

## POROVNÁNÍ KVALITY VODÍKU Z RŮZNÝCH TECHNOLOGIÍ VÝROBY

Jan Hadrava, Roman Vokatý, Tomáš Hlinčík, Daniel Tenkrát

VŠCHT Praha, Fakulta technologie ochrany prostředí,  
Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany prostředí, Technická 5, 166 28, Praha 6  
email: hadravaa@vscht.cz

Článek je zaměřen na konvenční způsoby výroby vodíku reformingem fosilních surovin a také na alternativní metody produkce vodíku, které jsou v současné době ve stádiu výzkumu. Současná výroba vodíku využívá převážně procesu konverze fosilních paliv vodní parou. Důvodem je vysoký podíl CO z počátečního kroku vysokoteplotní konverze. Dle použité technologie je třeba většinu paliv pro výrobu vodíku odsířit, což se projeví vyšší cenou konečného produktu. Paliva zpracovávaná parním reformováním produkují 70-80 % obj. vodíku. Parciální oxidací se získá pouze 35-45 % obj. vodíku v plynu.

Klíčová slova: vodík, parní reforming, elektrolýza

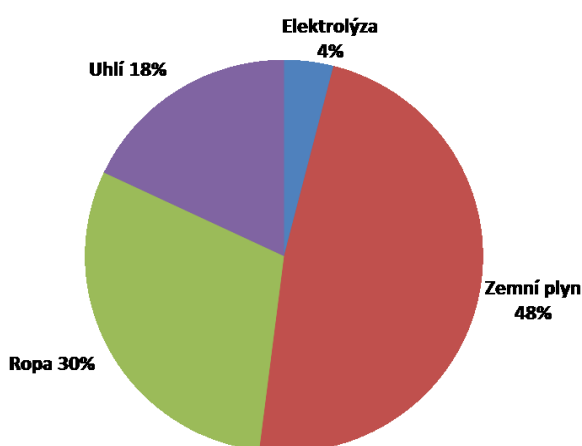
Došlo 27. 6. 2013, přijato 9. 9. 2013

### 1. Úvod

#### 1.1. Výroba vodíku

Pro výrobu vodíku v průmyslovém měřítku jsou hlavním zdrojem uhlovodíky. Největší zásobou vodíku najdeme ale v mořích a oceánech v podobě vody. V případě použití vodíku jako paliva, je konečným produktem vodní pára. Potom můžeme cyklus srovnávat s uhlíkovým cyklem (CO<sub>2</sub> – biomasa – CO<sub>2</sub>) a vodu považovat za neomezený zdroj vodíku.

V současnosti je celosvětově vyráběno ročně přibližně 50 milionů tun vodíku s každoročním nárůstem okolo 10 %. Produkce je z 96 % pokrývána procesy konverze fosilních paliv. Zbývá 4 % připadají na proces elektrolýzy vody (obr. 1). Tepelné, termochemické, biochemické a fotochemické procesy pro výrobu vodíku zatím nebyly významně uplatněny v průmyslových aplikacích a zůstávají předmětem vědeckých studií. [1,2]



Obr. 1 Aktuální suroviny pro výrobu vodíku [1]

Alternativní výroba vodíku by se mohla zefektivnit nástupem takzvané čtvrté generace jaderných reaktorů. Jedná se především o tzv. VHTR (very-high-

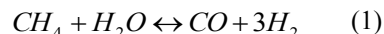
temperature reactor). Ty využívají grafit jako moderátor neutronů a helium nebo taveninu solí jako chladicí médium. Tyto reaktory pracují při teplotách okolo 1000 °C a právě vyrobené teplo by se dalo využít při procesu vysokoteplotní elektrolýzy či v termochemických cyklech štěpení vody (více v kap. 1.4.2).

#### 1.2. Výroba z uhlovodíkových paliv

##### 1.2.1. Parní reforming

Endotermické parní reformování uhlovodíků, nejčastěji zemního plynu, nevyžaduje kyslík, má nižší provozní teplotu než parciální oxidace (POX) a autotermní štěpení (ATR), a produkuje reformát s vysokým poměrem H<sub>2</sub>/CO (1). Nicméně vykazuje nejvyšší emise CO<sub>2</sub> ze všech tří procesů. Parním reformováním se dosahuje poměrně vysoké termické účinnosti až 85 % (vztaženo na výhřevnost použité suroviny).

