



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 1

Úvod do vodíkové bezpečnosti pro zásahové jednotky

ÚROVEŇ IV

Důstojník specialista

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň **Důstojník specialista** a vyšší.

Toto téma je k dispozici také na úrovni I (Hasič).

Tato přednáška je součástí balíčku školicích materiálů s materiály na úrovních I–IV: Hasič, velitel posádky, velitel zásahu a důstojník specialista. Viz úvod k přednášce týkající se kompetencí a očekávaných výsledků studia

Poznámka: tyto materiály jsou majetkem konsorcia HyResponder a měly by být podle toho uváděny, výstupy HyResponse byly použity coby základ





Upozornění

Navzdory pečlivosti, která byla věnována přípravě tohoto dokumentu, platí následující odmítnutí odpovědnosti: informace v tomto dokumentu jsou poskytovány, jak stojí a leží, a jejich autoři neposkytují jakoukoli záruku, že tyto informace jsou vhodné pro jakýkoli konkrétní účel. Uživatel využívá tyto informace na vlastní nebezpečí a odpovědnost.

Dokument vyjadřuje pouze názory autorů. Společný podnik pro palivové články a vodík a Evropská unie nenesou žádnou odpovědnost za případné použití informací uvedených v tomto dokumentu.

Poděkování

Projekt byl financován Společným podnikem pro palivové články a vodík 2 na základě grantové dohody č. 875089. Společný podnik získává podporu z programu Evropské unie pro výzkum a inovace Horizont 2020 a z Velké Británie, Francie, Rakouska, Belgie, Španělska, Německa, Itálie, Česka, Švýcarska a Norska.

Souhrn

Tato přednáška obsahuje popis zavedení vodíkové bezpečnosti pro zásahové síly. Vodík se již dlouhou dobu hojně používá v průmyslu jako stlačený plyn nebo ve zkapalněné formě. Vodík není více nebo méně nebezpečný než jiná běžná paliva, ale je jiný, má své specifické vlastnosti a s nimi související rizika. Rostoucí využívání aplikací FCH vyžaduje hluboké pochopení procesů, nebezpečí a rizik, bezpečnostních prvků a koncepcí, jakož i odborně vyškolený personál pro bezpečné řešení případných incidentů nebo havárií. To vše vyžaduje významnou změnu kultury bezpečnosti, zejména u členů zásahových sil, kteří budou jako první řešit nouzové situace, jež mohou zahrnovat tlakový nebo zkapalněný vodík, a to jak uvnitř, tak venku, v městských obytných oblastech, na silnicích, v přírodě a v mnoha dalších různých prostředích.

Tato přednáška obsahuje přehled systémů a infrastruktury FCH. Jsou v ní zvažena potenciální nebezpečí, rizika, bezpečnostní opatření a koncepce spojené se stacionárními i přepravními aplikacemi FCH. Obsahuje rovněž přehled hlavních způsobů využití vodíku, hlavních výrobních metod, možností skladování a způsobů distribuce. Dále jsou diskutovány též hlavní zásady vodíkového bezpečnostního inženýrství.

Projekt HyResponse je všeobecně uznáván, protože zde prezentované materiály staví na původní sérii přednášek HyResponse (<http://www.hyresponse.eu>).

Klíčová slova

Palivové články, vodík, výroba, skladování, použití, vodíková bezpečnost, e-Laboratoř

Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova.....	3
1. Cílové publikum.....	6
1.1 Popis úlohy: Specialista.....	6
1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Specialista.....	6
1.3 Předchozí učení: Specialista.....	6
2. Úvod, rozsah a cíl.....	6
3. Přehled způsobů výroby, skladování a průmyslového využití H ₂	8
3.1 Výroba vodíku.....	8
3.1.1 Elektrolyza vody.....	8
3.1.2 PEM elektrolyzéry.....	8
3.1.3 Alkalické elektrolyzéry.....	10
3.1.4 Technologie reformování.....	13
3.1.5 Ostatní technologie.....	14
3.1.6 Decentralizovaná výroba vodíku.....	15
3.2 Skladování vodíku.....	15
3.3 Průmyslové využití vodíku.....	17
4. Vozidla FC.....	18
4.1 Klíčové vlastnosti vozidel FC.....	18
4.2 Vozidla na palivové články.....	19
4.2.1 Systém pro skladování vodíku.....	20
4.2.2 Systém dodávky vodíkového paliva.....	20
4.2.3 Systém palivových článků.....	21
4.2.4 Elektrický pohon a systém řízení výkonu.....	21
4.2.5 Bezpečnostní prvky a koncepce.....	21
4.3 Autobusy FC.....	23
4.4 Vysokozdvížné vozíky FC.....	26
4.5 Letectví.....	27
4.5.1 Vodík jako pohonná hmota.....	29
4.5.2 Vodíkové palivové články pro aplikace v leteckém průmyslu.....	30
5. Přeprava vodíku.....	32
5.1 Těžká nákladní vozidla (HGV).....	32
5.1.1 Plynová nákladní vozidla.....	32



5.1.2	Nákladní automobily pro převoz kryogenních kapalin.....	34
5.2	Železnice	35
5.3	Potrubí.....	36
6.	Stacionární aplikace	40
6.1	Systémy kombinované výroby elektřiny a tepla (CHP).....	40
6.2	Výroba záložní energie.....	40
7.	Námořní aplikace	42
8.	Vodíkové systémy skladování energie	46
9.	Přehled nehod a havárií	50
9.1	Nehody a havárie v systémech a infrastruktuře FCH.....	50
9.2	Havárie při výrobě vodíku.....	51
9.3	Nehoda na čerpací stanici.....	52
10.	Úvod do rámce a norem vodíkového bezpečnostního inženýrství	52
11.	Úvod do e-Laboratoře.....	56
11.1	Vědecké principy	57
11.1.1	Nezapálená uvolnění.....	57
11.1.2	Zákon podobnosti.....	57
11.1.3	Vliv vztlaku.....	58
11.1.4	Pokles tlaku.....	59
11.1.5	Pasivní ventilace	60
11.1.6	Nucená ventilace.....	61
11.1.7	Jev tlakové špičky	61
11.1.8	Vzdálenost nebezpečí tryskového požáru.....	62
11.1.9	Zmírnění deflagrace	63
11.1.10	Tlaková vlna a ohnivá koule po protržení nádrže při požáru.....	64
11.2	Shrnutí e-Laboratoře.....	64
	Literatura a odkazy	65



1. Cílové publikum

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň Důstojník specialista a vyšší. Tato přednáška je k dispozici také na úrovni I: Hasič.

Níže je uveden popis úlohy, úrovně odborné způsobilosti a očekávané znalosti na úrovni důstojníka specialisty.

1.1 Popis úlohy: Specialista

Specialisté pomáhají veliteli zásahu radou, řízením a dohledem nad technickými operacemi, které zahrnují využití znalostí, dovedností nebo vybavení souvisejícího s konkrétním rizikem nebo činností při zásahu. Typické události se týkají nebezpečných materiálů, dopravních prostředků, klimatických jevů, narušení konstrukcí a logistiky záchranných prací.

1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Specialista

Vědecký, technický a empirický základ v dané oblasti s dovednostmi rozšířenými o zkušenosti, které umožňují aplikovat tyto informace a znalosti interpretovaným a užitečným způsobem tak, aby velitel zásahu a ostatní členové jednotek prvotního zásahu pod vedením specialisty mohli účinně a bezpečně reagovat na stav nouze.

1.3 Předchozí učení: Specialista

EQF 5 Komplexní, specializované, faktické a teoretické znalosti v oboru práce nebo studia a povědomí o mezích těchto znalostí. Ucelená řada kognitivních a praktických dovedností potřebných k rozvoji tvůrčích řešení abstraktních problémů. Výkon řízení a dohledu v kontextu pracovních nebo studijních činností, kde dochází k nepředvídatelným změnám; přezkum a rozvoj dovedností vlastních i ostatních spolupracovníků.

2. Úvod, rozsah a cíl

Na současném trhu jsou k dispozici aplikace palivových a vodíkových článků (FCH) jak v dopravě, tak v energetice, a je poměrně pravděpodobné, že v blízké budoucnosti budou síly prvního zásahu řešit možné nehody/havárie. Vývoj technologií FCH vyžaduje lepší a hlubší pochopení nebezpečí, rizik, procesů a bezpečnostních prvků souvisejících se systémy a infrastrukturou FCH ze strany sil prvního zásahu. Výroba vodíku elektrolýzou a reformováním zemního plynu, decentralizované aplikace výroby vodíku, skladování plynného a zkapalněného vodíku, aplikace pro přepravu vodíku a manipulaci s materiálem, vozidla FC (např. automobily, autobusy, vysokozdvížné vozíky), vodíkové čerpací stanice, stacionární aplikace FC, systémy skladování energie na bázi vodíku jsou doposud pro členy prvních zásahových sil z větší části neznámé. Kromě toho chybí standardizované postupy pro zásahy v případě nehod nebo havárií ve výše uvedených systémech a prvcích infrastruktury.

Cílem této přednášky je seznámit členy zásahových sil s řadou aplikací FCH, přiblížit jim specifická rizika a nastínit hlavní přístupy k bezpečnosti vodíkových technologií. Zásahové



síly by si měly uvědomit, že vodík není více nebo méně nebezpečný než jiné běžné palivo. Vodík je jiný a znalost jeho specifických vlastností usnadní přijímání vhodných rozhodnutí na místě nehody. Zásahové jednotky by měly být odborně vyškoleny pro práci s vodíkovými systémy při tlaku až 100 MPa a teplotách až $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ (zkapalněný vodík), a to jak ve venkovním prostředí, tak v interiérech.

Tato přednáška je první z ucelené série a navazuje na materiály vytvořené a přednesené v rámci projektu HyResponse (<http://www.hyresponse.eu/>). V rámci (<http://www.hyresponse.eu/curriculum.php>) byl poprvé vytvořen mezinárodní výukový plán pro školení v oblasti vodíkové bezpečnosti pro členy jednotek prvního zásahu. Jednalo se o první krok k vytvoření Evropské platformy pro školení v oblasti vodíkové bezpečnosti pro členy jednotek prvního zásahu. Tento výukový plán byl dále rozpracován v rámci projektu HyResponder (<https://hyresponder.eu>) tak, aby odrážel současný stav techniky, a byl současně rozšířen o další podrobnosti týkající se zkapalněného vodíku, uzavřených prostor, tlakových nádob atd.

Frekventantům se doporučuje, aby tento dokument používali jako pomůcku při samostatném studiu a aby si aktivně vyhledávali zdroje dalších informací.

Na konci této přednášky bude člen zásahové jednotky / frekventant schopen:

- rozlišit technologické novinky a rozsah technologií FCH v moderní společnosti,
- pochopit úlohu vodíku jako nového energetického nosiče,
- vyjmenovat hlavní způsoby výroby, přepravy, dodávky a využití vodíku,
- rozpoznat obtíže, s nimiž se setkává veřejnost při vnímání vodíkových technologií a technologií palivových článků,
- definovat hlavní metody průmyslové výroby vodíku; ačkoli tato přednáška není určena k tomu, aby posluchačům zprostředkovala hluboké znalosti všech výrobních metod, podává popisný nástin postupu při použití reformování, PEM (protonová výměnná membrána) a alkalických elektrolyzérů s důrazem na bezpečnostní prvky a koncepce,
- popsat princip fungování palivového článku (FC) a svazku palivových článků,
- vysvětlit provozní zásady a bezpečnostní aspekty řady aplikací FCH, včetně vozidel s FC, čerpacích stanic, stacionárních zásobníků vodíku, aplikací pro manipulaci a distribuci vodíku, záložní výroby energie a systémů FC pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny,
- uvést příklady nehod a havárií, ke kterým by mohlo dojít v aplikacích FCH,
- poskytnout vhled do rámce vodíkového bezpečnostního inženýrství,
- mít povědomí o e-Laboratoři pro bezpečnost vodíku,



- vypracovat základní podmínky/parametry důležité pro bezpečnost v různých scénářích.

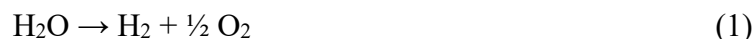
3. Přehled způsobů výroby, skladování a průmyslového využití H₂

3.1 Výroba vodíku

Molekuly vodíku se v přírodě v čisté formě nevyskytují. Vodík se tedy musí vyrábět ze sloučenin, v nichž je obsažen, například z vody, metanu, metanolu, čpavku, etanolu, biomasy atd. Výrobu vodíku lze rozdělit do dvou kategorií: centralizovaná, velkoobjemová výroba a decentralizovaná, maloobjemová nebo středněobjemová výroba. Centralizovaná výroba se týká zavedených velkých chemických závodů, které hromadně vyrábějí vodík, jenž je následně přepravován k zákazníkům. V tomto případě se vodík přepravuje, někdy na velké vzdálenosti, potrubím, po silnici, nebo lodní dopravou. Příkladem mohou být velké parní reformátory ve vlastnictví velkých plynárenských společností, jako jsou Air Liquide, Linde, Air Products a další. V současné době je na trhu k dispozici několik zavedených technologií pro průmyslovou výrobu vodíku. Existují dva komerční způsoby výroby vodíku: elektrolýza vody (již přibližně od konce roku 1920) a technologie reformování (zavedená v roce 1960).

3.1.1 Elektrolýza vody

Elektrolýza vody je proces, při kterém se voda štěpí na vodík a kyslík pomocí elektrické energie podle rovnice (1):



Tento proces probíhá v elektrolyzáru, který přeměňuje elektrickou energii na energii chemickou a lze jej považovat za zařízení, které funguje opačně než palivový článek (FC). Elektřina může pocházet z různých zdrojů a v závislosti na nich může elektrolýza probíhat buď s emisemi oxidu uhličitého CO₂, nebo bez nich. Pokud je elektřina vyráběna z obnovitelných zdrojů (větrná, vodní, solární nebo přílivová energie), nevznikají při výrobě vodíku emise CO₂, pokud je vyráběna z fosilních paliv, vznikají emise CO₂ (ačkoli vzdálené). Vyrobený plyný vodík je velmi čistý a lze jej využít buď okamžitě, nebo uskladnit k pozdějšímu využití. Kapacita elektrolyzáru se pohybuje od méně než 500 m³/h do více než 3,3×10⁵ m³/h. Elektrolyzáru obsahuje dvě elektrody (kladnou a zápornou), vodu a elektrolyt, tj. látku obsahující volné ionty, které z této látky činí elektrický vodič. K rozkladu vody dochází při průchodu elektrického proudu mezi dvěma elektrodami v elektrolytickém článku. Na záporné elektrodě (katodě) vzniká vodík a na kladné elektrodě (anodě) kyslík.

