

VÝROBA VODÍKU S VYUŽITÍM JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Jakub-Vojtěch Ballek, Tomáš Hlincík

Ústav plynných a pevných paliv a ochrany ovzduší, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze,
Technická 5, 166 28 Praha, tomas.hlincik@vscht.cz

V nejbližších letech lze očekávat, že celosvětová poptávka po vodíku bude postupně růst, přičemž bude stále větší tlak na jeho výrobu bez využití zemního plynu nebo ropy. V důsledku toho se hledají možné cesty, jak vyrobit vodík s nižší uhlíkovou stopou. Vedle využití obnovitelných zdrojů energie se jeví jako další možný zdroj jaderná energie. Tento příspěvek poskytuje přehled dostupných a vhodných technologií, které využívají jadernou energii. Mezi ně patří zejména elektrolyza vody, termochemický rozklad vody nebo hybridní cykly. Součástí příspěvku je i přehled jednotlivých výzkumných programů ve světě.

Jaderná elektrárna by ve spojení s výrobou vodíku mohla vedle uhelných a plynových elektráren sloužit jako záložní flexibilní zdroj energie pro stabilizaci výkyvů v elektrické přenosové soustavě vzniklých v důsledku provozu obnovitelných zdrojů energie.

Klíčová slova: jaderná elektrárna, vodík, elektrolyza

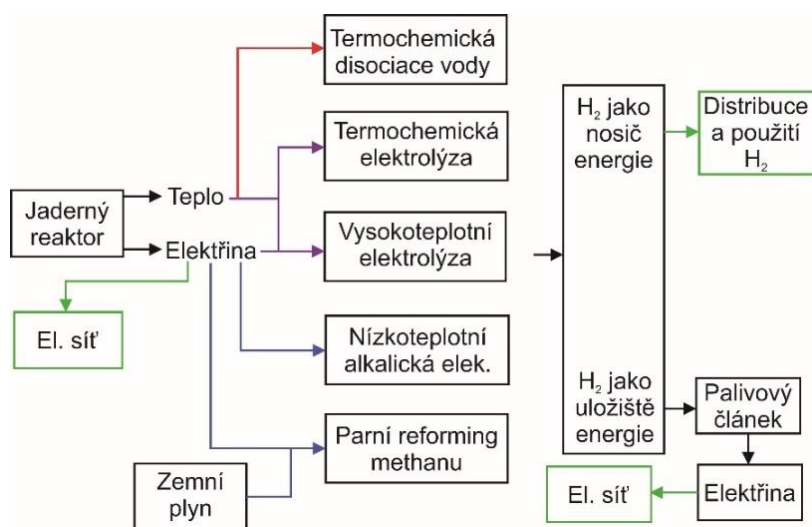
Došlo 22. 11. 2022, přijato 03. 01. 2023

1. Úvod

Využití vodíku jako energetického nosiče představuje jednu z významných cest, jak dosáhnout klimatické neutrality EU do roku 2050. Spolu s ostatními členskými zeměmi se k tomuto cíli zavázala i Česká republika. Důležitým předpokladem je dostatečná výroba nízkouhlíkového vodíku. Pro tento účel se předpokládá využití obnovitelných zdrojů energie, další perspektivní možnost představuje výroba vodíku s využitím energie z jaderných elektráren.

Většina současné světové výroby vodíku je založena na využití fosilních paliv. Produkovaný vodík pochází ze 48 % ze zemního plynu, z 30 % z těžkých ropných frakcí nebo ropy a z 18 % z uhlí. Zbývá 4 % jsou produkována

alkalickou nízkoteplotní elektrolyzou [1]. V ČR převládá výroba vodíku parciální oxidací ropných frakcí, ovšem ta má značnou uhlíkovou stopu. Politické a legislativní kroky podnikané Evropskou unií v poslední době mají za následek, mimo jiné, zvyšující se ceny emisních povolenek za emitovaný CO₂. Tímto tlakem by mohla být brzy ohrožena ekonomická životaschopnost technologií využívající fosilní zdroje. Díky existenci dvou jaderných elektráren může ČR zvažovat výrobu vodíku s využitím jaderné energie. Jaderné elektrárny by mohly vyrábět vodík elektrolyzou v období přebytku energie, ke kterému bude s velkou pravděpodobností docházet v důsledku plánovaného rozvoje zdrojů obnovitelné energie [2].



