

## CHEMICKÝ PRŮMYSL

### PERSPEKTIVY VÝROBY A VYUŽITÍ VODÍKU

IVA PALMOVÁ a JIŘÍ SCHÖNGUT

CHEMOPETROL, a.s., DS 518, 436 70 Litvínov – Záluží 1  
Jiri.Schongut@chemopetrol.cz

#### Obsah

1. Úvod
2. Způsoby výroby vodíku
3. Použití vodíku
4. Perspektiva – způsoby výroby vodíku
5. Perspektiva – využití vodíku
  - 5.1. Použití vodíku v automobilovém průmyslu
  - 5.2. Použití vodíku jako motorového paliva
  - 5.3. Praktické aspekty využití vodíku jako motorového paliva
6. Budování vodíkové infrastruktury
7. Závěr

#### 1. Úvod

Vodík je velmi atraktivní komoditou. Důvodů, proč se výroba vodíku stává předmětem zájmu mnoha světových výrobních společností je více: ekonomický zájem, spotřeba vodíku rychle roste. Během příštích tří let se očekává nárůst až 6 % ročně<sup>1</sup>. V horizontu pěti let pak některé zdroje<sup>2</sup> uvádějí roční nárůst až 10 %. V současné době je celková roční spotřeba vodíku asi 50 milionů tun<sup>3</sup>. Téměř 73 % z ní připadá na chemické výroby amoniaku a methanolu, více než 24 % odebírá rafinérský průmysl. Tento podíl stále roste, příčinou je rostoucí váha kladená na ochranu životního prostředí, vodík je využíván k odstranění síry z rafinérských produktů procesem označovaným jako hydrodesulfurizace a ke konverzi těžkých nedestilovatelných podílů ropy na čisté destilovatelné frakce, např. procesem hydrokrakování. Vodík je také využíván k hydrogenační úpravě motorových paliv. Jistá část vodíku je používána v jiných odvětvích průmyslu, např. v průmyslu metalurgickém, elektronickém, farmaceutickém a potravinářském<sup>4,5</sup>.

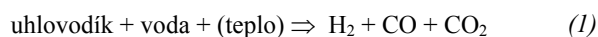
V posledních letech roste zájem o vodík i v automobilovém průmyslu, kde jsou vyvíjeny automobily využívající vodík jako nosič energie. Atraktivní je zejména jeho využití ve spojení s palivovými články. Vodík však může být použit i k modifikaci spalovacích procesů směřujících k zvýšení environmentální účinnosti spalovacích motorů. Tak např. bylo zjištěno, že vodík může snížit emise oxidu uhličitýho ze spalovacích procesů, tzv. dekarbonizaci spalovacích pro-

cesů, přičemž současně vzroste účinnost až o 50 % a klesnou emise NO<sub>x</sub>. Zajímavá informace přichází z automobilového průmyslu – přidání pouhých 5 % vodíku k benzínu či zemnímu plynu způsobí pokles množství škodlivých zplodin o 30–40 % (cit.<sup>6</sup>).

Spolu s rostoucí spotřebou vodíku stoupá rovněž jeho cena a očekává se, že se tento trend udrží i v nejbližší budoucnosti. Uvedené skutečnosti vedly k tomu, že již více než 30 zemí (v čele s Německem, Japonskem a USA) zahájilo výzkum a vývoj vodíkových technologií a mnoho firem zřídilo samostatné vodíkové divize<sup>7</sup>.

#### 2. Způsoby výroby vodíku

Jednou z nejrozšířenějších technologií pro získání vodíku je parní reforming. Tímto procesem je v současné době vyráběno více než 90 % zužitkováváného vodíku<sup>2,4,8–11</sup>. Důvodem je vysoká efektivita procesu a nízké provozní a výrobní náklady. Surovinou pro parní reforming jsou lehčí uhlovodíky, nejčastější surovinou je zemní plyn. Parní reforming je založen na endotermické reakci uhlovodíkové suroviny a vodní páry<sup>3,4</sup>. Tato reakce je vedena při vysoké provozní teplotě za přítomnosti katalyzátoru. V první fázi této technologie je získáván syntézní plyn – směs oxidu uhelnatého a vodíku (1):