3.1.2 PEM elektrolyzáry

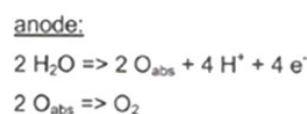
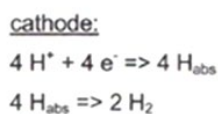
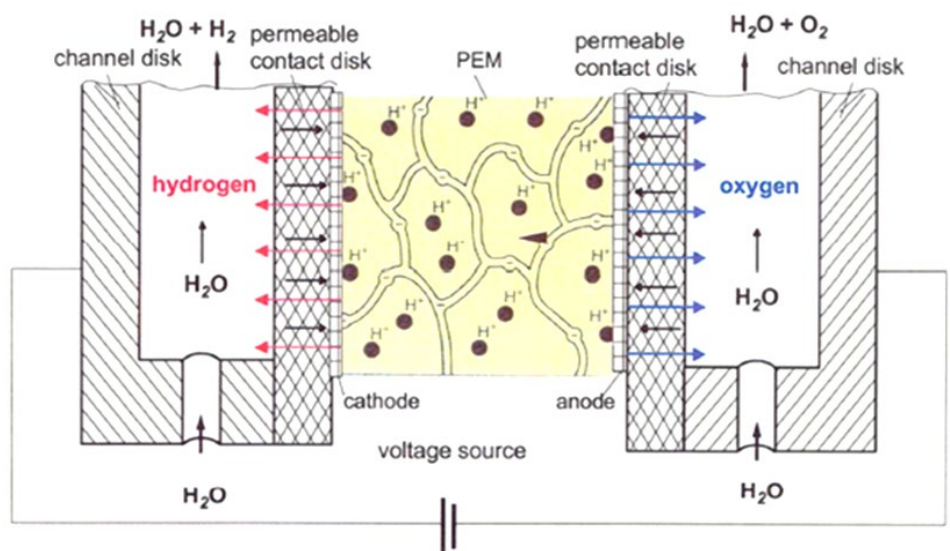
Pokud elektrolýza probíhá ve dvou komorách, které jsou odděleny protonovou výměnnou membránou (PEM), jedná se o tzv. PEM elektrolyzáry. Působením stejnosměrného proudu

(DC) voda disociuje na vodík (H_2) na záporné elektrodě a kyslík (O_2) na kladné elektrodě (obrázek 1). Elektrody a membrána obvykle tvoří sestavu membránové elektrody (MEA) a svazek podobný svazkům palivových článků. Plyny se shromažďují v rekuperačních nádobách. PEM elektrolyzéry pracují při nízkých teplotách a jako elektrolyt slouží PEM. Jak je znázorněno na obrázku 2, PEM elektrolyzér se skládá z následujících součástí:

- procesní skříň obsahující všechny procesní komponenty, jako jsou ventily, potrubí, plyny a voda, tlakové nádoby, čerpadla atd,
- elektrická skříň obsahující všechny elektrické komponenty (tj. přístrojové vybavení a ovládání, kabeláž, úpravu napájení),
- chladič systém pro odvod tepla z procesu elektrolyzy,
- plášť odolný proti povětrnostním vlivům.

Nežádoucí události, ke kterým může teoreticky docházet, souvisejí s tvorbou ATEX1 (tj. výbušné směsi H_2 s O_2) v procesní sekci nebo v odlučovači (tj. zařízení pro oddělení plynných H_2 a O_2 od stopového množství vody), který je obvykle instalován směrem dolů od svazku FC. Aby se zabránilo hromadění vodíku v procesní sekci, je třeba přijmout následující opatření:

- regulace tlaku a tlakového rozdílu mezi vodíkovým a kyslíkovým potrubím,
- regulovat koncentraci vodíku v zásobníku ($< 0,4$ % obj. H_2),
- co nejvíce omezit množství vodíku v plynné vrstvě v odlučovači, aby se v případě katastrofického úniku zabránilo vzniku hořlavé směsi vodíku a vzduchu v plášti [1].

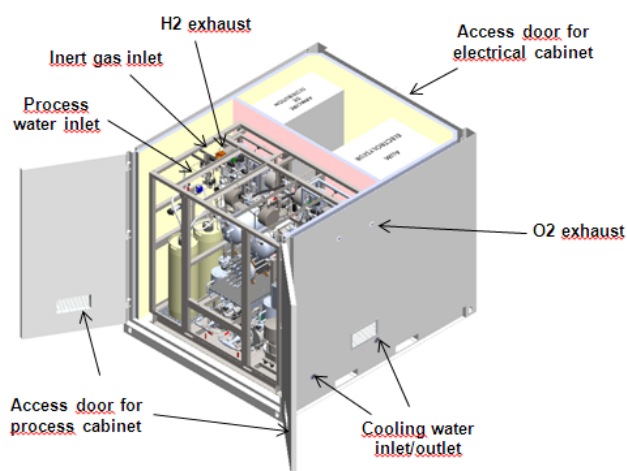


Zdroj: Areva, 2015.

Obrázek 1. Principy fungování PEM elektrolyzéro.

Vznik výbušného prostředí obsahujícího vodík a kyslík v separátoru může být způsoben poruchou vodovodního potrubí nebo perforací membrány. Aby se zabránilo výbuchu ATEX v separátoru, je třeba zvážit následující bezpečnostní opatření:

- zajistit minimální hladinu vody v plynovém separátoru nad úroveň 55 % jeho výšky,
- regulovat hladinu vody v plynových separátorech na H₂ a O₂,
- regulovat tlak a tlakový rozdíl mezi vedeními H₂ a O₂,
- regulovat koncentraci vodíku na výstupu ze separátoru plynného kyslíku.



Obrázek 2. Schéma PEM elektrolyzéro [1]

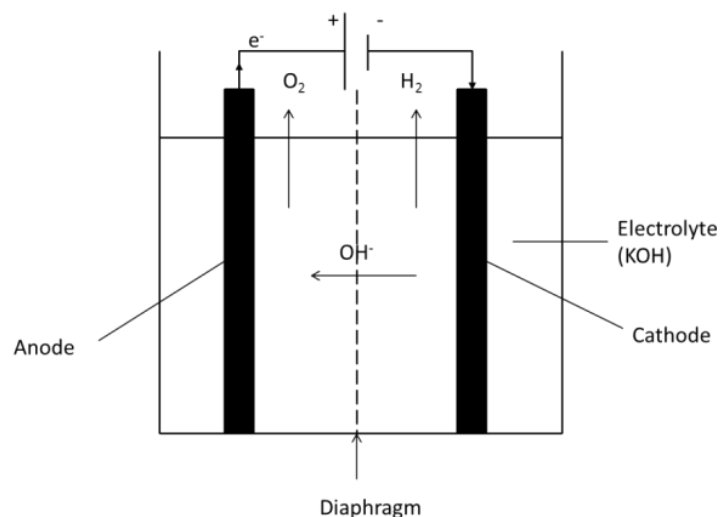
V případě aktivace bezpečnostních zařízení dojde k vypnutí elektrolyzéro, to znamená nejen k uzavření izolačních elektroventilů připojených k zásobním nádržím, ale také ke snížení tlaku v systému prostřednictvím elektroventilů, které jsou za běžného provozního stavu otevřené. Kromě toho může nedostatečná izolace elektronů vést v případě nehody k elektrickému jiskření za provozu, které může v prostředí bohatém na kyslík způsobit zapálení vodíku.

Rychlost výroby vodíku u různých modelů elektrolyzéro ITM Power, včetně modelů HGas1SP, HGas2SP, HGas3SP a HGasXMW, se pohybuje od 5,5 do 2015 m³/h.

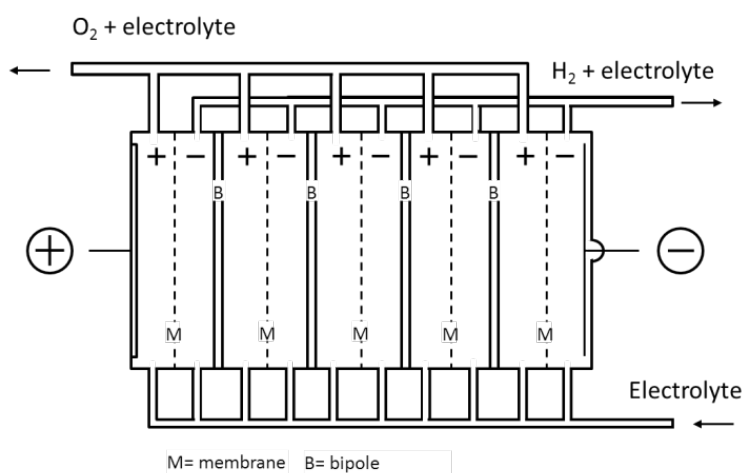
3.1.3 Alkalické elektrolyzéro

Alkalická elektrolyza je vyspělou technologií výroby vodíku, která se také nejčastěji uplatňuje v průmyslu. Alkalická elektrolyza využívá stejný princip jako PEM elektrolyza, tedy přeměnu elektrické energie na energii chemickou. Alkalický elektrolyzer má dvě elektrody ponořené do kapalného alkalického elektrolytu, vodného roztoku hydroxidu draselného neboli KOH v koncentraci 25 % při 80 °C a do 40 % při 160 °C. Použití KOH je výhodnější než použití hydroxidu sodného NaOH kvůli jeho vyšší iontové vodivosti, nižšímu obsahu chloridových nečistot a nižšímu tlaku nasycené páry. Elektrody jsou odděleny membránou, jak je znázorněno na obrázku 3. Tato membrána má dvě funkce: zprvu udržuje plynné produkty (konkrétně

vodík a kyslík) oddělené, zadruhé je propustná pro hydroxidové ionty (OH^-) a molekuly vody. Membrána propouští ionty, ale nikoli vodík. Obecně se alkalický elektrolyzátor skládá z několika elektrolytických článků tvořených membránou s elektrodami umístěnými mezi bipolárními průtokovými deskami, jak je znázorněno na obrázku 4.

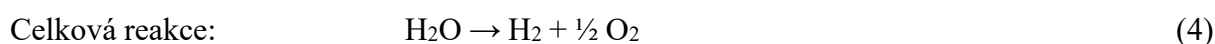
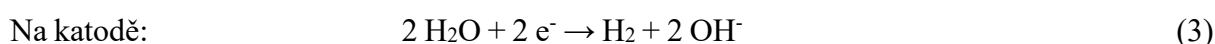
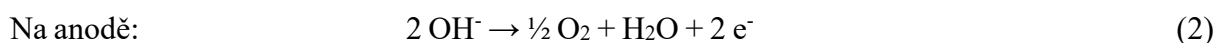


Obrázek 3. Schéma alkalického elektrolyzátoru [1]



Obrázek 4. Schéma elektrolytického svazku [1]

Reakce probíhající na obou elektrodách jsou uvedeny níže:



Typický alkalický elektrolyzátor se skládá z těchto součástí:

- napájecí zdroj a řídicí systém přístrojového vybavení,
- systém elektrolyzy obsahující jednotku pro čištění vody, jednotku pro čištění vodíku, sušičku plynů a separátor,
- kompresor.

Obrázky 5 a 6 obsahují příklady průmyslových alkalických elektrolyzátorů.



Obrázek 5. Alkalický elektrolyzátor, IHT typ S-556, 760 m³/h a 30 bar [1]



Obrázek 6. Exteriérové a interiérové elektrolyzátor HySTAT od společnosti Hydrogenics, 10–60 m³ [1]

Podobně jako u PEM elektrolyzátoru je hlavním rizikem alkalického elektrolytického systému vznik směsi vodíku a kyslíku, která může vést k vnitřnímu výbuchu v elektrolyzátoru. K detekci poruchy elektrolyzátoru je systém vybaven několika senzory:

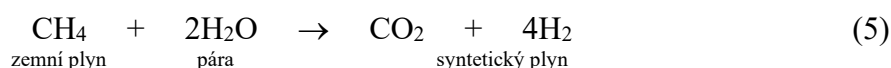


- měření koncentrace vodíku v kyslíkovém potrubí,
- měření napětí a proudu,
- měření teploty na vstupu a výstupu elektrolytických článků,
- měření iontové koncentrace v elektrolytu.

Další typ rizika souvisí s vystavením korozivnímu roztoku v případě úniku elektrolytu. Ve specifikačním listu hydroxidu draselného se doporučuje používat jímací nádrž, aby se zabránilo styku KOH s okolím [1].

3.1.4 Technologie reformování

V současné době je nejběžnějším způsobem výroby vodíku parní reformování zemního plynu. Reakce při reformování zemního plynu (metanu CH₄) je uvedena v rovnici 5:



Jedná se o endotermní proces (tj. proces vyžadující vysoké teploty) přeměny metanu a páry na vodík a oxid uhličitý CO₂. Obvykle se jedná o dvoustupňový proces, jehož typickými vedlejšími produkty jsou oxid uhelnatý CO a oxid uhličitý CO₂. Reformér lze provozovat nepřetržitě při konstantním zatížení. Kapacita reformérů se pohybuje od 100 do více než 100 000 m³/h. Účinnost reforméru málokdy přesahuje 80 % a nevýhodou této metody je skutečnost, že vyrobený vodík není čistý (je kontaminován CO/CO₂) a po výrobě má atmosférický tlak. Pro zvýšení udržitelnosti reformování jsou nutné jímání a sekvestrace CO₂. Příklad instalace parního reformování je znázorněn na obrázku 7.

Parní reformování je dobře zavedený průmyslový proces a v této přednášce se jím nebudeme podrobněji zabývat. Další technické podrobnosti naleznete v dokumentech o bezpečnosti v reformovacím průmyslu uvedených v Mezinárodním vzdělávacím programu pro školení o bezpečnosti vodíku pro zásahové jednotky. Jak bylo uvedeno výše, proces probíhá za vysoké teploty a tlaku, a proto se otázky bezpečnosti vodíku řešené v následujících přednáškách o únicích, požárech, detekci, zmírňování škod atd. samozřejmě týkají i parního reformování.



Obrázek 7. Parní reformér AirLiquide [1]

3.1.5 Ostatní technologie

V této přednášce je uveden přehled i méně rozšířených metod výroby vodíku. Členové jednotek prvního zásahu by měli znát různé metody výroby vodíku, protože trh s FCH rychle roste. Další informace o alternativních technologiích výroby vodíku získáte v odkazech uvedených v Mezinárodním vzdělávacím programu pro školení o bezpečnosti vodíku pro zásahové jednotky.

Vodík lze vyrobit – z vody:

- jaderné metody (radiolýza nebo termolýza),
- fotoelektrolýza (fotovoltaické systémy ve spojení s elektrolyzéry),
- termochemický cyklus,
- ferosiliciová metoda (voda, hydroxid sodný a ferosilicium),
- fotobiologické štěpení vody (dva kroky: fotosyntéza a produkce H katalyzovaná hydrogenázami),
- fotochemické štěpení vody,
- biologické cesty (fermentační, enzymatické, mikrobiologické a biokatalytické).

– z fosilních paliv:

- parciální oxidací ropy
- zplyňováním uhlí,
- plazmovým reformováním (lehké uhlovodíky zahříváné plazmou na 1 600 °C, vznikají vodík a uhlík, bez emisí CO₂),
- suchým reformováním (reformování zemního plynu za proudu CO₂).

– z komplexních hydridů kovů:

- $$\text{NaBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{HBO}_3 + 5\text{H}_2 \quad (36 \% \text{ hm.}) \quad (6)$$

Hydrid sodno-boritý
- $$\text{LiBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LiOH} + \text{HBO}_3 + 5\text{H}_2 \quad (46 \% \text{ hm.}) \quad (7)$$

Hydrid lithno-boritý

Tyto komplexní hydridy kovů jsou v současné době předmětem intenzivního výzkumu s cílem vyvinout nové materiály vhodné pro ukládání vodíku v pevném stavu.

Vodík se tradičně vyrábí pomocí reformovacích technologií, které nejsou „zelené“, protože při nich vzniká oxid uhličitý. Ačkoli je vodík vyráběný ze zemního plynu nepochybně krátkodobě použitelnou možností, není považován za dlouhodobé řešení. Předpokládá se, že ekologičtější způsoby výroby, jako jsou elektrolyza a jaderná technologie, budou hrát stále důležitější roli. Mezi obnovitelné zdroje pro výrobu vodíku patří biomasa, metanol, etanol a zemní plyn, větrné



elektrárny, přílivová energie, vodní energie, sluneční a gravitační energie. Vzhledem k tomu, že obnovitelné zdroje energie začínají hrát významnější roli při uspokojování energetických potřeb moderní společnosti, jsou otázky vyrovnávání zatížení sítě a skladování energie předmětem mnoha zkoumání. Právě zde přichází ke slovu vodík jako nový nosič energie. Existuje řada projektů, v nichž je větrná nebo solární energie spojena s výrobou a skladováním vodíku, např. projekt Pure (Skotsko), platforma MYRTE (Korsika, Francie), elektrárna Puertollano (Ciudad Real, Španělsko), větrná elektrárna a vodíková elektrárna Utsira (ostrov Utsira, Norsko) a několik projektů FCH, např. SOPHIA, PECDEMO, HYDROSOL-PLANT aj.

