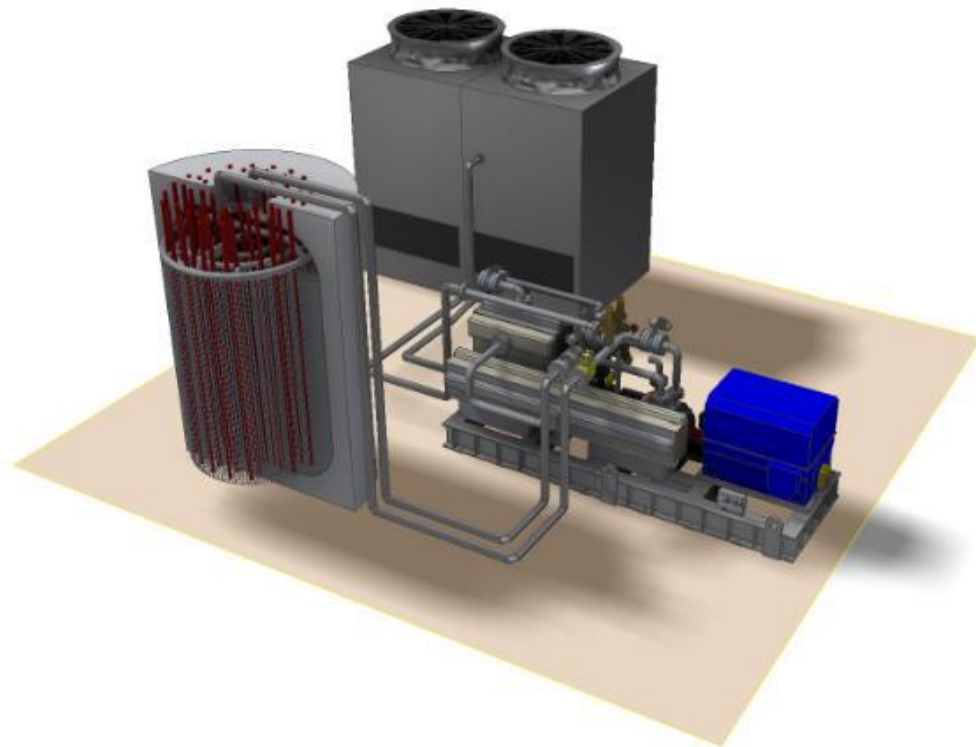
Obr. 3: Pohled na experimentální sCO₂ smyčku provozovanou v CVŘ

Sofia – sCO₂ facility for Supercritical Brayton Cycle Research

I v české kotlině probíhají intenzivní práce v oblasti sCO₂ oběhů. V Centru výzkumu Řež probíhá za podpory Technologické agentury České republiky a za součinnosti partnerů Doosan, Sobriety a UJV vývoj systému ukládání energie využívající principu takzvaných Carnotových baterií nebo také P2H2P (Power to Heat to Power). Tento systém ukládání energie transformuje v době přebytku elektřiny elektrickou energii na teplo, které je ukládáno do tepelného zásobníku. V zásobníku je teplo akumulováno do vhodně zvoleného média. Médii pro ukládání mohou být například tekuté soli, kamenivo, nebo materiál se změnou fáze. Ve špičkách potom čerpá uložené teplo a za pomoci tepelného oběhu transformuje energii zpět na elektrickou, kterou dodává do sítě.

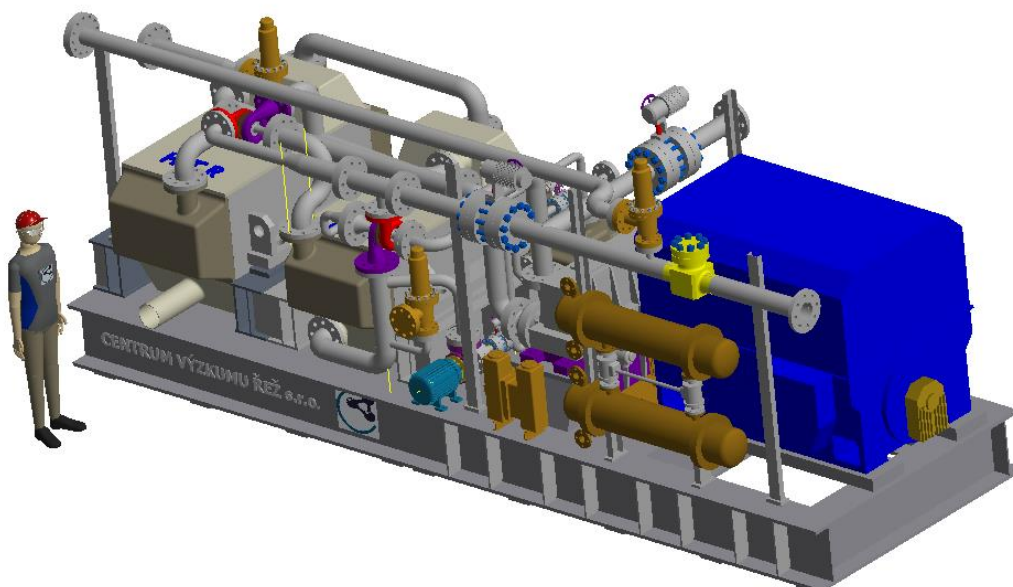
System vyvíjený v projektu sCO₂-Efekt využívá pro přeměnu elektrické energie na tepelnou přímý elektrický ohřev. Topné tyče jsou umístěny přímo v tepelném zásobníku a předávají teplo do akumuláčního média, kterým je v tomto případě eutektická slitina hliníku AlSi12. V zásobníku je zároveň umístěn i tepelný výměník, skrze který je při vybíjení zásobníku odčerpáváno uložené teplo do pracovního média konverzního energetického oběhu. Tím je v tomto konceptu superkritický oxid uhličitý.