Obr. 1 Způsoby výroby vodíku s využitím jaderné energie [3]
Fig. 1 Possible ways of producing hydrogen using nuclear energy [3]

2. Výroba vodíku s využitím jaderných zdrojů

Využitelná energie z jaderných elektráren má dvě formy, jako elektřina a jako tepelná energie ve formě procesní páry. Obě formy energie mohou být využity v různých procesech sloužících k výrobě vodíku. Je možné navázat na současné technologie a využívat jadernou energii pro parní reforming zemního plynu nebo pro zplyňování uhlí. V důsledku tlaku na omezování využívání fosilních surovin jsou zkoumány elektrolytické procesy, při nichž se vyrábí vodík pouze z vody s použitím elektřiny, případně tepla. Vhodným zdrojem elektřiny a tepla se pak právě jeví různé typy jaderných reaktorů.

Výstupní teploty chladiva jaderných reaktorů III. a IV. generace se pohybují v rozmezí 300–950 °C, a nadbytečné teplo či elektřina z těchto zařízení mohou být využity pro výrobu vodíku. Další možností je koncipování jaderných reaktorů přímo pro výrobu vodíku. Předmětem výzkumu je především využití jaderné energie ve spojení s elektrolyzou vody, termochemickým rozkladem vody a hybridním spojením těchto dvou procesů.

2.1. Parní reforming methanu

Zemní plyn dnes představuje hlavní surovinu pro většinu světové produkce vodíku. Jedním z procesů jeho výroby je parní reforming. Využití jaderných reaktorů nabízí možnost použít teplo z reaktoru právě pro tento proces. Například využití HTGR (*High Temperature Gas Cooled Reactors*) reaktorů by mohlo být jednou z prvních možností, jak propojit jadernou elektrárnu s výrobou vodíku [4]. Výzkum v této oblasti probíhal v Německu v 70. letech [5]. V Japonsku se zabývali možností propojení HTGR, SMR (*Small modular Reactors*) a parního reformingu [6]. V Ruské federaci byl uveden koncept projektu založený na modulárním heliem chlazeném reaktoru MHR-100SMR (*Modular Helium Reactor*) [7]. Čína se zabývala konceptem spojení s reaktorem HTR-10 [8].

2.2. Zplyňování uhlí

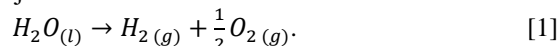
Zplyňování uhlí s využitím energie z jaderných reaktorů bylo předmětem výzkumu v Německu. Koncept počítal s využitím HTGR reaktoru s výstupní teplotou až 950 °C [9].

2.3. Elektrolyza vody

S navyšujícím se podílem obnovitelných zdrojů energie (OZE) v energetickém mixu bude docházet ke kolísání celkové výroby elektrické energie. Aby byla zajištěna dodávka i v případě nízké produkce elektřiny z OZE, bude nutné provozovat i zdroje, které jsou schopné rychle dodat potřebný výkon. Mohou to být plynové elektrárny, nebo právě elektrárny jaderné. Jaderné elektrárny jsou provozovány v režimu stabilního výkonu. V době s dostatkem elektřiny z OZE by tak přebytky energie byly využívány k výrobě vodíku. Stavba několika velkých elektrolyzérů a úložišť vodíku na jednom místě v blízkosti jaderné elektrárny je mnohem efektivnější než

stavba mnoha výroben vodíku u malých zdrojů obnovitelné energie. Elektrolyzéry jsou schopné měnit dynamicky svůj výkon, a proto jsou vhodné pro výrobu vodíku z přebytků elektřiny.

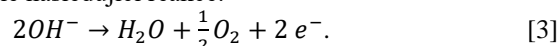
Výroba vodíku probíhá elektrolyzou vody podle následující reakce:



Tato elektrochemická reakce může být rozdělena na dvě části. Redukční reakce probíhá na záporně nabitě katodě dle následující rovnice:



Oxidační reakce probíhá na kladně nabitě anodě podle následující reakce:



Z hlediska reakčních podmínek je důležité brát v úvahu, že teplota má kladný vliv na průběh reakce elektrolyzy vody, zatímco tlak má vliv záporný. Mezi hlavní parametry elektrolyzy patří účinnost, flexibilita a životnost. Hlavní typy elektrolyzy jsou následující [10]:

- nízkoteplotní alkalická elektrolyza (AEL),
- elektrolyza s pevným polymerním elektrolytem (PEM),
- vysokoteplotní parní elektrolyza (HTSE).