3.1.6 Decentralizovaná výroba vodíku

Decentralizovaná (neboli distribuovaná) výroba vodíku se týká systémů v různých měřítkách, od ostrovní komunity až po domácí elektrolyzéry pro osobní využití. Přejechod k distribuované výrobě může vést k energetické nezávislosti pro konečné uživatele, ale znamená to také potřebu nové „kultury bezpečnosti“, protože veřejnost bude mít větší odpovědnost. Některé příklady domácích systémů představily společnosti Honda a ITM:

- domácí energetická stanice Honda:
<https://apps.honda.co.uk/environment/designingthefuture/homeenergystation/>,
- systém ITM home:
<https://www.itm-power.com/h2-stations>

3.2 Skladování vodíku

Tento oddíl obsahuje přehled možností pro skladování vodíku. Úniky vodíku, požáry a výbuchy, jakož i interakce vodíku s materiály používanými pro skladování jsou mimořádně důležité a budou tématem následujících přednášek. Skladování vodíku je základní technologií pro celou řadu aplikací FCH, od skladování ve vozidlech FC až po stacionární aplikace FC. Univerzální řešení skladování, které by bylo možné nainstalovat do všech systémů, neexistuje. Řešení pro skladování vodíku musí být vybráno tak, aby vyhovovalo konkrétní aplikaci. Například u osobních vozidel jsou limitujícími faktory velikost a hmotnost, zatímco u vysokozdvizných vozíků může být hmotnost žádoucí vlastností. Řešení skladování je jednou z klíčových výzev pro vodíkové hospodářství a tyto technologie jsou předmětem značného zájmu vědecké i průmyslové komunity.

Dlouhodobé skladování velkého množství vodíku je klíčovým krokem při budování infrastruktury FCH, která bude regulovat spotřebu a výrobu vodíku a zajistí plynulost jeho dodávek zákazníkům. Zkoumají se například různé způsoby podzemního skladování vodíku. Jednou z možností je skladování plynného vodíku v geologických útvarech, jako jsou vytěžená plynová ložiska, spodní vody nebo solné jeskyně. Další možností je podzemní skladování v podzemních nádržích, kde se vodík skladuje buď v podobě stlačeného plynu, nebo v kapalné

formě. Geologická skladovací zařízení se obvykle nacházejí v blízkosti místa výroby vodíku, zatímco podzemní nádrže se nacházejí blíže místu spotřeby, například u čerpacích stanic.

K dispozici je řada technologií pro skladování vodíku, které lze rozdělit do následujících skupin:

- skladování v podobě stlačeného plynu,
- skladování ve zkapalněné formě,
- skladování v pevném skupenství.

Vodík se nejčastěji skladuje jako stlačený plyn nebo kryogenní kapalina v kovových nebo kompozitních lahvích nebo nádržích (obrázek 8). Další užitečnou alternativou je kryokompresní technologie, kdy se plynný vodík pod vysokým tlakem ochladí na nízké teploty. Láhve mohou mít různé velikosti, objem (od 20 do 300 l) a tlak (20–70 MPa) a pro některé aplikace je lze spojit do svazků nebo seskupit do přepravních košů.



a



b



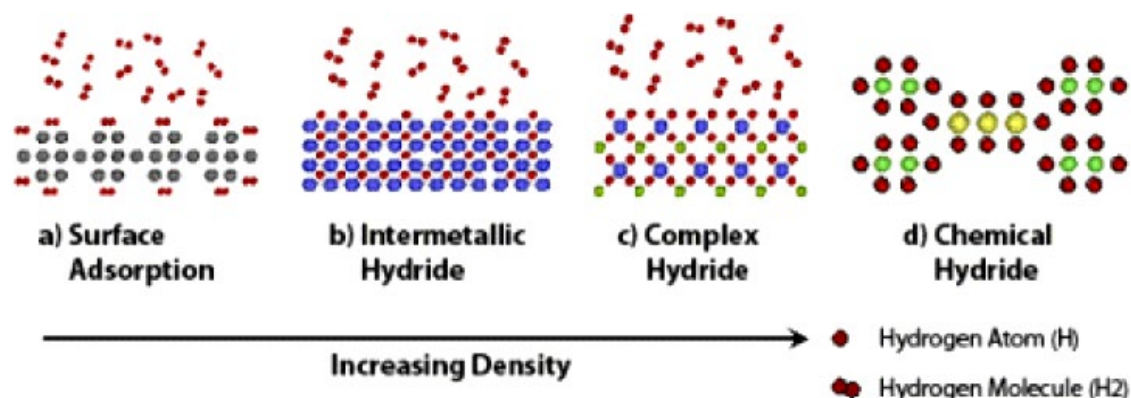
c

Obrázek 8. Palubní zásobník vodíku (a), svazek lahví (b) a přepravní koš s lahvemi (c).

Plynný vodík lze stlačit na 20–100 MPa. Hlavním problémem při skladování vodíku ve formě stlačeného plynu je množství energie potřebné pro stlačení, bezpečnostní otázky související se skladováním vodíku při tak vysokém tlaku a dodatečné náklady a hmotnost lahví určených pro vysokotlaké skladování vodíku. Problémy, jako jsou permeace a křehnutí, jsou úměrné tlaku plynu, proto mohou být při vyšších úrovních tlaku výraznější. Jediným bezpečnostním prvkem přepravních lahví používaných v Evropě je zpravidla pouze ventil. V USA jsou přepravní lahve vybaveny zařízením pro uvolnění přetlaku. Tento předpis je velmi kontroverzní, protože tato zařízení se často stávají zdrojem úniku. Stlačený plynný vodík se zpravidla skladuje ve stacionárních skladovacích systémech a v palubních zásobnících ve vozidlech s FC [1].

Kryogenní vodík vzniká při ochlazení na teplotu pod bodem varu 20 K (–253 °C), což je druhý hlavní způsob skladování vodíku. V této formě lze vodík po určitou dobu skladovat nebo přepravovat. Tato možnost skladování je také velmi nákladná vzhledem ke značné spotřebě energie potřebné ke zkapalnění. Je třeba také zvážit náklady a hmotnost vhodných materiálů pro skladování a udržení vodíku při nízkých teplotách. Vodík lze rovněž skladovat buď uvnitř

struktury nebo na povrchu některých pevných materiálů. Tento způsob skladování nevyžaduje vysoké tlaky ani nízké teploty jako předchozí dvě metody, což přináší výhody z hlediska bezpečnosti materiálů. Existují tři hlavní mechanismy ukládání vodíku do materiálů: absorpce, adsorpce (obrázek 9a) a chemické reakce (obrázek 9, b–d). Příklady materiálů a sloučenin vhodných pro skladování pevného vodíku jsou uvedeny na obrázku 9.



Obrázek 9. Materiály používané jako pevné zásobníky pro skladování vodíku [2]

Všechny tyto tři možnosti mají své výhody a nevýhody, liší se také otázkami bezpečnosti, které budou podrobně rozebrány v přednášce 3 „Bezpečnost skladování vodíku“. Systémy pro skladování vodíku lze použít k různým účelům: jako obaly pro jeho přepravu, jako stacionární systémy pro skladování na místě (pod zemí nebo nad zemí) nebo jako palubní nádrže ve vozidlech FC.

3.3 Průmyslové využití vodíku

Vodík se v průmyslu používá a bezpečně skladuje jako stlačený nebo zkapalněný plyn již více než 100 let. Vodík se široce uplatňuje v řadě aplikací, například při rafinaci ropy, jako chladivo ve velkých turbínových elektrických generátorech, jako pohonná látka v raketovém pohonu a v raketových střelách, při výrobě čpavku do hnojiv, v metalurgii k dobývání čistých kovů z rud, v polovodičovém, sklářském, farmaceutickém, petrochemickém, chemickém a potravinářském průmyslu atd. Ze statistik o haváriích souvisejících s vodíkem vyplývá, že v současné době jsou nejčastější havárie, ke kterým dochází v laboratořích (přibližně 32 %) [3]. Nízkou mírou nehodovosti lze vysvětlit přísnými bezpečnostními opatřeními, která jsou pro výrobu a konečné užití vodíku již zavedena. Tento trend se však může v následujících letech zvrátit v důsledku rozšíření aplikací FCH do veřejné sféry a častějšího používání technologií FCH soukromými osobami bez speciálního bezpečnostního školení. Z hlášení událostí také vyplývá, že z celkového počtu dosud zaznamenaných událostí má jen malá část z nich za následek ztrátu lidského života (4,6 %) [4]. Ačkoli otázky bezpečnosti vodíku v průmyslu byly doposud účinně řízeny, budou v odvětví dopravy i na trzích s palivy pro domácnosti zapotřebí další bezpečnostní přístupy, zejména pokud se jedná o postupy reakce na mimořádné události, a to zejména kvůli vysokým tlakům používaným při skladování vodíku. Vodík není více ani méně nebezpečný než jiná hořlavá paliva, a to včetně benzínu a zemního plynu. Některé jeho



vlastnosti, jako je vztlak, naopak poskytují ve srovnání s jinými palivy jisté bezpečnostní výhody. Se všemi hořlavými palivy je však třeba zacházet zodpovědně. Vodík je stejně jako benzín a zemní plyn hořlavý a za určitých podmínek se může chovat nebezpečně. S vodíkem lze bezpečně manipulovat, jsou-li dodržovány jednoduché zásady a uživatel má dobré znalosti o jeho jedinečném chování. Pochopení specifických vlastností vodíku a znalost aplikací FCH umožňují bezpečné používání vodíku coby paliva. V naší společnosti je třeba vytvořit novou kulturu bezpečnosti, vyvinout inovativní bezpečnostní strategie a průlomová technická řešení. Očekává se, že úroveň bezpečnosti na spotřebitelském trhu s vodíkem musí být podobná nebo vyšší než v případě používání fosilních paliv. Bezpečnostní parametry výrobků na vodíkové a palivové články tak přímo určují jejich konkurenceschopnost na trhu [5].

4. Vozidla FC

Technologie FCH pro silniční a speciální vozidla mají dnes velký význam. Někteří výrobci automobilů, jako například Toyota, již zahájili prodej vozidel s FCH v regionech, kde je již vybudována infrastruktura pro doplňování paliva. Mezi příklady takových silničních vozidel se řadí osobní vozidla, autobusy, skútry, lehká užitková vozidla atd. Jako palivo používají vodík a nemají žádné motory, protože místo nich se používá FC a elektromotor. Dostupnost infrastruktury je klíčovým krokem k tržnímu úspěchu těchto výrobků. Tato vozidla se svým vzhledem podobají běžným vozidlům. Na rozdíl od běžných vozidel však nevypouštějí žádné škodliviny a v provozu jsou velmi tichá. Další důležitou aplikací jsou speciální vozidla. Speciální vozidla jsou určena pro specifické účely a obvykle jsou provozována ve vozových parcích. Dobrým příkladem speciálních vozidel jsou vysokozdvížné vozíky FC. Tento typ vozidel vyžaduje výkon od 1,5 do 10 kW. V současné době mnoho soukromých společností investuje do vozového parku vysokozdvížných vozíků FC a do infrastruktury pro doplňování paliva, protože jejich používání jim přináší téměř okamžité výhody.

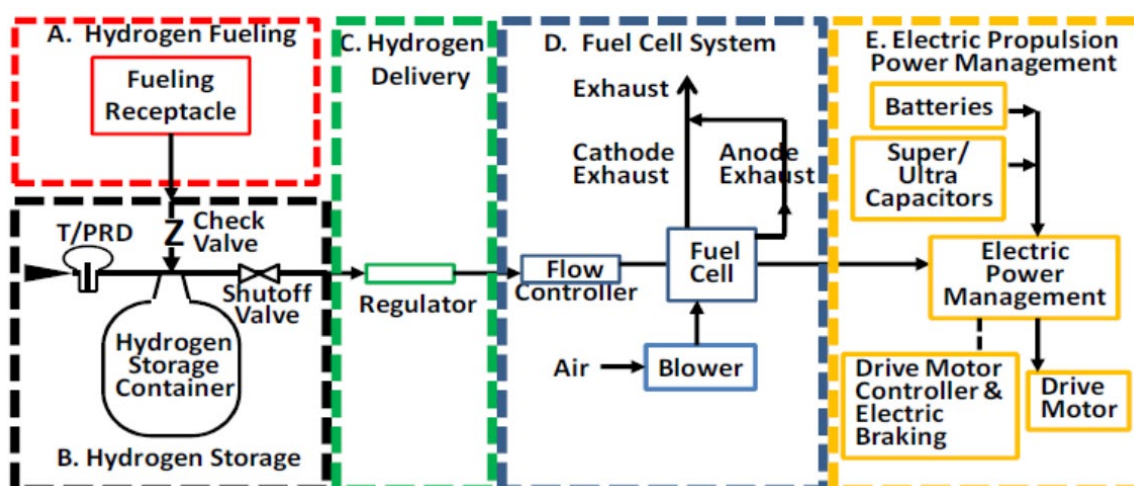
4.1 Klíčové vlastnosti vozidel FC

Vozy FC mají elektrickou poháněcí soustavu na FC, které vyrábí elektřinu elektrochemickou reakcí s využitím vodíku. Přestože existuje celá řada prototypů vozidel FC, pro většinu z nich jsou společné následující klíčové vlastnosti (obr. 10) [6]:

- systém pro tankování vodíku,
- systém pro skladování vodíku,
- systém dodávky vodíkového paliva,
- systém FC,
- elektrický pohon a systém řízení výkonu.

Při tankování je vodík do vozidla přiváděn přes tankovací nádobu (A) a proudí do vodíkového zásobníku (B). Vodík se dodává a skladuje ve skladovacím systému zpravidla ve formě

stlačeného plynu. Při startu vozidla FC se ze zásobníku uvolňuje plynný vodík. Regulátory tlaku a další zařízení v systému přívodu vodíku (C) snižují tlak na úroveň vhodnou pro provoz palivových článků. Vodík se elektrochemicky spojuje s kyslíkem v systému FC (D) a vyrábí se z něj vysokonapěťová elektrická energie. Tato elektrická energie je vedena do systému řízení výkonu elektrického pohonu (E), kde se používá k napájení hnacích elektromotorů nebo k nabíjení baterií a ultrakondenzátorů.

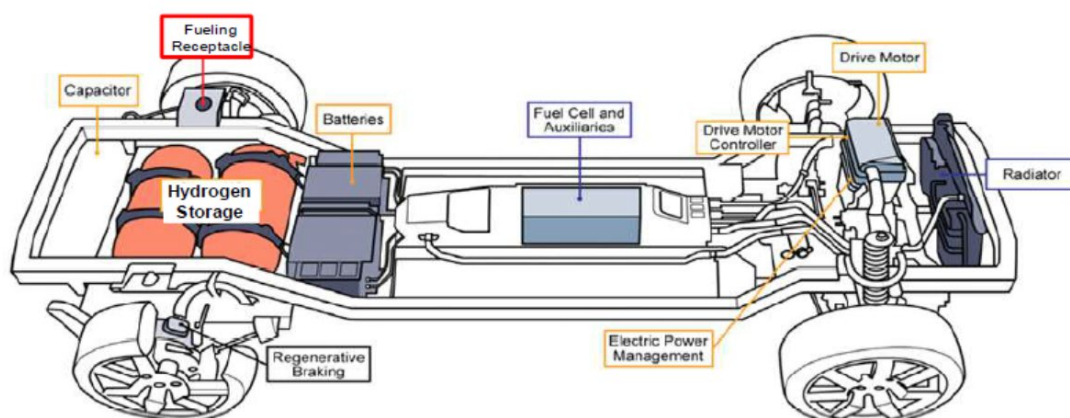


Obrázek 10. Klíčové systémy vozidla na palivové články [6]

4.2 Vozidla na palivové články

Obrázek 11 znázorňuje obvyklé uspořádání klíčových součástí typického vozidla na vodíkové palivové články [6]. Palivová nádrž je umístěna v zadní čtvrtině délky vozidla, stejně jako u jiných běžných vozidel. Stejně jako nádrže na benzín jsou i nádrže na vodík zpravidla montovány příčně v zadní části vozidla, ale mohou být namontovány i jinak, například podélně ve středovém tunelu vozidla. Palivové články a spojovací prvky jsou obvykle umístěny pod prostorem pro cestující spolu s řízením napájení, řídicí jednotkou motoru a motory samotnými. Vzhledem k velikosti a hmotnosti trakčních baterií a ultrakondenzátorů jsou tyto komponenty zpravidla umístěny ve vozidle, aby byla zachována požadovaná hmotnostní rovnováha pro správné ovládání vozidla.