Reakce probíhá zpravidla na niklovém katalyzátoru při teplotách nad 800 °C v trubkách reaktoru vyhříváných spalováním topného plynu v reaktorové peci. Aby byla snížena spotřeba tepla a omezeny emise ze spalování topného plynu, jsou vyvíjeny a používány reaktory s vnitřním spalováním části suroviny, tyto reaktory jsou někdy označovány názvem autotermní reforming. Teplo nezbytné k reakci je dodáváno spalováním části suroviny kyslíkem uvnitř reaktoru. Při výrobě syntézního plynu pro výrobu amoniaku je možné část kyslíku nahradit vzduchem v stechiometrickém množství, které odpovídá syntéze amoniaku. Vnitřní spalování umožňuje snížit emise NO<sub>x</sub>.

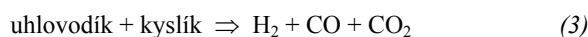
V druhé fázi výroby vodíku je pak oxid uhelnatý v syntézním plynu převeden reakcí s vodní parou na vodík a oxid uhličitý. Tento proces je označován názvem konverze oxidu uhelnatého. Reakce (2) je slabě exotermní.



Suroviny pro parní reforming jsou charakterizovány poměrem H : C. Čím je tento poměr vyšší, tím nižší je produkce odpadního oxidu uhličitýho. Vzhledem k rostoucímu tlaku na snižování emisí CO<sub>2</sub> je proto snaha přecházet k surovinám, které mají tento poměr co nejvyšší. Proto je

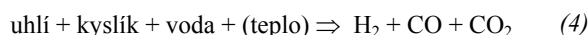
nejběžnější surovinou methan.

Jiným postupem výroby vodíku je proces parciální oxidace ropných frakcí. Postup je využíván k výrobě vodíku z těžkých uhlovodíkových frakcí. Parciální oxidace je nekatalytický proces. Výsledným produktem první fáze – tedy reakce suroviny s kyslíkem, k němuž je jako moderátor přidáváno malé množství vodní páry – je syntézní plyn (3), směs vodíku, oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého.



Oxid uhelnatý je pak tzv. konverzí, tj. reakcí s vodní parou, převeden na vodík a oxid uhličitý. Ačkoliv je provoz reaktoru levnější než u parního reformingu, následná konverze činí tuto technologii celkově nákladnější. Protože podíl vznikajícího oxidu uhličitého je tím vyšší, čím je nižší obsah vodíku v surovině, i v procesu parciální oxidace je zřejmá snaha výrobců na přechod k surovinám s výhodnějším poměrem H : C.

Vodík je možné vyrábět i z uhlí nebo koksu redukcí vody uhlíkem. Proces je označován názvem zplyňování uhlí. Je analogií parciální oxidace těžkých uhlovodíkových frakcí. Základem zplynění je reakce uhlí nebo koksu s kyslíkem a vodou na syntézní plyn (4).



Zplyňování uhlí je procesem, který má velký význam pro ochranu ovzduší, protože umožňuje získat z uhlí s vysokým obsahem síry odsířený topný plyn, který je využitelný k výrobě energie v plynové turbíně. Pokud je syntézní plyn využíván k výrobě vodíku, je v druhém stupni oxid uhelnatý vodní parou převeden na vodík a oxid uhličitý. Oxid uhličitý je oddělen.

Vodík je možné získat izolací z rafinérských odpadních plynů. K izolaci je možné využít tři postupy, které se liší čistotou a výtěžkem vodíku i náklady<sup>10,14</sup>. Všechny tři metody lze rovněž použít pro dočištění již vyrobeného vodíku. Pro získání ultračistého vodíku (99,99+ %) je vhodnou volbou technologie adsorpce při střídání tlaku (PSA – Pressure Swing Adsorption). Základem je využití selektivních sorbentů, které při zvýšeném tlaku adsorbují vodík, který je pak uvolněn snížením tlaku. Pomocí této technologie je možné získat vodík o čistotě až 99,99 % (viz níže). Jedná se o středně nákladný proces. Pro proudy o vyšších tlacích je k získání vodíku vhodná a nejméně nákladná membránová technologie. Tato metoda využívá k rozdělení složek rozdílné prostupové rychlosti složek plynu selektivní membránou. V případě dělení vodíkových směsí je vodík složkou s nejvyšší dostupovou rychlostí. Kryogenní technologie se používá k rozdělení složitých směsí, kdy produktem jsou kromě vodíku především ethylen a propylen. Postup je energeticky náročný, protože je nutné směs chladit na nízké teploty a některé složky zkapalnit. Vedle vodíku jsou získávány i další cenné složky.