Reakční produkty o teplotě cca 750 °C jsou vedeny přes kotel na výrobu páry a tepelný výměník, kde jsou ochlazovány na cca 360 °C, dále do konvertorů, kde jsou reakcí CO (2) s další vodní parou převedeny na CO<sub>2</sub>. Produktem je plynná směs s vysokým obsahem vodíku.



Jako výchozí suroviny jsou využívány nejčastěji zemní plyn, alternativou je použití propanu. Obě suroviny musí být před zpracováním odsířeny, protože síra působí jako katalytický jed.

Vodík získaný parním reformingem je primárně využíván k syntéze amoniaku procesem Haber-Bosch a následně výrobě hnojiv. Druhé majoritní uplatnění vodíku se nalézá v petrochemickém průmyslu při rafinaci paliv (hydrogenace, hydrokrakování, strukturální přeměna uhlovodíků). Zbývající malé množství je využíváno v jiných průmyslových odvětvích, jako je metalurgie, potravinářství nebo farmaceutický průmysl.

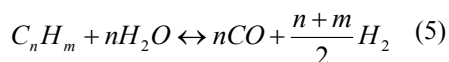
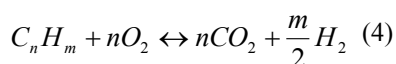
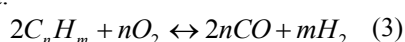
Plynné nečistoty při výrobě vodíku v podobě CO, CO<sub>2</sub>, NO, NH<sub>3</sub> jsou odstraňovány v závislosti na

konečném použití vodíku. Běžně se jedná o vypírací procesy či konverze plynu. Má-li být produktem vysoce čistý vodík, je nezbytné použít účinné adsorpční technologie [3].

### 1.2.2. Parciální oxidace uhlovodíků

Parciální oxidace konvertuje uhlovodíky na vodík částečnou oxidací (nekatalytickým spalováním) uhlovodíků s kyslíkem. Teplo je poskytováno, tzv. "řízeným spalováním". Zařízení pro parciální oxidaci uhlovodíků vyžadují vysoké investiční náklady a jsou zpravidla realizovány pro spotřeby vodíku resp. syntézního plynu od 50 000 m<sup>3</sup>/h a výše.

Surovina (obecně C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) je zplyňována kyslíkem a vodní parou při teplotách 1300 až 1500 °C a tlacích 3 až 8 MPa.



Zplyňování kyslíkem je vysoce exotermní. Zplyňování vodní parou vede ke vzniku většího množství vodíku než při zplyňování kyslíkem a dále je touto endotermní reakcí snižována teplota reakčních produktů na požadovanou hodnotu cca 1350 °C.

Typickou výchozí surovinou je těžký ropný zbytek, zejména s výhodnějším poměrem H:C, protože množství vznikajícího vodíku je závislé na výši obsahu vodíku v surovině. Jako surový produkt vzniká syntézní plyn, který je po vyčištění přiváděn do reaktoru, v němž dochází ke konverzi oxidu uhelnatého a vodní páry na vodík a oxid uhličitý.

Využití vodíku z parciální oxidace uhlovodíků je opět především v petrochemii a rafinériích.

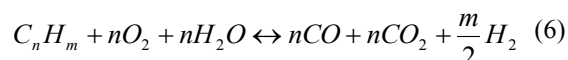
Parciální oxidací různých surovin se vždy tvoří plynná směs obsahující CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> a ze sirných sloučenin H<sub>2</sub>S a COS. Jako vedlejší produkt vznikají saze, které jsou nežádoucím produktem. Z vyrobeného surového plynu je odstraněn kyanovodík a sulfan, následně probíhá konverze oxidu uhelnatého na oxid uhličitý, ten je z plynu odstraněn např. etanolaminem. Zbytky CO a CO<sub>2</sub> jsou následně methanizovány stejným způsobem jako při výrobě vodíku parním reformováním. Místo vypírky CO<sub>2</sub> a metanizačního reaktoru lze pro odstranění CO<sub>2</sub> a zbytků CO použít jednotku PSA [3].