Vodík lze do vozidla doplnit na čerpací stanici. V současné době se vodík do automobilů nejčastěji dodává jako stlačený plyn pod tlakem až 125 % jmenovitého pracovního tlaku (NPT) vozidla, aby se kompenzovalo přechodné zahřívání způsobené adiabatickým stlačováním během tankování.



Obrázek 11. Příklad vozidla na palivové články [6]

4.2.1 Systém pro skladování vodíku

Klíčovou funkcí systému pro skladování vodíku je přijímat vodík během tankování, uchovávat jej do okamžiku spotřeby a poté jej uvolňovat do systému palivových článků pro pohon vozidla. V současné době se vodíkové palivo na palubě nejčastěji skladuje a dodává ve formě stlačeného plynu (CGH_2). Lehké lahve na stlačený plyn s tlakem 700 barů jsou vyvinuty pro zvýšení skladovací kapacity. Skládají se z kovové (typ III) nebo polymerní (typ IV) vložky umístěné v kompozitní konstrukci vyztužené vlákny (obrázek 12). Práce na snížení ceny těchto lahví pokračují. Další informace týkající se palubních systémů pro skladování vodíku budou k dispozici v následujících přednáškách.



Obrázek 12. Prototypy lahví s tlakem 700 barů vyvinuté a testované v rámci evropského projektu STORHY: (a) technologie typu III, (b) technologie typu IV.

4.2.2 Systém dodávky vodíkového paliva

Systém dodávky vodíkového paliva přenáší vodík ze zásobníku do pohonného systému při tlaku a teplotě, které jsou vhodné pro provoz palivových článků. K tomu slouží řada ventilů pro regulaci průtoku, regulátorů tlaku, filtrů, palivových potrubí a tepelných výměníků. Palivové potrubí má většinou stříbrnou barvu, ale někdy může být i červené. Pokud dojde k odstavení nádrže z důvodu havárie, bude se v těchto potrubích nacházet pouze malé množství vodíku. Při vyprošťování by však jednotky prvního zásahu neměly palivové potrubí přerušovat.

4.2.3 Systém palivových článků

Systém palivových článků (FC) vyrábí elektřinu potřebnou k provozu hnacích motorů a k nabíjení baterií nebo kondenzátorů vozidla. Existuje několik druhů palivových článků, ale v automobilovém průmyslu se nejčastěji uplatňují palivové články typu PEM, a to díky nižší provozní teplotě, která umožňuje kratší dobu náběhu. Palivové články PEM vyrábějí elektrickou energii prostřednictvím elektrochemického slučování vodíku s kyslíkem. Palivové články jsou schopny nepřetržitě vyrábět elektrickou energii, jsou-li zásobovány vodíkem a kyslíkem. Současně vyrábějí elektřinu a vodu, aniž by produkovaly oxid uhličitý (CO₂) nebo jiné škodlivé emise typické pro spalovací pístové motory poháněné benzínem či motorovou naftou. Obecně platí, že palivové články v lehkém osobním vozidle generují napětí přibližně 400 V DC. Palivový článek je s vysokonapěťovým akumulátorem spojen měničem. Provozní teplota FC je mnohem nižší než u spalovacího pístového motoru, protože FC jsou účinnější.

4.2.4 Elektrický pohon a systém řízení výkonu

Elektrická energie generovaná systémem (svazkem) palivových článků slouží k napájení elektromotorů, které pohánějí vozidlo, a také k napájení kompresoru klimatizace a motoru ventilace vozidla. Mnoho osobních vozidel na vodíkové články má pohon předních kol s elektromotorem a hnacím ústrojím umístěným v „motorovém prostoru“ příčně nad přední nápravou, ale reálně jsou i jiné konfigurace a pohon zadních kol. Větší vozy typu SUV s pohonem na palivové články mohou být vybaveny pohonem všech kol s elektromotory na přední i zadní nápravě nebo s kompaktními motory na každém kole. Vysokonapěťový akumulátor je obvykle umístěn v kovovém pouzdře a pevně zabudován do rámu. Různá vozidla FC používají různé druhy akumulátorů, například nikl-metal hydridové nebo lithium-iontové akumulátory. Mezi další vysokonapěťové součásti může patřit stykač FC, řídicí jednotka napětí akumulátorů, měnič DC-DC, pohonná jednotka a elektrické vytápění. Elektrická energie ze zásobníku FC a vysokonapěťového akumulátoru je do motorů přiváděna prostřednictvím řady kabelů, které jsou obvykle umístěny uvnitř nebo za zakrytovanými vysokonapěťovými součástmi a pod vozidlem. Lze je snadno rozpoznat podle výrazně oranžových ochranných krytů.

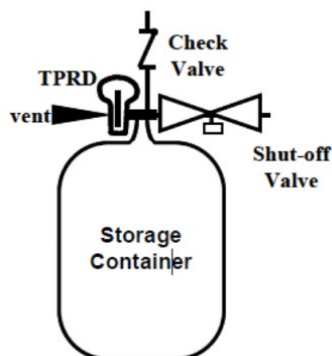
4.2.5 Bezpečnostní prvky a koncepce

Vozidla FC se tankují prostřednictvím speciální plnicí trysky na výdejním stojanu čerpací stanice, která se spojí s palivovou nádrží ve vozidle a zajistí přenos vodíku do vozidla „uzavřenou soustavou“. Palivová nádrž vozidla FC obsahuje zpětný ventil nebo jiné zařízení, které zabraňuje úniku vodíku z vozidla po odpojení plnicí trysky.

Součásti typického systému skladování stlačeného vodíku jsou znázorněny na [obrázku 13](#). Součástí systému jsou zásobník a všechny ostatní komponenty, které tvoří „primární tlakovou bariéru“, jež brání úniku vodíku ze soustavy. Součástí systému skladování stlačeného vodíku jsou tři bezpečnostní zařízení:



- zpětný ventil,
- uzavírací ventil,
- teplotou ovládané zařízení pro uvolnění přetlaku (TPRD).



Obrázek 13. Typický systém pro uchovávání stlačeného vodíku [6]

Při doplňování paliva vodík vstupuje do zásobníku přes zpětný ventil. Zpětný ventil zabraňuje zpětnému toku vodíku do čerpacího potrubí. Automatický vodíkový uzavírací ventil zabraňuje odtoku načerpaného vodíku, když vůz není v provozu nebo když je zjištěna porucha, která vyžaduje odpojení systému skladování vodíku. V případě požáru zajišťují tepelně aktivovaná zařízení pro uvolnění přetlaku (TPRD) řízené uvolnění plynu ze zásobníků stlačeného vodíku dříve, než vysoké teploty při požáru oslabí stěny zásobníků a způsobí jejich nebezpečné roztržení. TPRD jsou navržena tak, aby rychle uvolnila celý obsah zásobníku. Neuzavírají se a neumožňují opětovné natlakování nádoby. Očekává se, že zásobníky a TPRD, která byla vystavena požáru, budou vyřazeny z provozu a znehodnoceny. Vodík se zpravidla (ale ne vždy) vypouští mimo vozidlo FC pomocí drenážního potrubí. Přesné umístění drenážních potrubí závisí na výrobci vozidla a jeho modelu, ale obvykle se nachází v zadní části vozidla, v blízkosti vodíkového zásobníku [6]. Systém podávání paliva musí snížit tlak z úrovně panující v systému skladování vodíku na hodnoty požadované systémem palivových článků. Například v případě systému skladování stlačeného vodíku NWP o tlaku 70 MPa může být nutné snížit tlak z 87,5 MPa na méně než 1 MPa na vstupu do systému palivových článků. To může vyžadovat vícestupňovou regulaci tlaku, aby se dosáhlo přesného a stabilního řízení a ochrany proti přetlaku v případě selhání regulátoru tlaku. Ochrana systému podávání paliva proti přetlaku může být provedena vypouštěním přebytečného plynného vodíku přes přetlakové ventily nebo odpojením přívodu plynného vodíku (uzavřením uzavíracího ventilu v systému skladování vodíku), jakmile je zjištěn stav přetlaku za systémem [6]. Ve vozidlech FC je umístěna řada vodíkových senzorů. Při zjištění potenciálně nebezpečného úniku vodíku řídicí jednotka systému automaticky zastaví tok vodíku ze zásobníku. Sensory se nacházejí na několika místech: na přístrojové desce, vedle vodíkových zásobníků, v blízkosti výfukového potrubí, pod kapotou, nad stropem v prostoru pro cestující atd. Když je pohonný systém „zapnutý“, tyto snímače nepřetržitě monitorují koncentraci vodíku v těchto úsecích. Například podle



standardního operačního postupu (SOP) pro jednotky prvního zásahu v USA je řidič při detekci vodíku na „výstražné úrovni“ upozorněn ikonou „H₂“ umístěnou na přístrojovém panelu a v informačním centru řidiče (DIC) se zobrazí zpráva „H₂“ (Zjištěn vodík). Pokud je zjištěn vodík na „poplašné úrovni“, ikona „H₂“ začne blikat, zazní zvukový signál a na displeji DIC se zobrazí zpráva „H₂ Detected – Evacuate Vehicle“ (Zjištěn vodík – opusťte vozidlo) [7]. V této souvislosti je třeba uvést, že různé země definují různé úrovně nebezpečí, ačkoli obecné SOP jsou obdobné. Různé koncentrace vodíku vyvolávají v různých zemích také různé stupně výstrahy.

4.3 Autobusy FC

Autobusy na palivové články používají stejnou technologii jako automobily s tímto pohonem. Vodík se skladuje v nádržích umístěných zpravidla na střeše autobusu. Celková kapacita se pohybuje okolo 40 kilogramů. Svazek palivových článků je umístěn v motorovém prostoru v zadní části vozidla. Svazek palivových článků je v autobusu větší než u osobních vozidel a generuje vyšší napětí, přibližně 600 V. Hlavními výhodami autobusů FC ve srovnání s konvenčními autobusy jsou nižší znečištění, nižší koncentrace skleníkových plynů, vyšší energetická účinnost a tišší provoz. S dopravou na vodík je spojena řada evropských projektů. Například Partnerství v oblasti čisté energetiky (CEP) [8] je projekt, jehož cílem je testovat a demonstrovat využití technologií vodíkových palivových článků v dopravě. Projekt CEP, založený v roce 2002, představuje mezinárodní spolupráci 18 partnerů, mezi nimiž jsou přední výrobci automobilů, jako například BMW Group, Honda, Daimler, Ford, Hyundai, GM/Opel, Toyota a Volkswagen. V roce 2011 přešel projekt CEP do své třetí fáze „Příprava trhu“. Dalším projektem je HyFLEET: CUTE, jehož cílem je vytvořit a provozovat největší vozový park autobusů FC na světě. Projekt HyFLEET: CUTE zahrnuje provoz 47 autobusů na vodíkový pohon v běžné veřejné dopravě v 10 městech na třech kontinentech (Amsterdam, Barcelona, Peking, Hamburk, Londýn, Lucemburk, Madrid, Perth, Reykjavík) [9]. Tyto autobusy úspěšně poskytují konstruktérům a provozovatelům cenné údaje, protože jsou používány v náročném prostředí, v nepřetržitém provozu a v extrémních klimatických podmínkách. Dalším důležitým aspektem tohoto projektu je seznámit veřejnost s novou technologií a získat tak souhlas veřejnosti s jejím zavedením [9]. V Londýně nyní jezdí na trase RV1 mezi Covent Garden a Tower Gateway 8 autobusů na vodíkový pohon (obrázek 14). Šestiletý projekt Společného podniku pro palivové články a vodík (FCH JU) a iniciativy JIVE (Společná evropská iniciativa pro vodíková vozidla), který byl zahájen v lednu 2017, usiluje o zavedení 139 nových autobusů s nulovými emisemi a související infrastruktury pro doplňování paliva v pěti zemích. Následující projekt, JIVE2, který byl zahájen v lednu 2018, v kombinaci s projektem JIVE nasadí do začátku roku 2020 téměř 300 autobusů s palivovými články ve 22 městech po celé Evropě, což je dosud největší nasazení v Evropě. (<https://www.fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/jivejive2mehrlin-leaflet>)

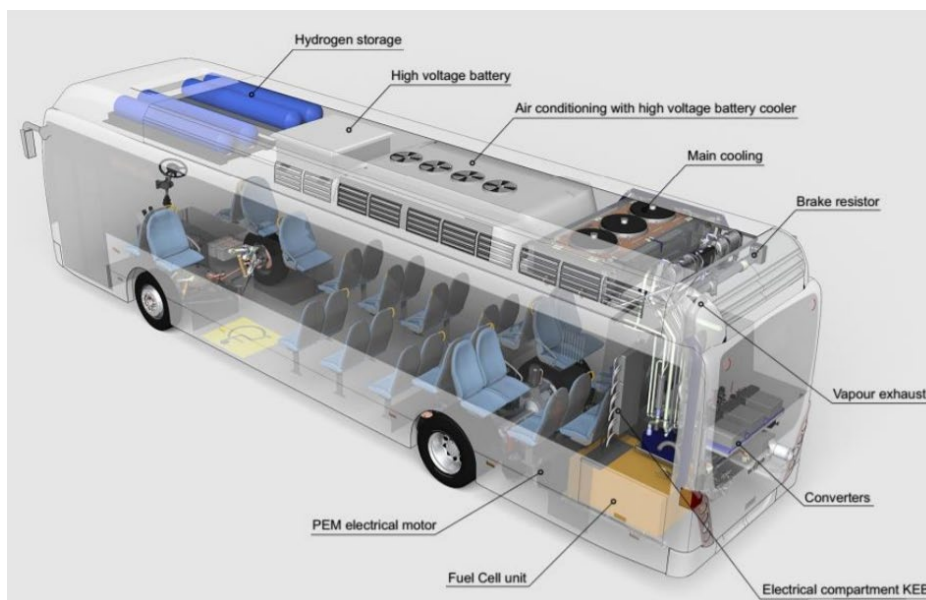


Obrázek 14. Autobus Wright Pulsar 2 na vodíkový pohon na lince RV1 v Londýně.