Již dlouhou dobu známou metodou výroby vodíku je elektrolyza vody. Je to proces, kdy je voda pomocí dodané elektrické energie štěpena na vodík a kyslík. Účinnost procesu je obvykle vysoká (kolem 85 %) a je možné ji zvýšit přidávkou elektrolytu (např. soli), který zvýší vodivosti vody. Vodík je vedlejším produktem výroby chloru a louhu elektrolyzou. Ve srovnání s předešlými způsoby výroby vodíku je elektrolyza nákladnější technologií. Srovnatelných výrobních nákladů s ostatními procesy lze u elektrolyzy dosáhnout pouze v případě, že je dostupný zdroj velmi levné elektrické energie. Právě na její ceně jsou totiž výrobní náklady elektrolyzy silně závislé.

#### Emise oxidu uhličitého z výroby vodíku a možnosti jejich omezení

Jedním ze sledovaných aspektů výrob vodíku jsou v současné době emise oxidu uhličitého, který je skleníkovým plynem. Oxid uhličitý vzniká jako vedlejší produkt při všech výrobních postupech. Výjimkou zdánlivě představuje výroba elektrolyzou vody. To však platí pouze v případě, že elektrická energie potřebná pro proces není vyráběna spalováním fosilních paliv. V současné době jsou zdrojem takové elektrické energie pouze jaderné a vodní elektrárny. Je-li elektrická energie vyráběna v tepelné elektrárně spalováním fosilních paliv, je při porovnávání emisí oxidu uhličitého nutné brát v úvahu skutečnost, že při výrobě elektrické energie v tepelné elektrárně se do emisí promítá účinnost tepelné elektrárny.

V souvislosti s výrobou vodíku byly a jsou hledány možnosti zneškodnění oxidu uhličitého jiným způsobem, než vypouštěním do ovzduší. Z tohoto hlediska by mohlo být řešení jednodušší u výrob vodíku, při nichž se využívá vnitřní spalování části suroviny (autotermní reforming, parciální oxidace, zplyňování uhlí). Při těchto postupech je totiž oxid uhličitý uvnitř zařízení a bylo by možné jej zneškodnit jednodušeji než oxid uhličitý ve spalínách, který by bylo nutné před zneškodněním nejprve izolovat. Ve světě jsou navrhována různá řešení: uložení do uhelných slojí, do vyčerpaných ložisek ropy nebo zemního plynu či jiných podzemních prostor, využití k zvýšení výtěžnosti ložisek ropy, vedení do hlubinných mořských proudů, využití jako suroviny pro výrobu syntézního plynu reakcí s methanem<sup>12,13</sup>. Všechna uvedená řešení jsou zatím příliš drahá.

### 3. Použití vodíku

Zatímco v roce 1999 činila spotřeba vodíku necelých 41 mil. tun, v současnosti už dosáhla 50 mil. tun ročně<sup>2,3</sup>. Téměř 97 % z vyráběného množství vodíku je zužitkováváno v chemických výrobcích, tj. v produkci amoniaku (cca 63,1 %), methanolu (cca 9,3 %), a v rafinérském průmyslu (cca 24,3 %)<sup>2</sup>. Zbývající malé množství vodíku využívají jiná průmyslová odvětví, jako jsou např. metalurgický, elektronický, potravinářský či farmaceutický průmysl<sup>4,5</sup>. Zajímavý je fakt, že v USA se využívá téměř shodné množství

Tabulka I  
Struktura spotřeby vodíku (v %) ve vybraných státech

Způsob užití	USA	Japonsko	Zbytek světa
Chemické výroby (čpavek, methanol)	53,5	21,2	85,9
Rafinérský průmysl	41,9	68,6	14,1
Ostatní odvětví	4,6	10,2	≈ 0,0

vodíku v chemických výrobcích jako v rafinériích, v Japonsku dokonce rafinérský průmysl chemické výroby ve spotřebě vodíku daleko předčí (tabulka I). Struktura využití vodíku souvisí s úrovní rafinérského průmyslu a se spotřebou motorových paliv v zemi. V zemích s vyspělým rafinérským průmyslem a v zemích s vysokou spotřebou motorových paliv je velký podíl výroby vodíku používán pro odsíření motorových paliv, pro hydrogenační úpravu motorových paliv (hydrogenací nenasycených sloučenin) a hluboké zpracování ropy. Dá se očekávat, že nastíněný trend se zanedlouho promítne i v ostatních zemích, že tedy spotřeba vodíku pro hydrogenační úpravy motorových paliv, odsíření a hydrokrakování těžkých ropných frakcí postupně poroste.