Pro využití v blízké budoucnosti lze předpokládat především dva typy elektrolyzy: alkalické a PEM elektrolyzy. V současnosti používaná alkalická elektrolyza probíhá za nízkých teplot a je relativně levná. Nevýhodou alkalické elektrolyzy je pomalejší náběh za studena, který omezuje flexibilitu zařízení, a nižší celková účinnost. PEM elektrolyza vykazuje velmi rychlou odezvu, a tedy možnost přizpůsobovat se výkyvům v provozu, a nabízí také vyšší účinnost. Aktuálně je však PEM elektrolyza z důvodu obsahu vzácných kovů výrazně nákladnější. Nicméně je považována do budoucna za perspektivní, protože se očekává snížení nákladů na výrobu [10,11].

Vodík vyrobený elektrolyzou pomocí jaderné elektrárny má velmi nízkou uhlíkovou stopu. Výroba vodíku bude možná i ve spojení s malými modulárními reaktory (SMR) [2].

2.4. Vysokoteplotní rozklad vody

Vysokoteplotní rozklad vody představuje společně s vysokoteplotní elektrolyzou perspektivní procesy pro masovou produkci vodíku a oběma je celosvětově věnována pozornost. Nejpřímější cestou by bylo přímé jednostupňové termické rozložení molekuly vody. Tento proces by ovšem vyžadoval teploty vyšší než 2 500 °C, což není průmyslově možné. Nicméně v úvahu přicházejí různé vícestupňové termochemické procesy. V těchto procesech je voda rozložena na vodík a kyslík sérii chemických reakcí probíhajících při mírných teplotách. Používané chemikálie by ideálně mělo být možné recyklovat a zůstat tak bez ztrát v systému. V tomto případě by vstup do procesu představovala pouze voda a vysokoteplotní teplo. Z těchto důvodů by tyto cykly měly dosahovat vyšší účinnosti v porovnání s nízkoteplotní elektrolyzou, a výrazně tak snížit výrobní cenu vodíku.

Hybridní cykly kombinují výhody termochemických a elektrolytických reakcí. Nízkoteplotní reakce jsou poháněny elektrochemicky.

Bylo navrženo několik termochemických cyklů, z nichž nejvíce vhodné jsou:

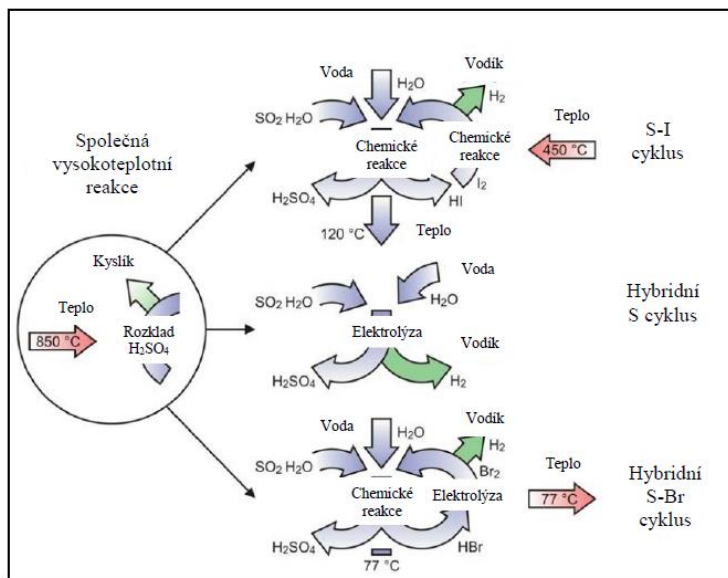
- S-I cyklus,
- hybridní S cyklus (HyS),
- hybridní S-Br cyklus [3,4]

Tyto tři cykly mají společný tepelný rozklad kyseliny sírové při vysokých teplotách (viz obr 2). Rozklad kyseliny sírové probíhá při teplotách okolo 850 °C. Pro

odání tohoto vysokoteplotního tepla by měly být využity vysokoteplotní jaderné reaktory IV. generace.