### 1.2.3. Zplyňování uhlí

Vodík lze získat i z uhlí redukcí vodní páry uhlíkem. Jedná se o analogii parciální oxidace uhlovodíkových frakcí. Základem zplyňování je reakce uhlí s kyslíkem a vodní parou. Proces probíhá při vysokých teplotách a zvýšeném tlaku.

Je-li teplota při zplyňování vyšší než 1300 °C, tak produktem je syntézní plyn s nízkým obsahem methanu a dalších uhlovodíků. Chemická rovnováha je při těchto teplotách nakloněna ve prospěch vodíku a oxidu

uhelnatého. Reformováním v dalším kroku je obvykle výtěžek vodíku ještě zvyšován.



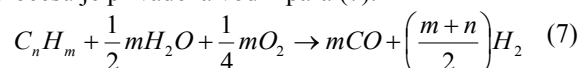
Nejvyššího výtěžku vodíku v primárním zplyňovacím kroku se dosahuje zplyněním práškového hnědého uhlí s ideálním poměrem uhlíku a vodíku. V černém uhlí je kvůli vysokému prouhelnění obsah vodíku nižší. Provozní teploty se liší dle zplyňovací technologie a pohybuje se od 600 °C do 1200 °C se zvýšeným tlakem 2 MPa.

Zplyňování uhlí v minulosti sloužilo především jako zdroj syntézního plynu pro plynové turbíny či jako palivo pro tepelně náročné procesy. S nástupem spalovacích motorů se získaný syntézní plyn začal používat k výrobě kapalných paliv procesem Fischer-Tropsch. V některých zemích se jedná o jedinou možnost k získání kapalných uhlovodíkových paliv. S rostoucí spotřebou vodíku se syntézní plyn reformoval na vodík. Vodní konverze plynu a vypírací procesy umožňují získat vodík o čistotě až 95 %. Zplyňováním uhlí se ročně vyrobí okolo 10 mil. tun vodíku. Zplyňování uhlí má pozitivní dopad na ochranu ovzduší, neboť navzdory vstupní surovině s vysokým obsahem síry je díky odsířovacím procesům možno získat plyn s minimálním obsahem sirných komponent.

Síraté složky v plynu (H<sub>2</sub>S, COS, atd.) včetně CO a CO<sub>2</sub> jsou nejčastěji odstraňovány vypíracím procesem pomocí podchlazeného metanolu [1].

### 1.2.4. Autotermní štěpení

Autotermní reforming (ATR) je proces, při kterém je vlivem parciální oxidace paliva vyráběno teplo k endotermním reformním reakcím téhož paliva. Do procesu je přiváděna vodní pára (7).



Předehtává uhlovodíková surovina a kyslík jsou smíchány s malým množstvím vodní páry u vstupu do reaktoru. Částečné spalování probíhá v horní zóně a vyšší uhlovodíky jsou kvantitativně převedeny na CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>. Metan, vodík a CO jsou částečně převedeny se zbývajícím kyslíkem. Rovnováha mezi parním reformingem a vodní konverzí probíhá v katalytické části parního reformingu. Niklový katalyzátor je na Mg-Al nosiči v pevném loži katalytické části reaktoru.

Vhodnou surovinou je plyn bohatý na methan. Ten společně s kyslíkem je před vstupem do reaktoru v rekuperátoru ohřát na 200 – 600 °C. Provozní tlak obvykle nepřesahuje 7 MPa kvůli konstrukčním možnostem. Naopak při tlacích pod 2 MPa se tvoří saze, které je nutné odstraňovat.

Hlavním produktem autotermního štěpení je syntézní plyn, který nachází uplatnění především jako topné medium či zdroj pro syntézu kapalných paliv. Selektivní výrobu vodíku ze syntézního plynu umožňuje řízená vodní konverze plynu a následné dočištění, kde dominuje vypírka plynu v podchlazeném methanolu.

Vyšších čistot vodíku lze dosáhnout následnou methanizací plynu se stopovým množstvím CO nebo PSA technologiemi [3].