#### 4. Perspektiva vývoje technologie výroby vodíku

Nárůst poptávky po vodíku a růst spotřeby vodíku nutí výrobce reagovat na tento trend úpravou zařízení a jeho režimu. Cíle úprav zařízení je možné shrnout do těchto bodů<sup>9</sup>:

- zvýšení kapacity výroby vodíku,
- zvýšení flexibility výrobních jednotek k používané surovině. Obecně lze konstatovat, že trendem v současné době je odklon od surovin s nízkým poměrem H:C. To souvisí rovněž s otázkou emisí CO<sub>2</sub>, jehož likvidaci bude nutné řešit,
- zvýšení energetické účinnosti výrobních jednotek a jejich modernizace.

Protože parní reforming je nejrozšířenější technologií výroby vodíku, právě na jeho vývoji se nejvíce odráží snaha o intenzifikaci a zefektivnění výrobního procesu. Mezi způsoby, jak toho dosáhnout, je mimo jiné snížení podílu pára/surovina. Na výrobu pomocné technologické páry je totiž nutné vynaložit velký podíl tepla spotřebovaného v procesu. Jinou možností je instalace tzv. předřazeného reformingového reaktoru před výrobní linku. V tomto reaktoru je využíváno zjevné teplo vstupující suroviny jako reakční teplo. Analogicky jsou hledány cesty, jak zlepšit proces výroby vodíku parciální oxidací ropných frakcí. Jednou z možností je využití katalyzátoru v procesu parciální oxidace s cílem snížit procesní teplotu a snížit tak výrobní náklady.

Racionalizační úsilí se dále soustřeďuje na zlepšení

metod oddělování vodíku z reakčních směsí. Jednou z možností je zdokonalení metod PSA – separace vodíku v adsorpčních jednotkách se střídáním tlaku<sup>8</sup>.

Je nepochybné, že nejčistším zdrojem vodíku je elektrolyza, pokud ovšem je potřebná elektrická energie vyráběna jinak než spalováním fosilních paliv, tj. např. v atomových elektrárnách, ve vodních, solárních nebo větrných elektrárnách. Očekává se, že i účinnost elektrolyzy postupně vzroste ze současných 85 % až na 95 % v roce 2050. Vývoj zdrojů výroby elektrické energie z jiných zdrojů než jsou teď známy, např. s využitím termonukleární energie, je věcí daleké budoucnosti, kterou je obtížné odhadnout.

#### 5. Perspektiva využití vodíku

##### 5.1. Použití vodíku v petrochemickém průmyslu

Vodík patří k nejdůležitějším meziproductům petrochemického průmyslu. Jak již bylo zmíněno v úvodu, spotřeba vodíku rychle roste. Zatímco její nárůst se v horizontu tří let očekává na úrovni 6 % ročně, v pětiletém horizontu má tento nárůst činit až 10 % (cit.<sup>1,2</sup>). Výroba vodíku by mohla sehrát roli i ve využití obnovitelných zdrojů, např. vodních elektráren, větrných elektráren a slunečních baterií. Předpokládá se, že v roce 2050 by 16 % primární energie měly obstarat právě obnovitelné zdroje<sup>15</sup>. Dá se konstatovat, že vzhledem k měnící se struktuře spotřebitelů není tento odhad nijak nadnesený. Očekává se, že v nejbližší době neporoste spotřeba vodíku v oblastech petrochemických výrob, tj. spotřeba na výrobu methanolu a amoniaku (tabulka II). Poroste spotřeba vodíku v rafinérském průmyslu (odsířování paliv, hydrogenační procesy) stejně jako v ostatních odvětvích, zejména v energetickém a automobilovém průmyslu<sup>4</sup>. Vodík bude tedy jedním z prodejných produktů petrochemického průmyslu.