Dále je v úvaze i využití následujících termochemických cyklů:

- Ca-Br cyklus (UT-3),
- Cu-Cl cyklus,
- Ir-Cl cyklus,
- Cu-síranový cyklus,
- V-Cl cyklus,
- velmi vysokoteplotní cykly [4]



Obr. 2 Termochemické cykly s využitím kyseliny sírové [4,12]

Fig. 2 Thermochemical cycles using sulfuric acid [4,12]

3. Jaderné reaktory vhodné pro výrobu vodíku

Čtvrtá generace nových jaderných reaktorů si klade za cíl dosažení vyšší bezpečnosti, spolehlivosti a zlepšení ekonomiky a udržitelnosti provozu. V roce 2002 bylo pro další vývoj a výzkum vybráno šest následujících typů jaderných reaktorů:

- Plynem chlazený rychlý reaktor (GFR)
- Olovem chlazený rychlý reaktor (LFR)
- Roztavenými solemi chlazený reaktor (MSR)
- Sodíkem chlazený rychlý reaktor (SFR)
- Superkritickou vodou chlazený reaktor (SCWR)
- Velmi vysokoteplotní reaktor (VHTR)

Všechna tato zařízení jsou navržena pro provoz při vyšších teplotách chladiva v porovnání s dnešními jadernými reaktory (parametry reaktorů IV. generace jsou uvedeny v tab. 1). Vyšší teplota umožní výrobu elektřiny s vyšší účinností a také poskytne teplo nebo vodní páru využitelnou v dalších procesech. V důsledku očekávání zvýšení poptávky po vodíku v blízké budoucnosti je výroba vodíku důležitým cílem reaktorů IV. generace. Pro účely výroby vodíku jsou vhodné následující reaktory:

heliem chlazený reaktor, velmi vysokoteplotní reaktor, roztavenými solemi chlazený reaktor a olovem chlazený reaktor [4].

4. Výzkumné programy ve světě

4.1. Kanada

Výzkum v Kanadě je zaměřen na vývoj reaktoru chlazeného superkritickou vodou (SCWR). Proces je založen na systému Kanadských jaderných reaktorů CANDU. Jednou z možných úvah je současné využití výroby elektřiny pro produkci vodíku a zároveň využití tepla pro výrobu páry. Koncept počítá se spojením s těžbou ropy z bitumenových písků, kde se pro zvýšení výtěžnosti využívá značné množství páry. Následně se v procesu úpravy surové ropy využívá vodík pro její rafinaci. Uvažovaným reaktorem je ACR-700 (Pokročilý CANDU reaktor) o tepelném výkonu 1 900 MW. Většina tepelného výkonu je využita pro výrobu páry pro těžbu ropy. Zbýlý výkon je využit pro výrobu 200 MW (e) elektrické energie, která je následně využita v nízkoteplotní elektrolýze pro výrobu vodíku [13,14].

Tab. 1 Parametry reaktorů IV. generace [4]**Tab. 1** Parameters of IV generation reactors [4]

	GFR	LFR	MSR	SFR	SCWR	VHTR
Tepelný výkon (MW)	600	125–400	2250	1000–3800	3900	600
Elektrický výkon (MW)	175	50	1000	150	1700	275
Účinnost	48	33–40	44–50	39	41–44	>50
Chladivo	He	Pb, Pb-Bi	UF soli	Na	voda	He
Vstupní teplota chladiva (°C)	490	550	565		280	640
Výstupní teplota chladiva (°C)	850	750–800	700–850	550	510	1000
Tlak (MPa)	9	0,1		~0,1	25	

Dalším předmětem výzkumu v Kanadě je termochemický Cu-Cl cyklus. Důraz je zde kladen na využití superkritickou vodou chlazeného reaktoru (SCWR). Cu-Cl cyklus pracuje při maximální teplotě 530 °C, což snižuje nároky na materiály v porovnání s vysokoteplotními cykly [15,16].

4.2. Čína

Vývoj vysokoteplotních heliem chlazených reaktorů (HTGR) je důležitou součástí čínského jaderného programu. Jejich účelem je kromě výroby elektřiny také výroba procesní páry pro těžbu těžkých rop a pro petrochemický průmysl. Dále slouží jako zdroj procesního tepla pro zplyňování a zkapalňování uhlí a pro výrobu vodíku. Výzkum za účelem výroby vodíku vysokoteplotním rozkladem vody s využitím HTRG jako zdroje tepla byl zahájen v roce 2005. Tento výzkum byl součástí programu malého modulárního reaktoru HTR-PM. Jako potenciální proces pro výrobu vodíku byl vybrán S-I termochemický cyklus a vysokoteplotní parní elektrolýza [4,17].