### 1.3. Výroba z biomasy

#### 1.3.1. Zplyňování biomasy

Zplyňování alternativních paliv umožňuje transformovat málo hodnotné palivo na plynnou formu, která je použitelná pro další energetické účely. Procesní teplota se liší dle použitého zplyňovacího generátoru a pohybuje se od 800 °C do 1200 °C. Vstupující surovina ovlivňuje složení produkovaného plynu obsahující především CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, dehtové látky, sloučeniny síry a chlor. Biomasa je zplyňována kyslíkem a vodní parou. Ojedinele je zplyňovací médium obohaceno o CO<sub>2</sub>. Po ochlazení plynu vykondenzují výše vroucí složky. Plyn je dále dočištěván vypíracími nebo adsorpčními procesy (Rectisol, PSA). Vodík vyrobený z biomasy dosahuje čistoty až 95 % [1].

#### 1.3.2. Tmavá fermentace

Jedná se o fermentační konverzi organického substrátu na biovodík, jež je způsobena rozmanitou skupinou bakterií, využívající multienzymové systémy podobnou anaerobní přeměně [4].

Ideální surovinou je potravinářský odpad s vysokým obsahem sacharidů (škrob, celulóza). Průběh fermentace je ovlivněn hodnotou pH a použitými anaerobními mikroorganismy. Produktem fermentace je vodík a CO<sub>2</sub>. V menší míře fermentační plyn obsahuje i sulfan a methan. Výtěžek vodíku je řízen i dobou zdržení reakčních produktů ve fermentoru [4].

#### 1.3.3. Mikrobiální elektrolytický článek

Článek využívají elektrochemické hydrogenace k rozkladu biologického materiálu na vodík. Do procesu vstupuje surovina a elektrická energie a vystupuje čistý vodík. Mikrobiální článek je sestaven ze dvou elektrod umístěných v anaerobním prostředí, na které je přiváděno slabé elektrické napětí. Na anodě dochází vlivem mikroorganismů k rozkladu organického materiálu. Při tomto procesu vznikají protony, elektrony a oxid uhličitý. Protony procházejí membránou ke katodě, kde se slučují s elektrony a kyslíkem za vzniku vody. Proces pracuje s přijatelnou energetickou účinností produkující vodík o čistotě až 99,5 %. Velkou výhodou technologie je v použití široké škály biologického odpadního materiálu [1].

### 1.4. Výroba z vody

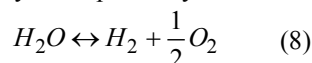
#### 1.4.1. Elektrolyza

Elektrolytické štěpení vody představuje snadnou výrobu vodíku. Jedná se o konverzi elektrické energie na energii chemickou ve formě vodíku a vedlejšího produktu kyslíku. Nejrozšířenější elektrolytická metoda je na alkalické bázi. Ale nejvíce se rozvíjející je elektrolyza s výměnou protonů přes

membránu (PEMFC) a elektrolyza s pevnými oxidy (SOEC). SOEC mají nejvyšší elektrickou účinnost, ale kvůli vysoké korozi, netěsnostem, tepelným ztrátám a migraci chromu je nejméně vyvinutou technologií. Elektrolyza s výměnou protonů (PEMFC) je účinnější než alkalická elektrolyza, navíc nehrozí koroze jako v případě SOEC. Jednotky PEMFC sou ale dražší než alkalické systémy.

Jakákoliv elektrolyza produkuje vysoce čistý vodík. V minulosti se však tato technologie potýkala s problémem spočívajícím v nízkém tlaku generovaného vodíku. Tento problém bylo nutné eliminovat použitím nákladných kompresorů. Moderní elektrolyzéry např. HOGEN C jsou schopny produkovat ultra čistý vodík při tlaku až 3 MPa [5,6]. Ve srovnání s výrobou vodíku z fosilních paliv, neprodukuje elektrolyza žádné CO<sub>2</sub>. Nicméně k výrobě vodíku elektrolytickými technologiemi je vynaloženo více energie ve formě elektřiny. Ekonomickou efektivnost použité energie lze zvýšit využitím alternativních zdrojů elektrické energie jako je vítr, slunce a voda [6].

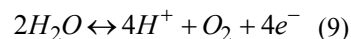
**Alkalické elektrolyzéry.** Skládá se z elektrod, diafragmy a alkalického roztoku 30 % KOH nebo NaOH. Katoda je z niklu s platinovou katalytickou vrstvou. Z niklu bývá i anoda, ale používá se i měď s vrstvou manganu, ruthenia nebo wolframu. Na katodě se voda štěpí na vodík a OH<sup>-</sup>. Vodík zůstává v alkalickém roztoku a iont OH<sup>-</sup> je přitahován k anodě, kde dochází ke vzniku kyslíku. Vodík je oddělen v separátoru mimo elektrolyzér. Účinnost elektrolyzéry nepřesahuje 60 %. Čistota vodíku dosahuje 99,5 % s menším obsahem vodní páry a kyslíku. K dočištění se využívá katalytické spalení kyslíku a sušení [6].