Tabulka II  
Předpokládaný růst spotřeby vodíku (v %) v jednotlivých odvětvích

Chemické výroby (čpavek, methanol)	Rafinérský průmysl	Ostatní odvětví
0	5–7	4–6

##### 5.2. Použití vodíku jako motorového paliva

Vodík může být využit jako pohonná hmota třemi způsoby:

- jako palivo ve spalovacích motorech, a to samotný, nebo v kombinaci s benzinem nebo methanem,
- jako zdroj energie pro motory s palivovými články<sup>7</sup>,

– jako zdroj energie pro hybridní motory schopné využívat jak vodík pro palivové články, tak jiná paliva.

Asi nejatraktivnějším způsobem využití vodíku pro pohon automobilů je vodíkový palivový článek. Palivový článek je elektrochemické zařízení, které pracuje na opačném principu než elektrolýza vody: vstupující vodík a kyslík se slučují na vodu, přičemž se uvolňuje elektrická energie<sup>16</sup>. Protože palivový článek pracuje bez spalování, jedná se skutečně o zcela „čistý“ zdroj energie. Výhodou palivových článků je skutečnost, že jsou schopny energii vyrábět kontinuálně. Palivový článek je zajímavou alternativou pohonu automobilů, proto se jimi v poslední době zabývají přední výrobci vozidel. Důvodů je hned několik:

- získává se „čistá“ energie, kdy výstupem z palivového článku je pouze voda, elektrická energie a teplo. Palivový článek totiž nevyžaduje žádné mazací oleje, neodehrává se v něm žádné spalování, které by vedlo ke vzniku oxidů dusíku,
- palivové články mohou mít vysokou účinnost, která se pohybuje kolem 40 %, zatímco účinnost běžných diesellových motorů je na úrovni 25–32 % (cit.<sup>17</sup>),
- články nemají žádné pohyblivé části, jsou spolehlivými a téměř nehluknými zdroji energie (pohyblivé součásti mají ovšem ostatní součásti motoru).

### 5.3. Praktické aspekty využití vodíku jako motorového paliva

Vývoj automobilů ve vyspělých státech je ovlivněn snahou snížit nebezpečnost výfukových plynů a snížit emise oxidu uhličitého. Např. nová legislativa státu Kalifornie a dalších států USA předpisuje, že od roku 2003 musí být 10 % automobilů bezemisních, tzv. „zero-emission vehicle“<sup>5,7</sup>. Jednou z možností, jak toho dosáhnout, je pohánět vozy právě vodíkovým palivovým článkem. Automobilové koncerny, které na vývoji tohoto typu automobilů pracují, jsou kvůli konkurenci dosti skoupé na informace. První vozy na palivový článek se již na trhu objevily, zatím jsou však příliš drahé. V následujících letech bude jistě následovat rychlý rozvoj ve výrobě a uvádění takto poháněných automobilů na trh. V roce 2010 by mělo jezdit po silnicích až 11,4 mil. automobilů tohoto typu (jejich spotřeba vodíku by činila 34 000 t vodíku/ za den)<sup>16,18,19</sup>. Je nutné podotknout, že první autobusy poháněné vodíkovým palivovým článkem již jezdí po silnicích od roku 1997. V roce 2010 má jejich počet vzrůst na 22 000 (spotřebují cca 400 t vodíku za den)<sup>18</sup>. O tom, že vodíkový palivový článek je vhodným kandidátem pro pohon automobilů, hovoří fakt, že se jeho užitím v této oblasti zabývají přední výrobci vozidel, jako jsou Daimler-Benz, Chrysler, Mercedes, Mazda, Honda, Toyota, General Motors, Ford Motor Co. a jiné.

Vodík jako motorové palivo pro pohon motorových vozidel má jednu zásadní přednost, nezávisle na tom, zda je použit jako palivo ve vznětovém motoru nebo jako palivo pro palivový článek. Produktem spalování vodíku je voda, nevznikají tedy škodlivé uhlíkaté zplodiny jako oxid uhelnatý, aldehydy, kyseliny a další látky. Při použití vodíku jako

paliva ve vznětovém motoru mohou ovšem vznikat oxidy dusíku. Pro praktické využití vodíku jako motorového paliva je však nutné řešit praktické problémy, vytvoření infrastruktury zásobování vodíkem (systém čerpadel), vyřešit způsob skladování vodíku v automobilu, případně návaznost využití vodíku na existující park vozidel a existující infrastrukturu zásobování motorovými palivy.