4.3. Evropská unie

V rámci projektu HYTHEC STREP byl porovnáván termochemický S-I cyklus s hybridním Westinghouse cyklem (hybridní S cyklus) pro termické štěpení vody. Koncept S-I cyklu byl spojen s 600 MW VHTR reaktorem. Helium z primárního okruhu o výstupní teplotě 890 °C předává teplo sekundárnímu heliovému okruhu. Sekundární okruh slouží částečně jako Braytonův cyklus pro výrobu elektřiny, zbylá tepelná energie je dodávána do S-I cyklu pro výrobu vodíku [4].

Francie

Předmětem výzkumu je jak využití současných PWR (*Pressurized light Water moderated and cooled Reactors*) reaktorů, tak HTGR reaktorů [4].

4.4. Indie

V rámci indického jaderného programu hraje prioritu využití thoria. Předmětem výzkumu je rychlý thoriový reaktor (FBTR) a HTGR, které by měly dodávat teplo v rozmezí 600–1 000 °C. V úvaze je výroba vodíku vysokoteplotním štěpením vody. Studie jsou zaměřeny na část Bunsen a rozklad HI v rámci S-I cyklu [4].

4.5. Japonsko

Výzkum je zaměřen na spojení produkce vodíku s HTGR reaktorem. Pro tento účel jsou v úvaze S-I cyklus a UT-3 termochemický proces [4]. Dalším uvažovaným konceptem je využití sodíkem chlazeného rychlého reaktoru. Reaktor pro výrobu vodíku je navržen pro tepelný výkon 395 MW, teplotu sodíku v primárním okruhu 550 °C a v sekundárním okruhu 540 °C [18].

4.6. Jižní Korea

Jižní Korea počítá ve své vodíkové strategii se zásadním využitím jaderné energie pro výrobu vodíku. Výzkum se zaměřuje především na využití HTGR reaktorů s výstupní teplotou 850 °C. Tyto jednotky jsou uvažovány pro propojení s parním reformingem methanu nebo výrobou methanolu. Další výzkum by se měl zabývat využitím VHTR reaktorů s výstupní teplotou 950 °C [4,19].

4.7. Ruská federace

Výzkum je zaměřen na modulární vysokoteplotní reaktor MHR-100SE pro využití ve spojení s vysokoteplotní parní elektrolýzou. Energie z tohoto heliem chlazeného reaktoru je využita jak k výrobě elektřiny, tak k výrobě páry o tlaku 4,82 MPa. Pára i elektřina jsou vyráběny za účelem výroby vodíku v parní elektrolýzě [4].

4.8. Jižní Afrika

Předmětem výzkumu je PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) reaktor, který představuje typ vysokoteplotního plynem chlazeného reaktoru. Koncept počítá s využitím tohoto reaktoru jako zdroje energie pro zplyňování uhlí. Z jaderné energie je vyráběna elektřina a procesní pára. Pára je využita pro termické štěpení vody pro výrobu vodíku a kyslíku. Kyslík je využit pro zplyňování uhlí. Ke vzniklému plynu je přidán vyrobený vodík a následuje vysokoteplotní Fischer-Tropschova syntéza pro výrobu syntetických kapalných paliv [4].

4.9. USA

Předmětem výzkumu je využití modulárního heliem chlazeného reaktoru (MHR) ve spojení s S-I termochemickým cyklem nebo vysokoteplotní parní elektrolýzou.

Mezi další uvažované varianty patří využití roztavenými solemi chlazeného reaktoru [4]. Další projekt se zabývá využitím olovem chlazeného reaktoru STAR-H2, který je uvažován ve spojení s Ca-Br (UT-3) termochemickým cyklem pro výrobu vodíku [20].