„Autobusy s vodíkovým pohonem prošly v posledních desetiletích rozsáhlým vývojem. Byla u nich použita řada různých konstrukčních konfigurací, včetně vodíku v ICE a různých technologií palivových článků. Kromě toho společnosti používají systémy přímého a hybridního pohonu, kde je součástí hnacího ústrojí zařízení pro ukládání energie (akumulátor nebo ultrakondenzátor), které snižuje špičkové zatížení a umožňuje rekuperační brzdění“ [10]. Stručné srovnání hlavních technologií vodíkových autobusů je uvedeno v přehledu vypracovaném v rámci projektu NextHyLights [10]. Obrázek 15 obsahuje uspořádání autobusu na vodíkový pohon „All American“ společnosti SunLine [11]. Zde je vodík uložen jako stlačený plyn (CGH2). Adams [12] provedl výzkum zaměřený na optimální tlak v palubním zásobníku, který by byl potřebný pro autobusy vybavené zásobníky na CGH2. Byl učiněn závěr, že je zapotřebí standardizované palubní zařízení pro omezení tlaku v zásobníku, aby se zajistilo, že vozidlo nebude naplněno na tlak vyšší, než je tlak v zásobníku, na který byl zásobník konstruován. Tato standardizace by byla rovněž nezbytná pro snížení zbytečných nákladů na vývoj systému do vozidel a související tankovací infrastruktury, jakož i pro snížení rizika poškození tankovacích rozhraní z důvodu nekompatibility. Kompresní energie plynu v zásobníku se pro danou hmotnost vodíku zvyšuje s rostoucím tlakem v zásobníku, proto by náhlá expanze plynu v důsledku protržení zásobníku mohla mít vážné následky, jejichž závažnost by rostla společně s rostoucím tlakem. Proto se při zvažování skladovacích systémů pro autobusy, kde objem není tak kritickým omezením jako u osobních vozidel, zjistilo, že optimální tlaky pro jednopodlažní městské autobusy bez kloubů se pohybují mezi 20 a 35 MPa [12].

Bezpečnostní zařízení používaná v autobusech FC jsou podobná těm, která se používají ve vozidlech FC. Zařízení pro uvolnění přetlaku (PRD) je neuzavíratelné tepelně aktivované zařízení, které je určeno k ochraně tlakové nádrže na vodík před katastrofickým selháním v případě, že dojde k nouzové situaci, například k požáru. Používá se k zajištění toho, aby tepelný náraz způsobený plameny nezvýšil tlak ve skladovací nádobě nad její konstrukční kapacitu. Je však třeba poznamenat, že požáry, které způsobí otevření PRD, nemusí mít za následek

okamžité vznícení vodíku při uvolnění. Nádrže na vodík jsou vybaveny tepelně aktivovaným zařízením pro uvolnění přetlaku (TPRD) a palivovým a odvzdušňovacím potrubím z nerezové oceli. Tlačítko nouzového vypnutí (ESD) je umístěno na panelu řidiče a jedno na samotném palivovém článku v motorovém prostoru.



Obrázek 15. Uspořádání hlavních součástí autobusu na palivové články [11]

Členové prvních zásahových jednotek se musí naučit, jak zacházet s vozidly s vodíkovými palivovými články v případě dopravních nehod. Hlavní rizika jsou spojena s vysokým napětím (až 600 V) a vysokým tlakem plynu (až 70 MPa). Pro různé typy silničních vozidel vyžaduje nařízení 79/2009 ES ve spojení s 406/2010 ES označování vozidel FC: u lehkých užitkových vozidel musí být štítek viditelně umístěn v blízkosti tankovací nádoby (další štítek by měl být uvnitř motorového prostoru). V současné době probíhají práce na modernizaci pokynů v této oblasti a členům zásahových jednotek se doporučuje, aby si potvrdili aktuálnost požadavků na označování, např. pracovní skupina 13 EHK OSN (<https://unece.org/wp29-introduction>).

Záchranné listy by měly být k dispozici pro všechna vozidla FC a měly by se nacházet na palubě vozidla. V ideálním případě budou mít hasičské sbory k těmto informacím přístup prostřednictvím komunikačního spojení. Je však třeba poznamenat, že úroveň přístupu se značně liší, takže přístup k informacím nemusí být vždy možný. Identifikační parametry vozidla by také měly obsahovat všechny charakteristiky vysokého napětí a vysokého tlaku, které by v dostatečném předstihu informovaly členy prvotních zásahových jednotek. Podobně jako u vozidel s konvenčním pohonem mohou v případě dopravní nehody představovat nebezpečí pro první pomoc následující součásti: nárazníky, tlumiče, pneumatiky, vzpěry kapoty a zavazadlového prostoru, airbasy, předepínače bezpečnostních pásů, klimatizační systém, akumulátory. Pamatujte, že odpojením nízkonapěťového kabelu se ve vozidle FC odpojí a vypnou všechny systémy vozidla (např. skladování vodíku, vysokonapěťový a nízkonapěťový systém).

4.4 Vysokozdvížené vozíky FC

Mnoho společností s velkými sklady nebo distribučními centry v současné době používá k přepravě zboží vysokozdvížené vozíky s pohonem na palivové články, které pracují v nepřetržitém provozu [1]. Vysokozdvížené vozíky FC jsou hybridní vozidla, která spojují palivový článek, zpravidla o výkonu 1,5 až 10 kW, s akumulátorem. Vodíkové lahve jsou uloženy mimo zařízení/sklad. Vodík je na místo přivážen dodavatelem průmyslových plynů, nebo je vyráběn na místě reformováním zemního plynu či elektrolýzou vody. Doplnění paliva do vysokozdvíženého vozíku FC vodíkem se většinou provádí v interiéru (ale jsou možné i venkovní výdejní stojany) a trvá jen několik minut. V porovnání s akumulátorovými zvláštními vozidly mají vysokozdvížené vozíky FC delší životnost; vyšší výkon po delší dobu a lze je doplnit palivem za méně než 3 minuty. Další výhodou vysokozdvížených vozíků FC jsou nižší provozní náklady a vyšší produktivita díky nižšímu počtu cest k nabíjecí stanici. Vzhledem k tomu, že není potřeba nabíječek baterií, skladovacích prostor ani prostor pro výměnu baterií, je k dispozici více skladových prostor pro jiné využití. Skladové vodíkové čerpací stanice pro vysokozdvížené vozíky FC dodávají velké průmyslové podniky. Příklad vysokozdvíženého vozíku FC a jednotky palivového článku je znázorněn na obrázku 16.



Vysokozdvížený vozík FC

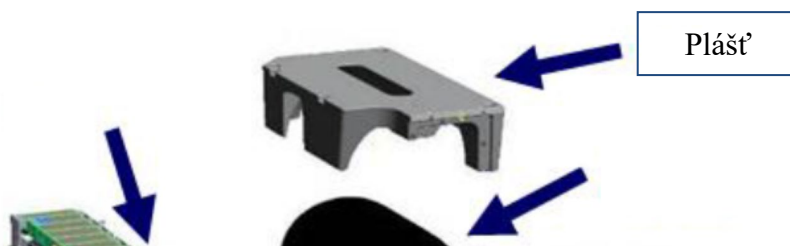


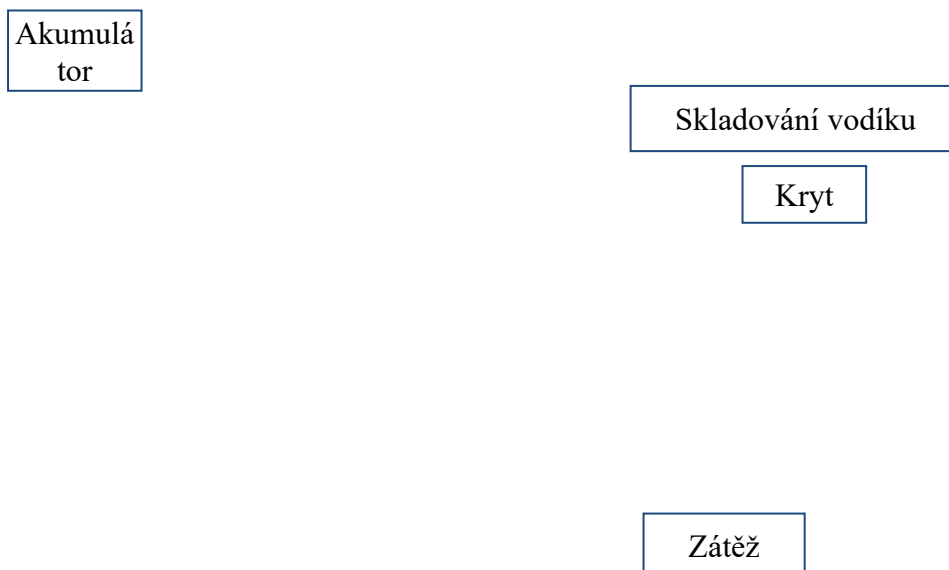
Palivový článek do vysokozdvíženého vozíku FC

Obrázek 16. Vysokozdvížený vozík FC a jeho jednotka FC [1]

Hlavní součásti jednotky FC jsou znázorněny na obrázku 17. Patří mezi ně:

- palivový článek (tzv. PAC),
- příslušenství palivového článku,
- zásobník vodíku, jehož objem se pohybuje mezi 20 a 70 l vody a který je vybaven regulačním systémem,
- lithium-iontový akumulátor, který prošel zkouškami požadovanými Organizací spojených národů (UNO) uvedenými v Příručce zkoušek a kritérií OSN, oddíl 38.3,
- sběrná nádrž na vodu.





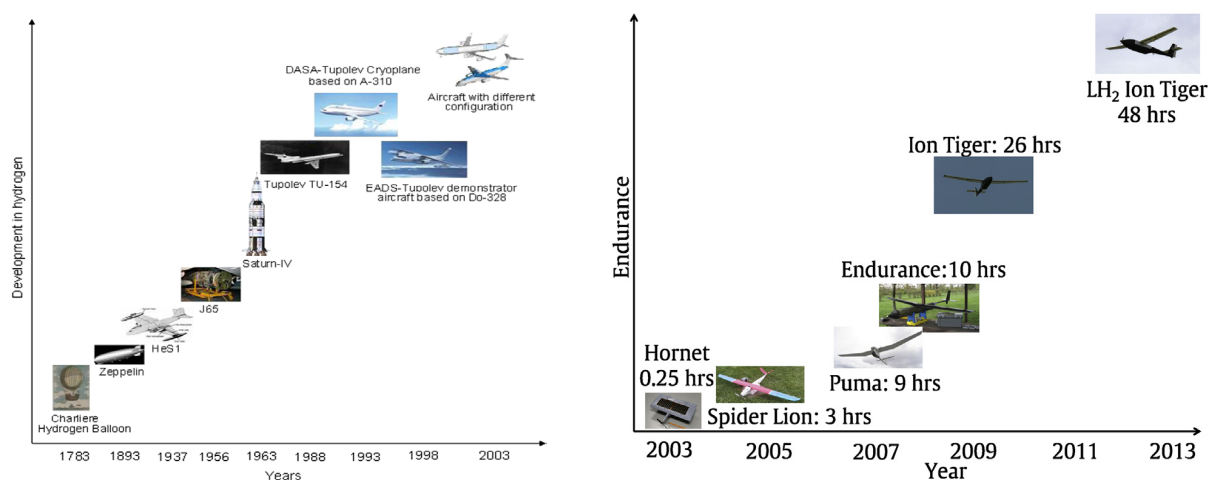
Obrázek 17. Součásti jednotky palivového článku u vysokozdvizného vozíku

Z bezpečnostního hlediska je zásobník vodíku chráněn zařízením TPRD (spouštěným tepelnou pojistkou) umístěným mezi uzavíracím ventilem vysokozdvizného vozíku a tlakovou lahví. Pojistka se otevře při teplotě 109 °C a umožní rychlé uvolnění tlakového vodíku. Na plnicím otvoru se nachází také zpětný ventil, který zabráňuje úniku plynu ze zásobníku. Všechny součásti FC jsou zabudovány do litinového pláště, který je chráněn krytem. Tento litinový plášť má dvě výhody: poskytuje ochranu proti vnějšímu mechanickému poškození a umožňuje odvádění vodíku v případě nebezpečí poškození vnějším zdrojem tepla.

4.5 Letectví

Studie využitelnosti vodíku coby leteckého paliva byla zahájena v roce 1956. Spojeným státem se podařilo použít v jednom z motorů letounu B57 Canberra vodíkové palivo natlakované heliem [13]. Po B57 Sověti v roce 1988 vyzkoušeli experimentální přestavbu raně sériového letounu Tu-154, který měl jeden motor využívající vodíkové palivo. Motor na kapalný vodík byl testován ve výšce až 7 000 m a dokázal letounu udělit rychlost až 900 km/h. Bohužel, program kapalného vodíku (LH) se omezil na pouhých pět letů a bylo rozhodnuto, že se s těmito palivy nebude pokračovat kvůli vysokým nákladům a chybějící vodíkové infrastruktuře [14]. Dodnes bylo postaveno mnoho prototypů letounů na vodíkové palivo, jako například Tupolev Tu-155 (Tupolev, 2009), Antares DLR-H2 (Fuel Cell Works, 2009), Boeing Phantom Eye (Jackson a Haddox, 2010) a ENFICA-FC Rapid 200-FC (Evropská komise, 2011), které využívají kompresní a zkapalňovací metody skladování [15]. Časový rámeček historického vývoje letounů na kapalný vodík a palivové články je znázorněn na obrázku 18. V září 2016 absolvovalo první čtyřmístné osobní letadlo HY4 na světě poháněné vodíkovými palivovými články svůj první let z letiště Stuttgart. V tomto budoucím elektrickém taxíku je vodíkové palivo uloženo pod tlakem 4 300 PSI až 5 800 PSI ve dvou nádržích z uhlíkových vláken, které jsou umístěny ve dvou trupech. V tomto letounu s maximální rychlostí 200 km/h

palivový článek přímo přeměňuje vodík na elektrickou energii a jediným odpadním produktem, který při tomto procesu vzniká, je voda [16]. 21. září 2020 odhalila společnost Airbus tři koncepce prvního komerčního letounu s nulovými emisemi na světě, který by mohl být uveden do provozu do roku 2035. Každá z těchto koncepcí představuje jiný přístup k dosažení letu s nulovými emisemi a zkoumá různé technologické cesty a aerodynamické konfigurace s cílem podpořit ambici společnosti stát se lídrem na poli dekarbonizace celého leteckého průmyslu. Všechny tyto koncepce spoléhají na vodík coby primární zdroj energie. Tato volba se dle společnosti Airbus jeví jakožto mimořádně slibná k použití coby čistého leteckého paliva a pravděpodobně bude pro letecký průmysl a mnoho dalších odvětví řešením, jak splnit cíle v dosažení klimatické neutrality.



Obrázek 18 Historický časový vývoj letounů na vodíkový pohon (vlevo) a palivové články (vpravo)

Maximální vzletová hmotnost letounu činí až 640 tun. Přeprava takových nákladů vyžaduje velké a výkonné motory, které spotřebují velké množství paliva. Tento požadavek na palivo přináší výhody i problémy související s bezpečností paliva, náklady na palivo, měrnou energii a ekvivalentní energetickou účinností. Letouny dnes většinou používají paliva na bázi ropy získávaná z fosilních paliv. Mezi těmito palivy jsou náklady na nejčastěji používaný kerosin nižší než na ostatní paliva [15, 17]. Přestože kerosin a některé směsi benzínu byly jako palivo pro letectví vhodnější, jejich zásoby jsou omezené a zvýšené emise skleníkových plynů negativně ovlivňují životní prostředí. Vzhledem k těmto skutečnostem výzkumní pracovníci a výrobci zkoumají nové způsoby a formy nakládání s energií pomocí alternativních/obnovitelných paliv.

Konvenční fosilní paliva používaná v letectví jsou proto nahrazována alternativními palivy. Jedním z nejdůležitějších prvků paliv je vodík. Vodík se v posledních letech dostal do popředí zájmu výzkumníků a odborníků na spalování díky své dostupnosti, lepším specifickým energetickým vlastnostem a přínosům pro životní prostředí.



Vodík se v letounech obvykle používá dvěma způsoby: buď jako palivo místo kerosinu ve velkých letounech, nebo jako palivo v PEM palivových článcích v proudových motorech malých vrtulových letounů [15].

4.5.1 Vodík jako pohonná hmota

Vodík má při všech vlastnostech potřebných pro své využití jakožto paliva nejvyšší obsah energie na jednotku hmotnosti ze všech známých paliv (2,8krát vyšší než v porovnání s kerosinem) [17, 18]. Tato vlastnost je velmi důležitá, protože umožňuje větší užitečné zatížení [19]. Další výhodou je, že vodík představuje příslib dlouhodobého růstu v oblasti letectví v důsledku ochrany životního prostředí [18].