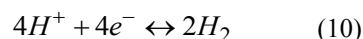
#### Elektrolyzéry s protonovou výměnou.

Elektrody převážně z Pt, Ir, Ru nebo Rh. Jednotka je doplněna o membránu, která nejen odděluje elektrody, ale plní i funkci rozdělování kyslíku a vodíku. Na anodě (9) dochází k rozštěpení vody na protony a kyslík. Protony migrují skrze membránu k záporné katodě (10), kde vlivem redukce protonů s elektrony z vnějšího zdroje dochází ke vzniku vodíku. Účinnost elektrolyzy dosahuje až 70 %. Čistota vodíku opět dosahuje hodnot až 99,9 % [6].

Anoda:



Katoda:

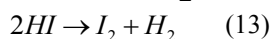
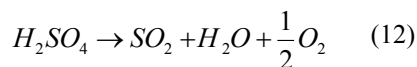
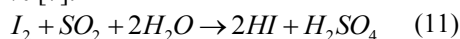


**Elektrolyza s pevnými oxidy.** Část elektrické energie potřebné k rozložení vodní molekuly je nahrazena energií tepelnou. S rostoucí teplotou se zvyšuje účinnost elektrolyzy, protože je snižováno rovnovážné napětí anody a katody. To způsobuje snížení požadavku na elektrickou energii. Například

zvýšením teploty ze 100 °C na 800 °C se sníží spotřeba energie o téměř 35 %. Iontově vodivý keramický materiál je používán jako elektrolyt. Pro elektrody se používají sintrované materiály na bázi niklu nebo vysoce porézní struktury s  $\text{LaMnO}_3$ . Článek špatně snáší opakované změny teplot, kdy může dojít k trvalému poškození. Vysoké operační teploty kladou důraz na kvalitní konstrukční materiály. Výhodou elektrolyzy s pevnými oxidy je absence vodného roztoku a s tím spojené nedostatky. Čistota vodíku v tomto případě dosahuje až 99,9 %. [6]

#### 1.4.2. Termochemické štěpení vody

Tato termolýza využívá vysokých teplot k rozdělení vody na vodík a kyslík přes sled po sobě jdoucích reakcí. Celková účinnost systému se přibližuje k 50 %. Technologie je už vyvíjena od r. 1960. V současnosti již existuje na 300 termochemických cyklů, které ke své funkci vyžadují vysoký energetický tok. Systém tak byl často spojován s pokročilými jadernými reaktory čtvrté generace. Zejména vysokoteplotní jaderné reaktory chlazené plynem pro své termodynamické vlastnosti. Operační podmínky dosahující i 2500 °C a 7 MPa sebou přináší značné nároky na konstrukční materiály, které nedosahují potřebné způsobilosti ani dnes. Příkladem termochemického cyklu je jód-sírový cyklus [7]. Vstupní surovinou je voda a teplo. Vzniklé  $\text{SO}_2$  a  $\text{I}_2$  se recyklují a vrací zpět do procesu s menšími ztrátami. Nejvíce energie spotřebuje endotermický (1000 °C) rozklad  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . To způsobuje vysoce agresivní podmínky a nutnost použití i chemicky odolných materiálů. Posledním krokem cyklu je rozklad HI na vodík a jód. Ten je problematický v separaci neobvyklé azeotropní směsi HI,  $\text{H}_2$ ,  $\text{I}_2$  a vody, tzv.  $\text{HI}_x$ . Řešení nalézá v kombinované technologii elektrodialýzy a membránové separace. Poté lze získat vodík o čistotě nad 99 % [7].