5. Bezpečnost výroby vodíku v blízkosti jaderných zařízení

Vzhledem k plánovanému konceptu masové výroby vodíku v blízkosti jaderných elektráren je důležitým aspektem otázka bezpečnosti. Jedno nebezpečí představuje únik vodíku a jeho následná exploze. Druhé riziko spočívá v uvolnění chemikálií využívaných v termochemických cyklech. V případě použití S-I cyklu největší riziko představuje uvolnění velkého množství oxidů síry nebo kyseliny sírové [21].

Japan Atomic Energy Agency se zabývala bezpečností pro jednotku sestávající z HTGR reaktoru o tepelném výkonu 600 MW ve spojení s výrobou vodíku založenou na S-I termochemickém cyklu. Jako základní bezpečnostní prvek byla uvažována vzdálenost mezi výrobou vodíku a jaderným zařízením. V úvahu bylo vzato jak uvolnění vodíku, tak uvolnění toxických látek z S-I cyklu. Z počítačových simulací úniků látek vyplývá, že i relativně malá vzdálenost mezi jadernou elektrárnou a výrobou vodíku by neměla představovat riziko celkové bezpečnosti. Především pokud by obě zařízení byla oddělena zemním valem nebo ochrannou zdí. Účelem bariéry je zamezit pohybu případně uniklých látek směrem k elektrárně a přispět k jejich rozptýlení v atmosféře. Teoretický výzkum uvádí, že by mělo být z hlediska bezpečnosti možné postavit zařízení pro výrobu vodíku už ve vzdálenosti 100 m od uvažovaného jaderného zařízení [21].

6. Závěr

S rostoucím podílem obnovitelných zdrojů v energetickém mixu EU a tlakem na využívání čistých a udržitelných zdrojů energie získávají jaderné hybridní systémy místo pro své uplatnění. Kvůli zvýšenému využívání obnovitelných zdrojů elektrické energie dochází k vysoké volatilitě sítě. V důsledku těchto výkyvů je nezbytné disponovat záložními flexibilními zdroji energie, které dnes představují především plynové a uhelné elektrárny. S využitím jaderných vodíkových hybridních technologií přichází do hry vodík, který může být využit pro stabilizaci sítě. Vodík může být použit pro ukládání elektřiny, která z něj může být zpětně vyráběna v době jejího nedostatku. Dále může být vodík využit jako nosič energie a použit jako palivo v dopravě.

Diskutované technologie pro výrobu vodíku, ať už se jedná o elektrolýzu, termochemické cykly anebo technologie hybridní, potřebují pouze vodu, teplo a/nebo elektřinu. Alkalická nízkoteplotní elektrolýza je v současnosti jediná rozšířená a komerčně dostupná technologie pro masovou výrobu vodíku. Nicméně výzkum dalších procesů vykazuje značný pokrok a mohl by potenciálně přinést snížení nákladů na výrobu vodíku.

Dále je třeba zdůraznit, že uvedené technologie pracují s různými teplotami, což umožňuje spojení buď se současnými jadernými reaktory III. generace nebo s budoucími reaktory IV. generace. Jaderné reaktory můžeme dle výstupní teploty rozdělit do tří kategorií: nízkoteplotní (<300 °C), středně teplotní (<750 °C) a vysokoteplotní (<950 °C). V současné době je dostupná pouze alkalická nízkoteplotní elektrolýza ve spojení s nízkoteplotními reaktory.

Literatura

1. Nikolaidis P., Poullikkas A. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 597–611.
2. Vodíková strategie České republiky 2021. Dostupné z: Vodíková strategie České republiky. https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/strategicke-projekty/2021/8/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf (staženo 15. 11. 2022).
3. Pinsky R., Sabharwall P., Hartvigsen J., O'Brien J. Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy system. *Progress in Nuclear Energy*, 2020, 123: 103317.
4. Hydrogen Production Using Nuclear Energy. International atomic energy agency, 2013. Nuclear Energy Series. ISBN 978-92-0-135110-4. Dostupné z: <https://www.iaea.org/publications/8855/hydrogen-production-using-nuclear-energy> (staženo 15. 11. 2022).
5. NFE, Nukleare Fernenergie. Zusammenfassender Bericht zum Projekt Nukleare Fernenergie (NFE). Report Jül-Spez-303, Research Center Jülich. 1985. ISSN 0343-7639. Dostupné z https://user.fz-juelich.de/record/823890/files/Juel-Spez-0303_NFE.pdf (staženo 15. 11. 2022).
6. Hoseinzade L.; Adams T. A. Dynamic Modeling of Integrated Mixed Reforming and Carbonless
7. Heat Systems. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2018, 57(17): 6013–6023.
8. Zverev, D. L. Innovation technology for regional power industry based on HTGR. Proc. Int. Conf. on Nuclear Energy Systems for Future Generation and Global Sustainability Global. 2009.
9. Yin H., Jiang S., Zhang Y., Ju H. Modeling of the Helium-Heated Steam Reformer for HTR-10. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2007, 44: 977–984.
10. Verfodern K.; Lensa W. Frohling, W. Nuclear Coal Gasification for Hydrogen and Synthetic Fuels Production. *International Conference on Nuclear Engineering*, Xi'an, China, 7.–11. května 2011, 67–76.
11. Kolmanová, M. Vysokoteplotní elektrolýza: „čistá“ výroba vodíku s možností zpětné konverze. 2016, 2–4. Dostupné z: https://www.vscht.cz/files/uzel/0020323/C6sszs_OL0ktyIIPzUnN-LinKz4n3TfTOjw9JTc4IqUwxMAYa.pdf?redirected (staženo 15. 11. 2022)