Použití vodíku jako leteckého paliva by eliminovalo většinu emisí skleníkových plynů, včetně všech emisí uhlíku, sazí a oxidů síry [20]. Hlavními vedlejšími produkty spalování vodíku jsou vodní pára a oxidy dusíku (NO_x) [21]. Množství emisí NO_x uvolňovaných při spalování vodíku je však ve srovnání s emisemi uvolňovanými při spalování kerosinu velmi nízké [22]. Přijetí vodíku jako paliva pro proudové letouny může navíc zajistit dlouhodobě stabilní úroveň cen paliva a také zvýšit spolehlivost dodávek paliva, protože jej lze získávat z různých typů zdrojů, což snižuje závislost na fosilních palivech soustředěných pouze v několika málo oblastech na světě [23, 24]. Vodík je tedy považován za vhodné palivo pro letecký průmysl, protože je schopen zajistit čisté, spolehlivé a cenově dostupné dodávky energie, která má velmi nízké emise znečišťujících látek, a tudíž i malý dopad na životní prostředí [21].

Aby byl vodík pro letecký průmysl životaschopný, musí se zvýšit jeho objemová hustota neboli hustota energie na jednotku objemu [25, 26]. V porovnání s kerosinem je k dodání stejného množství energie potřeba čtyřikrát větší objem LH_2 [27]. I přes tuto nevýhodu se však uvádí, že letadla na vodíkový pohon jsou hmotnostně efektivnější a mají nižší provozní náklady než letadla na kerosin [27]. Použití vodíku coby paliva pro proudové motory obecně vyžaduje úpravu konstrukce letounů i jejich motorů. LH_2 používaný v letounech na vodíkový pohon musí být uchovávaný při velmi nízkých teplotách, a proto může být skladován pouze v silně izolovaných nádržích, nikoli v křídlech, jejichž prostor pro uložení LH_2 je omezený a která nelze požadovaným způsobem izolovat. Vzhledem k obrovským objemovým nárokům palivových nádrží na vodík je třeba upravit konstrukci letounu na objemnější a těžší trup, což je nejvhodnější místo k umístění palivových nádrží na LH_2 . U letounů s krátkým až středním doletem mohou být vodíkové nádrže umístěny nad kabinou cestujících, zatímco u letounů s dlouhým doletem je vodík uložen ve dvou velkých vestavěných nádržích: jedna z nich je umístěna přímo za pilotní kabinou, druhá pak na zádi kabiny pro cestující [28]. Konfigurace vodíkových nádrží má významný vliv na energetickou účinnost letounů na vodíkový pohon [28]. Konstrukce s horní nádrží, používaná v letounech s krátkým až středním doletem, může zvýšit spotřebu energie o 6–19 % vzhledem k vyšší hmotnosti tohoto typu nádrží. Na druhou stranu vestavěná konstrukce, vhodná pro letouny s dlouhým doletem, může zvýšit energetickou účinnost až o 12 % [28]. Lze tedy konstatovat, že vodíkové palivo je vhodnější



pro letouny s dlouhým doletem. Vzhledem k tomu, že trup letounu na vodíkový pohon slouží k uskladnění vodíkových nádrží, je potřeba těžší a větší trup, aby unesl zatížení způsobené těmito nádržemi. Hmotnost trupu letounu na vodíkový pohon je takřka o 6 % větší než u běžného letounu [24]. Kromě změny konstrukce letounu je při přestavbě na vodík nutné změnit i motor, a to z důvodu rozdílů ve spalínách a vlastnostech kerosinu a vodíku. Při použití vodíku stačí menší motory [24]. Změny v konstrukci letounů a motorů při použití vodíku znamenají zvýšení nákladů na výrobu a údržbu, které mohou dosáhnout až 25 % [23].

4.5.2 Vodíkové palivové články pro aplikace v leteckém průmyslu

Vodíkový palivový článek je elektrochemické zařízení, které vyrábí elektrickou energii elektrochemickou reakcí mezi vodíkem a kyslíkem. Palivové články jsou tiché, produkují jen malé vibrace a neprodukují žádné emise NO_x , což z nich činí velmi atraktivní volbu pro širokou škálu aplikací. Z různých typů palivových článků se pro letecké aplikace nejčastěji uvažovalo o palivových člancích PEM a palivových člancích s tuhými oxidy (SOFC). Vodíkové palivové články lze na palubě letounu používat k napájení různých spotřebičů a systémů, které jsou již v současné době napájeny bateriemi, jako jsou systém nouzových dveří, podlahové osvětlení únikových cest, polohový maják nehody (ELT), zapisovač letových údajů (FDR) a hlasový záznamník v pilotní kabině (CVR).

Pomocná energetická jednotka (APU) letadla je malá plynová turbína, která funguje jako zdroj elektřiny a stlačeného vzduchu pro provoz dalších součástí letadla, jako jsou proudové motory a systémy podpory života, když hlavní motory nejsou v chodu. Systémy palivových článků by mohly být použity místo tradičních APU nebo by je bylo možno s nimi kombinovat do hybridního systému APU [29]. Pro systémy APU lze použít jak PEM palivové články, tak palivové články s tuhými oxidy (SOFC) [30]. SOFC jsou však pro aplikace v letounech vhodnější, zejména pro účely napájení APU [29]. SOFC jsou tolerantnější k nečistotám v palivu a mohou pracovat s vodíkem získaným z reformování kerosinu [29]. Vysoká provozní teplota SOFC navíc umožňuje vnitřní reformování leteckého paliva a zvyšuje účinnost. Hmotnost APU poháněných pomocí SOFC je však vyšší než u PEM palivových článků nebo tradičních APU, protože kladou vyšší nároky na vlastní spotřebu zařízení (BoP), jako jsou reformer, kompresor, čerpadla, tepelné výměníky atd. PEM palivové články lze použít k napájení APU pouze tehdy, je-li zdroj vodíku umístěn přímo v letounu.

S rostoucím zájmem o zlepšení kvality ovzduší v okolí letišť se zvýšila pozornost věnovaná palivovým článkům, protože mají potenciál v blízké budoucnosti pohánět různá pozemní podpurná zařízení (GSE) a další pozemní vozidla pracující na letištích, jako jsou například kyvadlová doprava pro cestující a tankovací vozidla [30]. GSE neboli zařízení pro odbavení letadel slouží k obsluze cestujících, nákladu, zařízení a letounů během jejich pobytu na letišti mezi jednotlivými lety. GSE obsahují různé servisní systémy, které mají různé požadavky na napájení. V současné době je mnoho GSE pracujících na letišti napájeno vodíkovými palivovými články. Ministerstvo energetiky (DOE) USA oznámilo, že na nasazení palivových



článků pro zavazadlové vozíky na letištích bude použito přibližně 250 milionů amerických dolarů [31]. Středně velké vysokozdvížené vozíky poháněné palivovými články již byly testovány na velkých letištích, jako jsou letiště Toronto Pearson, Hamburk a Mnichov [32]. Tyto vysokozdvížené vozíky mají mnoho výhod, například nízkou hlučnost, žádné emise a nižší nároky na údržbu. Mají téměř stejné rozměry jako klasické akumulátorové vozíky, ale nevyžadují výměnu baterií, která bývá u většiny běžných vysokozdvížených vozíků velmi náročná. Kromě toho byla jako hlavní výhoda vysokozdvížených vozíků poháněných palivovými články oproti akumulátorovým identifikována i doba doplňování paliva, které lze zvládnout během několika minut, zatímco dobíjení akumulátorů vyžaduje hodiny [33]. Palivové články lze také používat déle než osm hodin bez nutnosti doplňování paliva. Lze tedy konstatovat, že nahrazení tradičních akumulátorů palivovými články ve vysokozdvížených vozících je ekonomicky výhodné, pokud jde o počáteční investiční i provozní náklady. Dánské letiště v současné době používá zavazadlové vozíky na palivové články. V roce 2015 společnost FedEx uvedla na trh první nákladní tahače GSE poháněné palivovými články, které utáhnou přibližně 15 t nákladu [34]. Kromě aplikací pro GSE lze palivové články použít i pro pohon letištních vozidel, jako jsou autobusy pro cestující. V Tokiu jezdí některé autobusy na trase mezi centrálním Tokiem a tokijským letištěm na hybridní systém akumulátorů a vodíkových palivových článků [35]. Mezinárodní letiště na Havaji plánuje používat hybridní autobusy s palivovými články a akumulátory k přepravě cestujících mezi letištními terminály a půjčovnou osobních vozidel [36].

Palivové články se považují též za možný nový zdroj energie, který by mohl nahradit akumulátory v současných bezpilotních letadel (UAV). Nejatraktivnějším faktorem bezpilotních letadel poháněných akumulátorem je cena, která je téměř o polovinu nižší než cena letadel s palivovým článkem. Jako limitující faktor bezpilotních letadel poháněných akumulátorem se uvádí rostoucí hmotnost akumulátorů potřebných k dosažení delší doby letu [37]. Mezi hlavní výhody palivových článků při napájení bezpilotních letadel patří možnost prodloužení doby mise a vzdálenosti díky vyšší hustotě energie, tichý a spolehlivý provoz a snížení překážek při nabíjení lithiových baterií a přepravě [38]. PEM palivové články jsou pro aplikace v bezpilotních letounech výhodnější, protože mohou pracovat za nízkých teplot, což znamená menší požadavky na BoP. V roce 2005 vyvinula společnost AeroVironment první bezpilotní letadlo s palivovými články [39]. Letadlo s rozpětím křídel 15 m bylo poháněno pohonným systémem PEMFC a zvládlo více než hodinu letu pouze na zkapalněný vodík. V návaznosti na to v roce 2006 Bradley a kol. [40] zkonstruovali a vyzkoušeli bezpilotní letoun poháněný palivovými články využívajícími stlačený vodík. Autoři prokázali, že letadlo s rozpětím křídel 6,58 m a celkovou hmotností 16,4 kg lze pohánět PEM palivovým článkem o výkonu 500 W. V současné době probíhá na celém světě rozsáhlý výzkum zaměřený na vývoj, konstrukci a zhotovení bezpilotních letadel poháněných palivovými články. Tyto snahy vedly k výraznému zvýšení výdrže, která přesáhla 48 h [41]. Snížení hmotnosti palivových článků, zvýšení jejich spolehlivosti, prodloužení životnosti,

jejich rychlejší spouštění a zvýšení energetické hustoty přispějí k atraktivitě technologie palivových článků pro bezpilotní letadla [42].

5. Přeprava vodíku

Jak jste se již dozvěděli, vodík se v průmyslu používá po mnoho desetiletí. Po výrobě vodíku v centralizovaném výrobním závodě je vodík obvykle přepravován ke koncovým uživatelům nebo do příslušných FC aplikací. Vodík lze přepravovat buď jako stlačený plyn, nebo jako kryogenní kapalinu. Existuje tedy řada způsobů pro jeho hromadnou přepravu: po silnici v nákladních automobilech/návěsích a kontejnerech nebo potrubím.

5.1 Těžká nákladní vozidla (HGV)

5.1.1 Plynová nákladní vozidla

Flotily nákladních vozidel v současné době využívají průmyslové plynárenské společnosti k přepravě bezešvých ocelových nádob se stlačeným plynným vodíkem (CGH₂) na vzdálenost 200–300 km od centralizované výroby. Na návěsy se umísťují jednotlivé láhve, svazky s více lahvemi nebo dlouhé válcové trubky (obrázek 19). Skladovací tlak se pohybuje v rozmezí 200 až 300 bar a přívěs může přepravovat 2 000 až 6 200 Nm³ CGH₂. Omezením je nejvyšší přípustná hmotnost nákladních vozidel 40 tun. Množství takto přepravovaného vodíku je poměrně malé (180 až 540 kg v závislosti na počtu trubek nebo svazků), což představuje přibližně 1–2 % celkové hmotnosti nákladního vozidla. Současné návěsy používají skladovací lahve typu I (tj. celokovové). Pro zvýšení jejich výkonu lze použít svazky lehkých kompozitních lahví nebo trubek obalených obručí (typ II). Tento způsob přepravy je relativně snadný, ale musí být přizpůsoben množství vodíku a vzdálenostem, aby byl cenově konkurenceschopný. Hlavními omezeními silniční přepravy stlačeného plynu jsou investiční náklady, náklady na provoz a údržbu, včetně nákladů na práci řidičů a výdaje na pohonné hmoty.



(a)



(b)

Zdroj: AirLiquide, 2014.

Obrázek 19. Dva typy návěsů CGH₂ provozované společností AirLiquide v Evropě: (a) návěs s trubkami o tlakové kapacitě 2 000 až 3 000 Nm³ vodíku, a (b) návěs s kompozitními lahvemi o tlakové kapacitě 6 200 Nm³.

Přeprava plynu nákladními vozidly (trubkový návěs, tlakové lahve) je jedním z nejrozvinutějších způsobů přepravy malých množství vodíku na krátké vzdálenosti. Hlavními

omezeními jsou nízká hmotnostní kapacita zásobníků pro zákazníky s vysokou spotřebou (vyžadující časté dodávky) a nízký tlak dodávaného vodíku, který vyžaduje dodatečnou kompresi, například na čerpací stanici. Proto se zkoumají alternativní technologie s vyšším tlakem, vyšší kapacitou pro přenos vodíku a levnějšími systémy, jak je popsáno níže. Společnost Lincoln Composites vyvíjí kompozitní trubky s vyšší kapacitou. Materiálem nádrže je plastová vložka plně obalená epoxidem impregnovanými uhlíkovými vlákny pro přepravu plynného vodíku na návěsu. Například nádrž TITANTM (průměr 1,08 m, délka 11,5 m, objem 8 400 litrů vody a hmotnost 2 087 kg) pracuje při tlaku 250 bar. Dokáže přepravit 2–3krát více vodíku ve srovnání s množstvím vodíku skladovaného/přepřavovaného v ocelových nádržích o podobné hmotnosti. Na [obrázku 20](#) je uvedena skladovací jednotka se čtyřmi kompozitními nádržemi, které jsou schopny skladovat 600 kg vodíku při tlaku 250 bar. Nádrže vhodné pro vyšší tlak jsou v současné době ve vývoji.



Zdroj: Lincoln Composites, 2014.

Obrázek 20. Návěs nesoucí čtyři kompozitní nádrže, vyvinutý společností Lincoln Composites.

V Národní laboratoři Lawrence Livermora (LLNL) se zkoumají hybridní technologie, jako je kryokomprese kombinující tlak a nízkou teplotu, s cílem zvýšit množství vodíku, které lze skladovat na jednotku objemu, a předcházet energetickým ztrátám spojeným se zkapaňováním vodíku. Stlačený vodík při kryogenních teplotách je mnohem hustší než v běžných stlačených nádržích při teplotě okolního prostředí. Tyto nové nádoby by mohly skladovat vodík při teplotách až 80 K a tlaku 200–400 bar. Tento přístup vyžaduje vývoj izolovaných tlakových kompozitních nádrží. Alternativně lze uvažovat o použití nádrží na studený vodík, které by vyžadovaly méně chlazení. Může existovat určitá optimální kombinace tlaku a teploty v rozmezí 80–200 K. Před nedávnem společnost LLNL objevila levné materiály ze skleněných vláken pro skladování plynného vodíku zastudena (~150 K a až 500 bar), přičemž očekává 50% snížení výloh na návěs.