Pro řešení uvedených problémů bylo vypracováno více alternativ, z nichž některé se mohou jevit jako technicky neschůdné:

- Varianta I. Instalovat ve vozidlech reformingový reaktor, který by umožňoval výrobu vodíku z běžných uhlovodíkových zdrojů přímo ve vozidle. Vozidlo by tedy tankovalo běžné druhy paliv (benzin nebo metan), což znamená, že by nebylo nutné vytvářet novou infrastrukturu zásobování vodíkem. Řešení je však spojeno s mnoha nevyřešenými problémy, neeliminuje emise, je to tedy nepravděpodobná varianta. Přesto se někteří výrobci automobilů vydávají právě touto cestou, příkladem může být firma Daimler-Benz a jejich sedan NECAR III. Důvodem je nepochybně snaha o co nejrychlejší proniknutí na trh. Výhodou je možnost využít existující síť zásobování motorovými palivy.
- Varianta II. Instalovat v automobilech nádrž na vodík. Tato varianta s sebou přináší nutnost vybudování vodíkové infrastruktury, což se zatím ukazuje jako dlouhodobá záležitost.

## 6. Budování infrastruktury zásobování vodíkem

Pro řešení je nutné vyřešit otázku výroby, přepravy a vlastního uskladnění vodíku. Na první dvě otázky je možné hledat odpověď mezi následujícími řešeními<sup>11,18,20</sup>.

### Centrální jednotka výroby vodíku

Vodík bude vyráběn v centrálním závodě (zatím asi z petrochemických surovin). Bude přepravován do rozvodných stanic jako kapalný v přepravných kontejnerech či jako plyn potrubím. V případě dopravy potrubím by náklady na vybudování infrastruktury byly až o 50 % vyšší, než je tomu v případě potrubí pro zemní plyn (je nutné použít odolnou ocel, průměr potrubí musí být o 20 % větší, aby bylo dosaženo stejné průtokové rychlosti), stejně jako by byla nákladnější jeho instalace (vzhledem k speciálním podmínkám na svařování)<sup>11</sup>. Celkově se dá předpokládat, že by náklady na vybudování vodíkového potrubí byly o 40 % vyšší než potrubí pro zemní plyn.

Přes uvedená fakta se dá konstatovat, že na dlouhé vzdálenosti a pro větší množství vodíku je tento způsob distribuce vhodnější než přeprava kapalného vodíku kontejnery. Ty jsou v současnosti dimenzovány pro přepravu 35 až 60 m<sup>3</sup> vodíku silniční, železniční či lodní dopravou. Pro začlenění tohoto způsobu dopravy vodíku do vodíkové infrastruktury by však bylo nutné uvažovat o válcovitých kontejnerech o objemu 270–600 m<sup>3</sup>.

### Centrální jednotka parního reformingu či parciální oxidace zemního plynu

Syntézní plyn bude potrubím rozváděn do distribučních stanic. Teprve tam by nastala následná konverze syntézního plynu vodní parou za vzniku vodíku a oxidu uhličitého.

### Klasický rozvoz zemního plynu či benzínu

Suroviny by byly přepravovány do rozvodných stanic, kde by byly podrobeny parnímu reformingu nebo parciální oxidaci. Vzniklý syntézní plyn by byl reakcí s vodní parou převeden na vodík a oxid uhličitý.

Obecně připadají v úvahu všechny varianty řešení. Při jejich posuzování je nutné přihlížet mimo jiné také k žádané produkci vodíku. Je nutné si uvědomit, že u všech variant je nutné řešit problém, jak naložit se vznikajícím CO<sub>2</sub>.

### Skladování vodíku

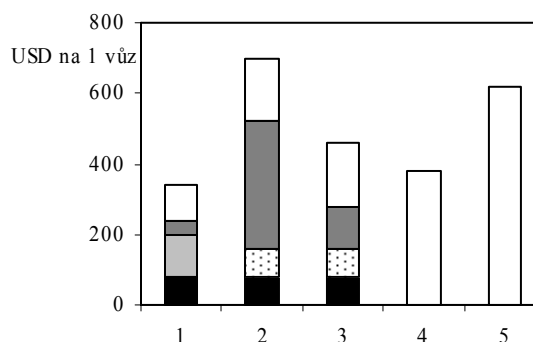
Klíčovou otázkou ve vývoji vodíkové infrastruktury zůstává bezpečné uskladnění vodíku. V praxi se používá několik metod skladování vodíku.