12. Ayers K. The potential of proton exchange membrane-based electrolysis technology. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2019, 18, 9–15.
13. Verfondern K., Von Lensa K. Michelangelo Network recommendations on nuclear hydrogen production. *International Journal of Nuclear Hydrogen Production and Applications*, 2006, 1(1): 68–78.
14. Finan A. E., Miu K., Kadak A. C. Nuclear Technology and Canadian Oil Sands; Integration of Nuclear Power with In-Situ Oil Extraction. In: Proceedings, 2006 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP06. B.m.: Citeseer, 2006, s. 2329–2338.
15. Coupey J. P. Recovery of unconventional oil resources. In: Presentation at the Post-FISA Conference on HTRs for Combined Heat/Electricity and Hydrogen Production, Luxembourg. 2006.
16. Naterer G. F., Suppiah S., Stolberg L., Lewis M., Wang Z., Dagupati V., Gabriel K., Dincer I., Rosen M. A., Spekkens P., Lvov S. N., Fowler M., Tremaine P., Mostaghimi J., Easton E. B., Trevani L., Rizvi G., Ikeda B. M., Kaye M. H., Lu L., Pioro I., Smith W. R., Secnik E., Jiang J., Avsec J. Canada's program on nuclear hydrogen production and the thermochemical Cu-Cl cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(20): 10905–10926.
17. Al-zareer M., Dincer I., Rosen M. A. Development and assessment of a novel integrated nuclear plant for electricity and hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 2017, 134: 221–234.
18. Ping, Z., Laijun W., Songzhe C., Jingming X. Progress of nuclear hydrogen production through the iodine–sulfur process in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 1802–1812.
19. Chikazawa Y. Conceptual design of hydrogen production plant with thermochemical and electrolytic hybrid method using a sodium cooled reactor. Proc. of ICAPP'05. 2005.
20. Lee W. J., Kim Y. W., Chang J. H. Perspectives of nuclear heat and hydrogen. *Nuclear Engineering and Technology*. 2009, 41(4): 413–426.
21. El-Emam R.S.; Ozcan H.; Zamfirescu C. Updates on promising thermochemical cycles for clean hydrogen production using nuclear energy. *Journal of Cleaner Production*. 2020, 262, 121424.
22. Verfondern K. Yan X., Nishihara T., Allelein J. Safety concept of nuclear cogeneration of hydrogen and electricity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(11): 7551–7559.

Summary

Hydrogen production using nuclear power plants

Jakub-Vojtěch Ballek, Tomáš Hlinčík

In the coming years, the global demand for hydrogen can be expected to grow gradually, with increasing pressure to produce without the use of natural gas or oil. As a result, possible ways to produce hydrogen that will have a lower carbon footprint are being sought. Apart from the use of renewable energy sources, nuclear energy appears to be another possible source. This article provides an overview of available and suitable technologies that use nuclear energy. These include in particular water electrolysis, thermochemical decomposition of water or hybrid cycles. The article also includes an overview of individual research programs in the world.

A nuclear power plant, in conjunction with hydrogen production, could serve as a backup flexible energy source in addition to coal and gas power plants to stabilize fluctuations in the electrical transmission system due to the operation of renewable energy sources.