#### 1.4.3. Fotoelektrolýza

Využívá sluneční světlo k přímému rozkladu vody na vodík a kyslík. Tato technologie používá dotované polovodičové materiály podobné těm, které jsou používány v oblasti fotovoltaiky. Ve fotovoltaice jsou spojeny dva polovodičové materiály (p-typu a n-typu) a tvoří p-n přechod. U přechodu se tvoří trvalé elektrické pole. Při dopadu fotonu s energií dojde k její absorpci v přechodové vrstvě a dojde k uvolnění elektronu a vznikne po něm mezera. V přítomnosti elektrického pole jsou elektron i mezera nuceny pohybovat se v opačných směrech, což v případě připojení vnějšího zatížení bude vytvářet elektrický proud. Podobná situace nastane při fotoelektrolýze, když fotokatoda (p-typu materiálu s nadbytkem děr), nebo fotoanoda

(n-typu materiálu s nadbytkem elektronů) je ponořena do vodného elektrolytu, ale místo vytváření elektrického proudu je štěpena voda na vodík a kyslík. Efektivita výroby vodíku je omezena nedokonalostmi v krystalické struktuře, povrchovými vlastnostmi fotoelektrod, odolností materiálu proti korozi. Aktuálně používané fotoelektrody mají nízkou účinnost využití fotonů, která nepřekračuje 16 % přeměny sluneční energie na vodík.

Mezi výhody těchto systémů patří použití nízkonákladových materiálů a potenciálu pro vysokou efektivitu v překonání nízké adsorpce světelného záření. Čistota vodíku dosahuje úrovně jako v případě alkalické elektrolyzy [6].

## 2. Kvalita vodíku pro distribuci

### 2.1. Využití vodíku jako paliva mimo oblast silniční dopravy

Stejnorodost vyráběného a distribuovaného produktu pro dopravní a spotřební či jiné palivové aplikace (pozemní, vodní, vzdušné a kosmické) vyjma aplikace využívající PEM palivové články v silniční dopravě specifikuje mezinárodní norma ČSN ISO 14687-1.

Rozlišuje se:

- Plyný vodík – čistota minimálně 98 % molárních.
- Kapalný vodík – zkapalnění plynného vodíku zchlazením nebo kompresí.
- Směs pevného a kapalného vodíku – vodík v pevném stavu a kapalný vodík při eutektické teplotě.

Plyný vodík najde uplatnění především jako palivo pro spalovací motory nebo jako průmyslové palivo pro výrobu elektrické energie. Čistota vodíku nepřesahuje 98 % molárních s celkovým obsahem vody, argonu, kyslíku a dusíku do 1,9 % molárních. Zbytek tvoří uhlovodíky, síra a CO.

Kapalný vodík se používá především pro pozemní podpůrné systémy letadel a kosmických lodí. Plyn obsahuje 99,995 % vodíku.

Směs pevného a kapalného vodíku je vhodný pro pohonné jednotky letadel a kosmických lodí. Čistota směsi je 99,995 % obsahu vodíku. Maximální limitní hodnoty nečistot není nutné stanovovat [8].

### 2.2. Využití vodíku v palivových článcích s PEM v silniční dopravě

Stejnorodost dodávaného produktu pro využití v pozemní dopravě ve vozidlech s PEM palivovými články specifikuje mezinárodní norma ČSN ISO 14687-2. Vodík má obsahovat minimální množství vody, kyslíku,  $\text{CO}_2$ , CO, sirných složek a jiných uhlovodíků. Celkové množství nečistot nepřesahuje 100  $\mu\text{g}$  na 1 mol vodíku.

Obsah vody nemá zpravidla vliv na funkci palivového článku. Může pouze představovat ohrožení pro palubní rozvod paliva. Obdobný vliv má i obsah kyslíku.

Z uhlovodíků vykazují aromatické látky vyšší tendenci k adsorpci na katalyzátor než nasycené

uhlovodíky, čímž dochází k blokování přístupu vodíku a snížení výkonu článku.

Obsah CO má významný vliv na funkci článku, způsobený kontaminací katalyzátoru. Obdobné působení vykazuje i formaldehyd a kyselina mravenčí.

Celkový obsah sirných látek působí nevratně na výkon článku. Jsou to zejména  $H_2S$ , COS,  $CS_2$  a  $CH_3SH$ , které se mohou vyskytovat v reformovaném zemním plynu.

Přítomnost amoniaku vede k nevratné degradaci výkonu článku, způsobenou kontaminací PEM membrány reakcí s protony v membráně za tvorby  $NH_4^+$  iontů.