Potenciálně nejúčinnější metodou je skladování ve formě hydridů. Jedná se o chemické sloučeniny vodíku s jinými materiály. Hustota uskladnění vodíku je v případě hydridů vyšší než v případě kapalného či plynného vodíku. Protože se jedná o velmi bezpečnou variantu skladování vodíku (není potřeba vysoký tlak), je tato metoda vhodná rovněž pro uskladnění vodíku přímo v automobilech<sup>17</sup>. Zároveň je nutné si však uvědomit, že čas potřebný pro plnění automobilu je poměrně dlouhý (10–20 min) a metoda skladování je dosti nákladná<sup>11</sup>.

Varianta skladování kapalného vodíku je sice schůdná, jedná se však o velmi složitou záležitost. Vodík totiž musí být ochlazen na –253 °C. Proces ochlazení a komprese při tom znamená až 30% ztrátu energie, kterou kapalný vodík v sobě uchovává<sup>11</sup>. Sečteme-li náklady na proces převedení plynného vodíku do kapalné fáze a náklady na výstavbu tepelně izolovaných nádrží, pak skladování vodíku v kapalné formě se stává velmi drahou záležitostí v porovnání s ostatními možnostmi skladování.

Energetická náročnost skladování stlačeného plynného vodíku je nižší než v předchozí alternativě. V současné době jsou stále ještě dosti vysoké náklady na výrobu vysokotlakých nádrží, také náklady na kompresi jsou dosti vysoké, a proto i tato varianta představuje drahý způsob skladování vodíku. Přes tuto skutečnost se však jedná o variantu nejčastěji používanou. Použití této metody pro automobily zvyšuje nároky na bezpečnost provozu. Výhodou této metody je to, že plnění vodíkem probíhá velmi rychle a nádoba na uskladnění 3,9 kg vodíku (s nímž je automobil střední třídy schopen ujet kolem 600 km) zatíží vůz méně než 40 kg (cit.<sup>11</sup>).

Výzkum nových možností, jak vodík uskladnit, nabízí



Obr. 1. **Struktura nákladů na vybudování infrastruktury zásobování vodíkem;** osa x: 1 – centrální parní reforming zemního plynu, kontejnerová doprava, 2 – centrální parní reforming zemního plynu, potrubní doprava H<sub>2</sub> (nízká hustota), 3 – centrální parní reforming zemního plynu, potrubní doprava H<sub>2</sub> (vysoká hustota), 4 – lokální parní reforming zemního plynu, 5 – lokální elektrolýza  
 □ plnicí stanice, ▒ doprava, ▨ komprese + skladování, ◻ zkvalnění, ■ výroba H<sub>2</sub>

jeho skladování v uhlíkových materiálech, ve formě nanostruktur (mikroskopické dutinky o průměru 2 nm), či v drobných dutých skleněných mikrosférách.

### Struktura nákladů na zajištění zásobování vodíkem

Při odhadu nákladů na vybudování infrastruktury je nutné uvažovat všechny její složky, jako je výroba vodíku, doprava, skladování či náklady na provoz plnicích stanic<sup>11</sup>. Podle dostupných informací se jeví jako pravděpodobná varianta, že se bude vodík v automobilech přímo skladovat. Tato skutečnost znamená nákladné vybudování vodíkové infrastruktury zajišťující vytvoření systému plnicích stanic. Výroba vodíku v petrochemických závodech a doprava vodíku jsou již zvládnutými procesy. Pro vytvoření infrastruktury bude nutné dořešit skladování vodíku v čerpacích stanicích a bezpečné skladování v automobilových nádržích. Výhodou této alternativy je to, že je vodík vyráběn v centralizovaných petrochemických výrobnách, kde je možné dosáhnout vysoké úrovně regenerace tepla a ochrany životního prostředí. Příklad struktury nákladů je uveden na obr. 1.