Hlavním výsledkem projektu bude koncepční návrh systému akumulace. Tento koncept je velmi inovativní a k ověření proveditelnosti návrhu je dalším výsledkem mock-up akumuláčního tanku. Na tomto mock-upu bude v laboratorním měřítku ověřena správnost termohydraulického návrhu.



Obr. 4: Vizualizace systému akumulace energie do hliníkové slitiny s použitím sCO₂ oběhu

Další neméně důležité výsledky jsou potom návrhy, realizace a ověření funkce točivých strojů pracujících s sCO₂. Těmito stroji jsou startovací kompresor, komandér a výkonová turbína. Startovací kompresor je navrhován jako hermetický stroj se zapouzdřeným motorem a slouží k rozběhu celého oběhu. Komandér, tedy hlavní oběhový kompresor poháněný vlastní turbínou, taktéž v hermetickém provedení, je uložen v plynových ložiscích a zajišťuje kompresi CO₂ v oběhu během provozu oběhu. Kompresor, stejně jako pohonná turbína jsou provedeny jako jednostupňové radiální stroje. Výkonová turbína o výkonu 1MW je provedena jako axiální vícestupňový stroj a je uložena v olejových ložiscích. Tato turbína využívá pro utěsnění hřídele suché plynové ucpávky.



Obr. 5: Vizualizace standu pro testování točivých strojů, součást SOFIA zařízení

Pro možnost otestování vyvinutých strojů bude jako další výsledek projektu postaven stand pro testování točivých strojů. Tento bude obsahovat plynový zdroj tepla, rekuperační výměníky, chladiče a veškeré nezbytné měření.

Závěr

Vývoj sCO₂ oběhů se v současnosti celosvětově věnuje velká pozornost a jsou do něj investovány milióny Euro ročně. Využití moderních oběhů se superkritickým oxidem uhličitým slibuje do budoucna dosažení špičkové účinnosti při nižších investicích v porovnání s parními oběhy. Proto se o sCO₂ oběhy začínají intenzivně zajímat velcí hráči na poli energetiky, ze strany výrobců turbín například Siemens, GE, Doosan nebo Triveni. Do vývoje sCO₂ oběhů investují i provozovatelé sítí a výrobci energie jako například EDF. Není tedy otázkou zda, ale kdy dojde k hromadnému nasazení sCO₂ oběhů v energetice.

Poděkování

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy – projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293.

Literatura

- [1] Angelino, G. (1968): *Carbon Dioxide Condensation Cycles for Power Production*. ASME Paper, No. 68-GT-23.
- [2] Combs, O. V. (1977): *An Investigation of the Supercritical CO₂ Cycle (Feher Cycle) for Shipboard Application*. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [3] Dostal, V., Driscoll, M.J., Hejzlar, P. (2004): *A Supercritical Carbon Dioxide Cycle for Next Generation Nuclear Reactors*. Thesis, MIT-ANP-TR-100, Massachusetts Institute of Technology.
- [4] sCO₂eupe (2021): *European Conference on Supercritical CO₂*. [online]. Available at: <https://www.sco2.eu/>
- [5] Brun, K., Friedman, P., Dennis, R. (Eds.) (2017): *Fundamentals and Application of Supercritical Carbon Dioxide (sCO₂) Based Power Cycles*. Woodhead Publishing Series in Energy. ISBN 9780081008041
- [6] Flaig, W., Mertz, R., Starflinger, J. (2018): *Setup of the Supercritical CO₂ Test Facility 'SCARLETT' for Basic Experimental Investigations of a Compact Heat Exchanger for an Innovative Decay Heat Removal System*. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, Vol. 4, paper NERS-17-1121. ISSN 2332-8983
- [7] Haider, M. et al. (2019): Supercritical CO₂ Test Rig. Poster, *Conference IET*.
- [8] Vojáček, A., Frýbort, O., Hájek, P. (2017): The Supercritical CO₂ Experimental Loop. *Conference Nuclear Technologies for the 21st Century*, Centrum výzkumu Řež s.r.o., pp. 129-132. ISBN 978-80-270-3233-4