Hlavními bezpečnostními zařízeními používanými v nákladních vozidlech pro přepravu plynů jsou ruční bezpečnostní ventily. Během přepravy jsou všechny zásobníky vodíku izolovány ventilem. Používají se různá bezpečnostní zařízení a postupy:



- Postup výměny návěsu probíhá takto:
 - řidič zaparkuje návěs na určeném místě,
 - řidič nasadí klíny a spustí opěrné nohy,
 - řidič odpojí tahač,
 - řidič připojí hadici z plného návěsu, vyzkouší těsnění na čerpací hadici a odpojí prázdný návěs,
 - řidič připojí prázdný návěs k tahači a odjede.
- Ruční zkouška těsnosti při připojení k návěsu. Vše probíhá v těchto fázích. Obsluha připojí hadici návěsu k připojovacímu sloupku zařízení. Hadice se natlakuje. Obsluha kontroluje těsnost pomocí detekčního mýdla a stabilizaci tlaku měřeného lokálně pomocí manometru.

5.1.2 Nákladní automobily pro převoz kryogenních kapalin

Vodík lze přepravovat po silnici též v kapalném stavu (ochlazený pod 20 K neboli -253 °C) a distribuovat tak větší množství (stovky m^3/h). Z hlediska hmotnostní kapacity mohou superizolovaná nákladní vozidla na kapalný vodík (LH_2) přepravovat až desetkrát více vodíku než trubkové návěsy používané pro přepravu CGH_2 . Nákladní vozidla na převoz LH_2 pracující při atmosférickém tlaku mají objem přibližně 50 000 až 60 000 litrů a mohou přepravovat až 4 000 kg (obrázek 21). Jedná se o preferovaný způsob distribuce středních/velkých množství vodíku na dlouhé vzdálenosti, což vysvětluje, proč se obchod s LH_2 nejvíce rozvinul v Severní Americe (kapacita zkapalňování vodíku v Severní Americe je asi desetkrát větší než v Evropě). Kapalný vodík přepravovaný nákladním vozidlem se poté odpařuje na vysokotlaký produkt, který se používá u zákazníka.



Zdroj: Fotobanka společnosti AirLiquide, 2015

Obrázek 21. Silniční cisterna provozovaná společností Air Liquide pro přepravu LH_2 ke koncovému uživateli.

Hlavním problémem této přepravní trasy je kapitálově náročný proces zkapalňování. Proces zkapalňování je také nákladný. Energie vložená do zkapalňování představuje 30–40 % nižší výhřevnost vodíku (ve srovnání s 10 % potřebnými pro stlačování plynu) [58]. Náklady na



elektřinu tvoří 50–80 % nákladů na zkapalňování. Rozhodujícím faktorem mezi přepravou LH₂ a plynného vodíku CGH₂ je vzdálenost. Počet nákladních vozidel pro přepravu LH₂ závisí na poptávce po vodíku a lokaci místa zkapalňování. Kapacita nákladních vozidel na kapalné látky je však mnohem větší než kapacita nákladních vozidel na stlačený plyn, a proto je tento způsob dodávky méně závislý na přepravní vzdálenosti. Investiční náklady na nákladní vozidlo a provozní náklady (palivo, práce) jsou tak mnohem nižší. V důsledku toho je přeprava kapalných látek na dlouhé vzdálenosti (přibližně od 400 km do tisíců kilometrů) a přeprava středního množství vodíku ekonomičtější než přeprava plynných látek. Je však třeba vzít v úvahu dostupnost LH₂. V současné době obsluhují trh s průmyslovým vodíkem čtyři zkapalňovací závody v Evropě a deset v Severní Americe. Růst trhu by odůvodnil výstavbu nových zkapalňovacích zařízení. Zvětšení zkapalňovacích kapacit by umožnilo výrazné zvýšení nákladů. Tento způsob dodávek však závisí na ceně elektřiny a na rozhodnutí o instalaci nových zkapalňovacích jednotek. Lepší technologie by mohly nabídnout možnosti snížení investičních nákladů, zlepšení energetické účinnosti procesu zkapalňování a snížení množství ztrát vodíku v důsledku vypařování během skladování a přepravy (míra vypařování, která závisí na velikosti, tvaru, izolaci zásobníku a době skladování, se obvykle pohybuje v řádu 0,2 % za den na jeden zásobník o objemu 100 m³). Probíhá řada studií, jejichž cílem je zlepšit technologie zkapalňování a navrhnout nové přístupy (např. zlepšení orto-para konverze, vývoj magnetického chlazení atd.).

5.2 Železnice

První vodíkový vlak ve Velké Británii, vyvinutý v rámci projektu HydroFLEX, vyjel na trasu po hlavních železničních tratích ve Warwickshire v září 2020. V příštích několika letech budou jezdit další vlaky na palivové články po celém Německu. Otázkou však zůstává, jak nejlépe dodávat vodík do čerpacích stanic pro lokomotivy. Jednou z možných tras je železnice, kterou podporuje Hesenská státní energetická agentura. Společnost DB Energie, dodavatel energie německému národnímu železničnímu operátorovi Deutsche Bahn, zadala úkol prozkoumat, jak toho lze dosáhnout z hlediska technické, provozní a právní proveditelnosti. Tato otázka byla zkoumána na základě stávajícího zdroje vodíku v průmyslovém parku Höchst ve Frankfurtu nad Mohanem na dvou konkrétních trasách v oblasti Rýn – Mohan (viz [obrázek 22](#)).



Zdroj: NPROXX, 2020

Obrázek 22. Přeprava vodíku po železnici.

Podle závěrů odborníků společnosti DB Energie bylo možné zásobovat infrastrukturu pro doplňování vodíku vodíkem po železnici. Oproti silniční dopravě má mnoho výhod, jako jsou přesné plánování přepravních časů, vysoká spolehlivost a bezpečnost, možnost přepravy velkých množství a odlehčení silniční dopravě v metropolitních oblastech. Z technického a právního hlediska neexistuje nic, co by hovořilo proti přepravě po železnici. Zatím však neexistují žádné transportní obalové soubory na přepravu vodíku, které by byly schváleny pro železniční přepravu – existují pouze pro silniční přepravu. Vzhledem k tomu, že požadavky jsou velmi podobné, lze očekávat, že certifikace pro použití na železnici by mohla být udělena v dohledné době. Pro zjištění proveditelnosti a hospodárnosti by měla být vypracována samostatná studie, která by zjistila, zda je železniční doprava hospodárnější než silniční. Na obou zkoumaných trasách si železniční doprava vedla o něco hůře. Z toho však nelze vyvozovat obecná tvrzení. Silniční přeprava vodíku však není skutečně udržitelným řešením, zejména pokud se v budoucnu bude pokračovat v doplňování paliva do vlaků na palivové články.

5.3 Potrubí

K distribuci velkých množství (desítky tisíc m^3/h) plynného vodíku na průmyslový trh se dnes používá řada komerčních vodíkových potrubí. Jejich délka se pohybuje od necelého kilometru až po několik stovek kilometrů. Hlavními aktéry jsou společnosti vyrábějící průmyslové plyny, konkrétně Air Liquide, Air Products, Linde a Praxair. V reakci na zvýšenou poptávku po vodíku ze strany převážně rafinerií se rozšiřují stávající sítě a budují se nové úseky. Například v březnu 2009 oznámila společnost Air Products rozšíření sítě vodíkových potrubí na pobřeží Mexického zálivu v Louisianě o 60 km. Délka vodíkové sítě se odhaduje na přibližně 1 600 km v Evropě a 1 100 km v Severní Americe. Většina potrubí se nachází v místech, kde se v rafinérském a chemickém průmyslu spotřebovává velké množství vodíku. Jedná se o systémy na severu Evropy (Nizozemsko, severní Francie a Belgie), v Německu (Porúří a Lipsko), ve Spojeném království (Teesside) a v Severní Americe (Mexický záliv, Texas – Louisiana,



Kalifornie, Alberta). Menší soustavy existují také v Jižní Africe, Brazílii, Thajsku, Koreji, Singapuru a Indonésii. Délka těchto plynovodů je v porovnání s celosvětovým systémem plynovodů pro přepravu zemního plynu, který přesahuje 2 000 000 km, celkově malá.

Na **obrázku 23** jsou zobrazeny části celosvětové sítě vodíkových potrubí. Například 240 km dlouhé potrubí v německém Porúří (**obrázek 23 a**), které společnost Air Liquide získala v roce 1998, je v provozu od roku 1938. V rámci evropského projektu „Zero Region“ pro využití vodíkové energie nainstalovala společnost Linde v průmyslovém parku Frankfurt-Hoechst vodíkové potrubí o průměru 1“ a tlaku 900 bar v délce 1,7 km pro zásobování osobních vozidel s palivovými články.



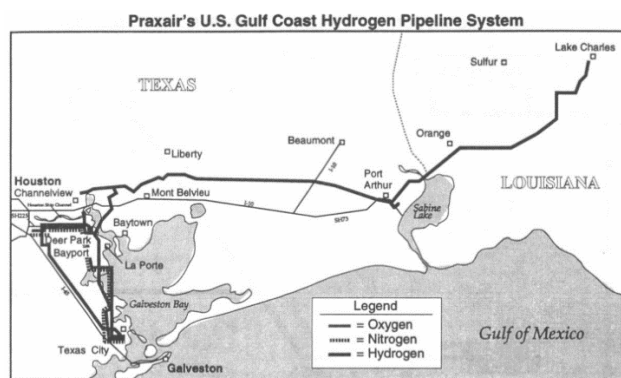
a



b

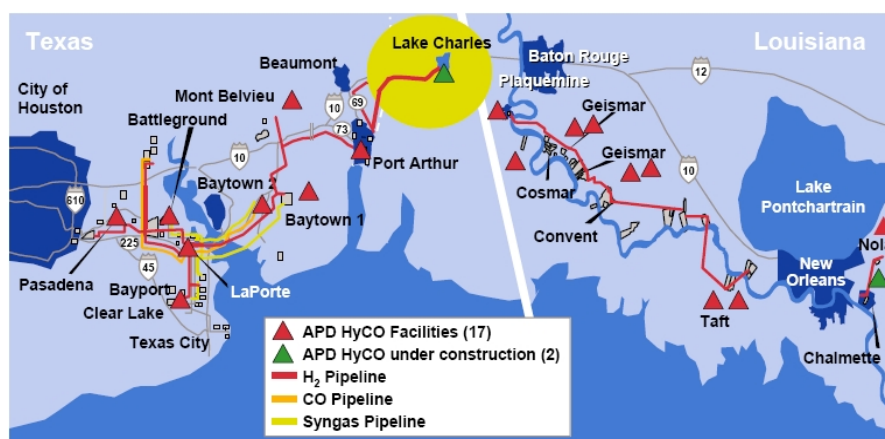


c



Source: Praxair, Inc.

d



e

Obrázek 23. Hlavní vodíková potrubí ve světě: (a) vodíkové potrubí společnosti Air Liquide v zemích Beneluxu, Francii a Německu (Porúří); b) vodíkové potrubí společnosti Air Liquide na pobřeží Mexického zálivu (USA); c) vodíkové potrubí společnosti Linde v Německu; d) vodíkové potrubí společnosti Praxair na pobřeží Mexického zálivu (USA); e) vodíkové potrubí společnosti Air Product na pobřeží Mexického zálivu (USA).

Potrubí vyžaduje vhodnou konstrukci, instalaci a postupy údržby. Provozní tlak vodíkových potrubí je obvykle nižší než 100 barů (nejčastěji 40 až 70 barů) a průměr potrubí (D) se obvykle pohybuje od 10 do 300 mm. Současná potrubí jsou vyrobena z oceli. Technickým problémem je vodíkové křehnutí kovových potrubí a svarů, které se projevuje ztrátou tažnosti a praskáním při namáhání. Pro vodíková potrubí se používají nízkouhlíkové, nízkolegované a nízkopevnostní oceli, aby se snížilo riziko křehnutí (např. ocel API X42 s obsahem uhlíku $C < 0,2\% \text{ hm.}$ a manganu $Mn < 1,3\% \text{ hm.}$). Tyto typy oceli v sobě spojují ekonomickou dostupnost s odpovídajícím rozsahem fyzikálních vlastností, jako jsou pevnost, tuhost, tažnost a svařitelnost. Z bezpečnostních důvodů je většina potrubí uložena v zemi a ocel je chráněna nátěrem nebo katodovou ochranou, aby se zabránilo korozi.

Nedílnou součástí výstavby potrubí je mnoho svařování při spojování jednotlivých dílů, přičemž před zahájením provozu se z bezpečnostních důvodů provádí minimum kontrol. Využití potrubní sítě vyžaduje také kompresorové stanice, protože vodík je obvykle k dispozici



při nízkém tlaku. Vodíkové kompresory napájející potrubní systém se obvykle nacházejí v místech, kde se vodík vyrábí. Kompresory jsou drahé a vyžadují náročnou údržbu, proto se nepoužívají, je-li k dispozici jiná alternativa. Například při výrobě vodíku ze zemního plynu (parní reformování metanu) lze vstupní surovinu, zemní plyn, stlačit a výrobní zařízení provozovat při vyšším tlaku. Třecí ztráty v potrubí s vodíkem jsou mnohem nižší než u zemního plynu, protože viskozita vodíku je nižší (ztráta energie při přepravě vodíku činí přibližně 4 % energetické hodnoty).

Vodíkové potrubí přenáší přibližně o 30 % méně energie než potrubí pro zemní plyn, a to kvůli nižší objemové hustotě vodíku. Distribuce většího množství energie ve vodíkovém potrubí vyžaduje zvýšení průtočného tlaku (> 100 bar). Toto zvýšení tlaku může mít vliv na materiál použitý při stavbě potrubí. Kromě toho by se provozní podmínky vodíkového potrubí pro energetické aplikace lišily od průmyslového potrubí, které dnes pracuje při téměř konstantních tlacích bez významných tlakových cyklů. Potrubí pro vodíkovou energii by muselo dokázat odolávat kolísání tlaku. Tato skutečnost může být důvodem k obavám kvůli náchylnosti ocelí k vodíkovému křehnutí, které ovlivňuje mechanické vlastnosti potrubí a snižuje jeho odolnost vůči trhlinám v důsledku únavy materiálu. O jevech souvisejících s vodíkovým křehnutím pojednává přednáška „Bezpečnost skladování vodíku“. Obnovil se zájem o výzkum nových materiálů pro potrubí slučitelných s vodíkem a jejich vhodnosti k provozu při vyšším tlaku a ke snížení investičních nákladů. Vědci zkoumají nové typy oceli, aby lépe porozuměli vodíkové křehkosti a aby dokázali určit optimální složení oceli a postupy vhodné pro výstavbu nové potrubní infrastruktury nebo potenciální využití stávající ocelové infrastruktury.

Současný výzkum se rovněž zaměřuje na alternativu ke kovovým potrubím, aby bylo možné dosáhnout cílů v oblasti nákladů a efektivity pro přenos a distribuci vodíku. Zkoumají se polymerní a vlákna vyztužená polymerní potrubí, jejichž výhodami jsou nižší hmotnost, snazší manipulace, spojování a svařování a netečnost vůči korozi a vodíkové křehkosti ve srovnání s ocelí. Polymerní potrubí, která se v současné době používají v distribuční síti zemního plynu, jsou vyrobena z polyethylenu a jejich tlaková kapacita je omezena na 10 bar. Zajímavější jsou polymery, jako je například polyamid, protože výrazně snižují prostupování vodíku a jejich tepelně-mechanické vlastnosti umožňují, aby potrubí odolalo provoznímu tlaku 20 bar a provozní teplotě 80 °C.