## 7. Závěr

Na závěr lze konstatovat, že spotřeba vodíku ve světě v poslední době radikálně stoupla a i do budoucna je reálný předpoklad, že tento trend bude trvat. Úroveň spotřeby vodíku odráží úroveň průmyslu zpracování ropy a průmyslu petrochemického a úroveň péče o životní prostředí, protože vodík je využíván zejména na odsiřování paliv a na transformaci sirných topných olejů na ušlechtilá odsiřovaná paliva. Příčinou růstu poptávky po vodíku není ale jen vyšší spotřeba vodíku v rafinářském průmyslu, která souvisí se zvýše-

ním významu výroby odsířených zušlechtěných paliv, ale i perspektiva využití vodíku jako motorového paliva šetrného k životnímu prostředí. I když je použití vodíku jako motorového paliva zatím jen ve vývoji, všichni významní výrobci automobilů se připravují na situaci, kdy bude žádáno dodávat na trh automobily využívající jako palivo vodík.

## LITERATURA

1. Chemical Market Reporter 2001.
2. Parkinson G.: Chem. Eng. 108, 29 (2001).
3. Stoll R. E., Linde F.: Hydrocarbon Process 79, 42 (2000).
4. Olimpia Loiacono, Technip KTI SpA, Italy: Hydrocarbon Eng. 2001, 45.
5. Straka F.: Plyn LXXVIII, 184 (1998).
6. Hydrogen Energy. Energy Fact Sheet, National Energy Education Development Project.
7. Raman V.: Chem. Ind. 1997, 771.
8. Davis R. A., Garodz L. J., Patel N. M.: Hydrocarbon Eng. 6, 91 (2001).
9. Ratan S.: Hydrocarbon Eng. 5, 64 (2000).
10. Morris P.: European Fuels Week. Meeting, Sicily, 11–13 April 2000.
11. Ogden J. M.: Annual review of Energy and the Environment, 1999.
12. Ruckenstein E., Hu H. Y.: Chem. Innovation 2000, 39.
13. Zhu J., Zhang D., King K. D.: Fuel 80, 899 (2001).
14. Davis R. A., Garodz L. J., Patel N. M.: Hydrocarbon Eng. 6, 55 (2001).
15. Wurster R., Zittel W.: Workshop „Energy technologies to reduce CO<sub>2</sub> emissions in Europe: prospects, competition, synergy“, April 11–12<sup>th</sup>, 1994.
16. Tullo A. H.: Chem. Eng. News 79, 19 (2001).
17. Raman V.: Oil Gas J. 97, 54 (1999).
18. Chohey N. P.: Chem. Eng. 108, 37 (2001).
19. Dunn S.: Worldwatch Paper 157, Hydrogen Futures: Toward a Sustainable Energy System, August 2001.
20. Bauquis P. R.: Erdoel Erdgas Kohle 117, 89 (2001).  
Redakční komentář k práci

Redakční kruh časopisu si velice cení skutečnosti, že může čtenářům nabídnout práci specialistů z oboru petrochemie o využití vodíku v budoucnosti. Informace v tomto oboru je účelná. V některých pořadech televize, v denním tisku i některých populárních časopisech je někdy vyvolávána neoprávněná iluze, že použití vodíku jako motorového paliva může vyřešit nyní tak často diskutované problémy globálního oteplování klimatu emisemi oxidu uhličitého. Využití vodíku může řešit lokální problémy čistoty ovzduší, tedy např. ovzduší v ulicích měst. Nemůže však řešit problém emisí oxidu uhličitého a s ním spojené riziko globálního oteplování vlivem růstu intenzity skleníkového efektu. Informovat o tom odbornou veřejnost je tedy účelné.

Jak je zřejmé z článku, současné metody výroby vodíku jsou spojeny s emisemi oxidu uhličitého. Na 1 t vodíku odpadá až 10 t oxidu uhličitého.

#### **I. Palmová and J. Schöngut (Chemopetrol Co., Litvinov): Outlook of Production and Utilization of Hydrogen**

The following technological processes for hydrogen manufacture are reviewed and compared: steam reforming of methane and light oil fractions, partial oxidation of heavy oil fractions, coal gasification by reaction with oxygen and steam, isolation of hydrogen from refinery gases and electrolysis of water. Trends and outlook of hydrogen consumption are analysed and growing demands for hydrogen production in coming years are predicted. In the second part technical problems associated with utilisation of hydrogen as motor fuel, both in internal combustion engines and fuel cells, are discussed.