Velikost pevných částic (prach) je specifikována z důvodu ochrany těsnění ve skladovacím zařízení. Maximální koncentrace  $1 \mu g/l$  je stanovena pro zajištění průchodnosti filtrů a/nebo zamezení vstupu částic do palivového systému, kde mohou ovlivňovat funkci ventilů [8].

### 3. Závěr

V současné době při výrobě vodíku jednoznačně převládá zpracování uhlovodíků. Jedná se o parní reformování zemního plynu, zplyňování uhlí a autotermní štěpení lehčích frakcí ropy. Množství takto vyrobeného vodíku je velké a v porovnání s alternativní produkcí i značně levnější.

Elektrolýzou lze získat velmi čistý vodík. Nové technologie umožňují vyrábět vodík i o vyšším tlaku a snížit tak náklady za kompresní jednotky. Jde o přeměnu elektrického proudu na další formu energie s kyslíkem, jako vedlejším produktem. Obdobně je tomu i u termochemického štěpení, kde se k rozkladu vody používá dodávané teplo.

Fotoelektrolýza a fotochemické metody představují jako alternativní metody nezávislost na elektrické energii. Využívají pouze slunečního záření pro rozklad vody. Jejich účinnost je snížena kvůli technologickým či materiálovým nedostatkům.

Vysokoteplotní parní elektrolýza a termické štěpení vody jsou vysoce účinné za předpokladu stálého zdroje energie s teplotou okolo  $1\ 000\ ^\circ C$ . To by mohly zajišťovat jaderné reaktory 4. generace. Jedná se o systémy GFR a VHTR, kde výstupní chladicí heliové medium dosahuje teplot až  $1\ 200\ ^\circ C$ . Ve spojení například s jód-sírovým procesem založeném na vysoce endotermní Bunsenově reakci lze docílit velice efektivního zdroje vodíku. Pokročilé jaderné reaktory jsou ale nesmírně náročné na použité materiály a stavební zázemí. Rostoucí tendence spotřeby vodíku vede k nutnosti rozšíření výrobních kapacit a vyššího využití alternativních možností produkce vodíku.

### Poděkování

Práce byla realizována s podporou Projektu výzkumu a vývoje MPO č. FR-TI2/442.

### Literatura

1. Bičáková Olga: Možnosti výroby vodíku biologickými procesy, *Paliva* 2010 (2), 103–112
2. GUPTA, R. B. Hydrogen Fuel: Production, Storage, and Transport. 1st ed. 2008. ISBN 978-1-4200-4575-8.
3. Palmová, I.; Schongut, J.; et al. Perspektivy výroby a využití vodíku. *Chem. Listy* 2004, 98, 205–210
4. Balat, M.; et al. Political, economic and environmental impacts of biomass-based hydrogen. 2009, 34, 3589–3603.
5. <http://fuelcellsworks.com/news/2010/07/15/proton-energy-unveils-new-hogen-c-series-hydrogen-generation-system/> (accessed Sept 13, 06).
6. Holladay J.D. et al: An overview of hydrogen production technologies, *Catalysis Today* 2009 139, 244–260.
7. Elder, R.; Priestman, G.; et al. The Separation of Hix in the Sulphur–Iodine Thermochemical Cycle for Sustainable Hydrogen Production. *Process Safety and Environmental Protection* 2005, 83 (4), 343–350
8. ČSN 65 4435. *Vodík plyný stlačený*. Praha: Linde Technoplyn a.s., 1997. 36 p.

### Summary

Jan Hadrava, Roman Vokatý, Tomáš Hlinčík,  
Daniel Tenkrát

Institute of Chemical Technology, Prague, Faculty of  
Environmental Technology, Department of Gas, Coke  
and Air Protection

### Comparison of hydrogen quality from different production technologies

This paper is focused on conventional methods of hydrogen production using reforming of fossil fuels. We also discussed alternative methods of production which are still in research. Nowadays, the steam reforming is used as a dominant source of hydrogen. The reason is the high ratio of CO in gas inlet from the initial steps of high-temperature conversion. Most of the processes require desulfurization which causes higher price of the final product. Fossil fuels transformed by steam reforming produce 70-80 vol. % of hydrogen in contrast to partial oxidation that produces only 35 vol.%.