Plastové potrubí proto může představovat vhodnou alternativu k oceli díky úspoře nákladů na instalaci a údržbu. Náklady na tyto nové polymerní materiály však mohou být velmi vysoké. Potrubí vyrobené z kompozitních materiálů vyztužených vlákny z polymeru a plastu (FRP) se skládají z termoplastické vložky (většinou polyethylenu) obalené vysokopevnostními vlákny (obvykle aramidovými vlákny) potaženými vrstvou termoplastu. Tato poslední vrstva chrání potrubí před vlivy prostředí a pomáhá zachovat obal, který odpovídá za mechanické vlastnosti. V porovnání s obyčejným plastovým potrubím umožňuje obalení aramidovými vlákny dosáhnout tlaku až 100 bar. Vyztužené plastové potrubí se již používá pro rozvod zemního

plynu a ropy na Středním východě a jejich vývoj pro rozvod vodíku je v současnosti součástí vodíkového programu amerického ministerstva energetiky (obrázek 24). Potrubí FRP by se mohlo ukázat coby nákladově efektivní náhrada kovového potrubí, a to při instalaci dlouhých segmentů (200 až 300 metrů). Výrobní proces však neumožňuje vyrábět plastové potrubí se stejnou světlostí jako potrubí ocelové (100 a 150 mm). Stále je zapotřebí dalšího vývoje, aby bylo možné vyhodnotit proveditelnost velkovýroby, posoudit technologii spojování a vypracovat předpisy a normy pro potrubí z FRP pro rozvod vodíku.



Obrázek 24. Kompozitní potrubí z FRP.

6. Stacionární aplikace

6.1 Systémy kombinované výroby elektřiny a tepla (CHP)

V tradičních zařízeních kombinované výroby elektřiny a tepla (kogeneračních zařízeních) se elektřina a teplo vyrábějí spalováním zemního plynu ve spalovacím pístovém motoru nebo turbíně. Kogenerační systémy založené na FC vyrábějí elektřinu a ohřívají vodu v elektrochemické reakci popsané výše. Uvažuje se o dvou technologiích FC: Palivový článek s tuhými oxidy (SOFC) a PEM FC. Zemní plyn se přemění na vodík a směs vodíku, oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého (tzv. synplyn) s nečistotami se přivádí přímo do FC, kde se vyrábí energie. V systémech PEM FC, které využívají nižší teploty, je třeba synplyn dále čistit, aby se odstranil oxid uhelnatý a sirnaté sloučeniny. Mikrokogenerační zařízení byla v Evropě zavedena v rámci projektu Callux (<http://enefield.eu/>).

6.2 Výroba záložní energie

Hlavním cílem tohoto typu technologie je zajistit okamžité napájení v případě výpadku elektrické energie. Výkon tohoto zařízení se pohybuje mezi 16 a 80 kW s až devíti vodíkovými lahvemi. Hlavními výhodami této aplikace jsou:

- Vysoká spolehlivost a rychlé uvedení do provozu.
- Škálovatelná autonomie, závisí pouze na objemu plynového zásobníku.
- Nenáročná údržba.
- Čistý a tichý provoz [1].

Mezi potenciální uživatele tohoto typu aplikace patří: telekomunikace, datová centra, nemocnice, armáda, průmysl, luxusní hotely atd. Příklad systému je znázorněn na [obrázku 25](#), který obsahuje záložní napájecí jednotku FC použitou v projektu IP Energy (Aix-en-Provence, Francie). Systém záložního napájení o výkonu 30 kW instalovaný v roce 2008 je prvním kontejnerovým řešením. Vnitřní zásobník plynu umožňuje provoz po dobu 4 hodin.



Obrázek 25. UPS s vodíkovými palivovými články ve spojení s datovým centrem IP Energy.

Bezpečnostní prvky a koncepce systému jsou následující:

- Systém FC má dvě oddělená odvodňovací potrubí, jedno pro kyslík a druhé pro vodík, která vypouštějí plyn na střechu zásobníku v bezpečné vzdálenosti, aby se zabránilo smíchání kyslíku a vodíku při vypouštění. Po vypuštění zůstává v systému zbytkové množství vodíku.
- Procesní prostor je vybaven dvěma vodíkovými senzory, které mohou spustit nouzové zastavení, pokud koncentrace vodíku v zásobnících překročí 0,4 % obj. Pokud je zjištěna abnormální koncentrace vodíku, dojde k bezpečnostnímu zastavení a provedou se následující akce:
 - Zastaví se všechny systémové procesy.
 - Aktivuje se mechanická ventilace.
 - Izolují se zásobníky plynu uzavřením elektromagnetických ventilů.
- Detekce vodíku je nepřetržitě monitorována, i když je systém v pohotovostním režimu. V případě výpadku detekce systém provede bezpečnostní zastavení.
- Kontejnery jsou vybaveny požárními hlásiči. V případě jejich aktivace je třeba provést následující kroky:
 - Zastaví se všechny systémové procesy.
 - Izolují se zásobníky plynu uzavřením elektromagnetických ventilů.
 - Odpojí se ventilace.



- V krytu FC musí být zabráněno vzniku nebezpečné výbušné atmosféry v důsledku možného úniku nebo uvolnění vodíku. Pasivní preventivní opatření zahrnují mimo jiné: použití trvale zabezpečených spojů, které jsou konstruovány tak, aby omezovaly maximální rychlost uvolňování na předvídatelnou hodnotu, a přirozená ventilace. Aktivní metody prevence zahrnují mimo jiné: nucenou ventilaci, systém detekce hořlavých plynů, jiné prostředky detekce úniku (např. měření tlaku vzhledem k nastavení řídicího systému).
- Vnitřní část pláště, kam může vodík unikat nebo se šířit, není klasifikována, protože bezpečnostní bariéry zajišťují, aby v místě úniku nebo hromadění nedocházelo k úniku nebezpečného vodíku z hlediska událostí ATEX. Nicméně všechna zařízení instalovaná těsně pod stropem kontejneru a schopná zapálit hořlavou směs vodíku a vzduchu jsou certifikována pro ATEX zónu 2. Jedná se zejména o vodíková a požární čidla a ventilační systém. Kromě toho je elektrický prostor systémově oddělen od technologického prostoru.
- Kyslík není ve vzduchu hořlavý, ale podporuje proces hoření. Únik kyslíku může být příčinou požáru. Riziko požáru se zvyšuje, je-li atmosféra obohacena kyslíkem. Je třeba zabránit jakémukoli kontaktu kyslíku s organickými látkami z důvodu nebezpečí požáru.
- Při konstrukci a provozu tohoto systému jsou přijata obecná opatření k prevenci rizik:
 - Správná volba materiálů (např. odmaštěná korozivzdorná ocel), použití chrániček, potrubí bez prudkých ohybů, těsné spoje atd.
 - Omezení průtoku kyslíku v závislosti na tlaku.
 - Ochrana kyslíkových potrubí filtry pro zachycení prachu, který by se mohl vznítit.
 - Přirozené a nucené větrání v technologickém prostoru.
 - Zkrácení délky potrubí pod vysokým tlakem, prevence ohrožení potrubí elektrickými součástmi.
 - Přeskupení jednotek obsahujících kyslík ve vymezené zóně (oddělení).
- Dodržování postupů kontroly a údržby (pravidelné zkoušky) zařízení [1].

7. Námořní aplikace

Vodíkové palivové články se osvědčily v řadě aplikací, včetně autobusů, nákladních a osobních automobilů, vysokozdvihných vozíků, a dokonce i osobních vlaků. Díky úspěchu v těžkých pozemních vozidlech se palivové články nyní integrují i do námořních plavidel. Palivové články budou hrát klíčovou roli při řešení emisí skleníkových plynů (GHG) v námořním průmyslu v průběhu plavby i v přístavech.



Je známo, že námořní doprava je významným zdrojem emisí skleníkových plynů. Vysoké emise skleníkových plynů jsou důsledkem tradičně nekvalitního paliva používaného v lodních motorech, které produkuje vysoké emise. Tlak veřejnosti na prevenci znečištění ovzduší a klimatických změn přiměl v posledních letech vlády a další organizace k přijetí opatření na jejich snížení. V důsledku toho se po celém světě zavádějí předpisy o snižování emisí skleníkových plynů zaměřené na námořní dopravu. Příklady:

- Norský parlament přijal v roce 2018 rezoluci na ochranu fjordů, které jsou světovým dědictvím: tato rezoluce zastaví veškeré emise z výletních lodí a trajektů ve fjordech do roku 2026 [59].
- Normy viditelných emisí státu Aljaška omezují neprůhlednost všech námořních plavidel v okruhu tří mil od pobřeží.
- Mezinárodní námořní organizace (IMO) přijala závazná opatření ke snížení emisí skleníkových plynů a k jejich úplnému odstranění do konce tohoto století. Její původní strategie zajistí snížení celkových emisí skleníkových plynů z mezinárodní námořní dopravy do roku 2050 nejméně o 50 % v porovnání s rokem 2008.
- Evropská organizace pro námořní bezpečnost (EMSA) plánuje do roku 2050 snížit emise oxidu uhličitého z námořní dopravy v EU nejméně o 40 % (oproti úrovni z roku 2005). Dalšími akčními oblastmi jsou Arktida, Střední Amerika, Středozevní a Černé moře, Japonsko, Korea a Austrálie.

Tyto emisní předpisy budou mít významný dopad na námořní plavidla a organizace, které je provozují. Aby se provozovatelé flotil námořních plavidel mohli těmto změnám přizpůsobit, potřebují řešení, která zásadním způsobem sníží emise. Vzhledem k vysokému počtu různých typů plavidel potřebuje námořní průmysl skutečné řešení s nulovými emisemi, které lze použít pro různé typy plavidel.

Akumulátory představují bezemisní řešení napájení pro menší plavidla, která pracují v krátkých pracovních cyklech, například malé osobní trajekty a jezerní lodě. Nižší hustota výkonu a vyšší hmotnost však v mnoha aplikacích použití akumulátorů omezují. Pro námořní plavidla představují palivové články jedinou životaschopnou možnost s nulovými emisemi. Stejně jako akumulátory vyrábějí palivové články elektřinu s vysokou účinností pomocí elektrochemického procesu. Rozdíl je v tom, že v palivovém článku je energie uložena odděleně ve formě vodíku. Dokud je k dispozici palivo, budou systémy palivových článků vyrábět elektřinu jako generátor. Jedinými emisemi z palivového článku jsou vodní pára a teplo.

Vodíkové palivo lze navíc vyrábět z obnovitelných zdrojů, včetně solární, větrné, vodní a geotermální energie. Náklady na výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů každoročně klesají, a to zejména díky skutečnosti, že se v Evropě, Austrálii a Chile začínají objevovat velké výrobní

projekty. Pokud je palivový článek poháněn obnovitelným vodíkem, představuje skutečný zdroj energie s nulovými emisemi.

Přechod na nový zdroj energie je náročný úkol. V případě palivových článků pro námořní plavidla jsou překážkami infrastruktura pro doplňování paliva a dostupnost vodíku v přístavech. Než budou moci provozovatelé pohánět svá plavidla palivovými články, je třeba dále rozvíjet infrastrukturu pro zásobování vodíkem a čerpání paliva.

V bližším časovém horizontu jsou reálné hybridní aplikace s akumulátory a palivovými články. Vyžadují méně paliva a stále splňují cíl nulových emisí. Těmito aplikacemi jsou:

- pohon menších plavidel, jako jsou trajekty a říční lodě,
- napájení pomocných systémů na větších plavidlech, jako jsou výletní lodě, kde jsou nároky na pomocnou energii vysoké,
- napájení plavidel kotvicích u pobřeží.

Použití palivových článků pro námořní aplikace má tři hlavní výhody:

- Modulární napájecí systémy lze přizpůsobit mnoha požadavkům na zatížení.



Obrázek 26. Modul lodních palivových článků Ballard o výkonu 100 kW

Palivové články Ballard PEM (s protonovou výměnnou membránou) jsou modulární (obrázek 26) a lze je souběžně používat v různých kombinacích tak, aby poskytovaly výkon a redundanci potřebnou pro plavidlo, a to od 100 kW do 1 MW nebo i více.

- Stejnoseměrné napájení je kompatibilní s různými typy elektrické architektury.



Palivové články Ballard PEM jsou významným zdrojem stejnosměrného proudu, který je kompatibilní s akumulátorovými a hybridními elektrickými soustavami. Mohou být nasazeny v paralelních konfiguracích, aby splňovaly proměnlivé požadavky na výkon:

- hybridního elektrického pohonu,
 - pomocných energetických systémů.
- Systémy palivových článků mají flexibilní konfiguraci.

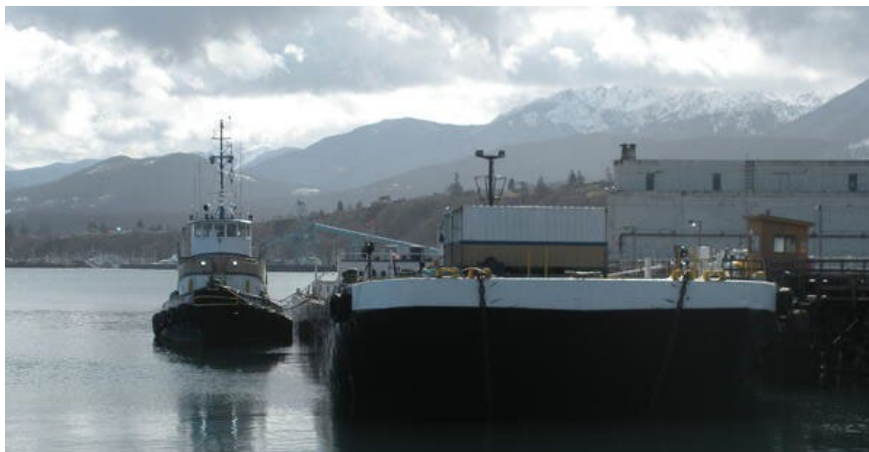
V systému palivových článků jsou prvky výroby energie a skladování paliva oddělené, což konstruktérům lodí nabízí větší flexibilitu než použití akumulátorů. Systém napájení palivovými články Ballard disponuje flexibilní konfigurací, která se přizpůsobí prostorovým omezením plavidla. Lze jej rozdělit na několik modulů umístěných na různých místech. Kromě toho mohou odborníci společnosti Ballard vyhodnotit provozní cykly jakékoli velikosti nebo typu námořního plavidla. Vývoj životaschopných a praktických řešení jim umožňuje určení optimálních vlastností:

- hybridní architektury,
- výkonu palivových článků,
- požadavku na snižování odběru,
- požadavku na skladování paliva,
- odhadované spotřeby paliva.

Palivové články lze použít na různých typech plavidel, např. trajektech, výletních lodích, říčních plavidlech atd. V případě trajektů mohou modulární, škálovatelné systémy palivových článků zajistit pohon malých i velkých trajektů s nulovými emisemi. Očekává se, že první trajekty s nulovými emisemi budou poháněny hybridní architekturou palivových článků a akumulátorů. Konkrétní poměr akumulátorů a palivových článků bude záviset na délce trasy a jízdním řádu. Vzhledem k tomu, že palivové články poskytují značný stejnosměrný výkon, mohou také poskytovat energii, kterou lze rozvést po celém trajektu (nebo jiném plavidle) a napájet tak jeho pomocné elektrické systémy, jako jsou osvětlení, vytápění, klimatizace, lodní přístroje, nouzové systémy, kuchyně a další palubní systémy. Přebytkové teplo vyrobené palivovými články lze využít k ohřevu vody pro vytápění, ventilaci, klimatizaci, prádelnu a další účely. Vodu, která vzniká v palivovém článku, lze v případě potřeby opět zužitkovat.

Použití palivových článků na výletních lodích může být jedním z prvních způsobů využití v námořní dopravě. Některé přístavy pro výletní lodě již vyžadují provoz s nulovými emisemi. Na výletních lodích se palivové články používají k výrobě energie pro hotelové účely, nouzové systémy a jako část motorové síly. Aby průmysl v tomto století splnil své cíle na poli dosažení nulových emisí, měly by palivové články zajišťovat 100 % energie na mnoha výletních lodích, protože vodíková infrastruktura je již v pokročilé fázi vývoje.

Palivové články jsou životaschopným řešením pro pohon říčních plavidel s nulovými emisemi, včetně malých lodí, které jsou tlačeny nebo taženy tlačnými čluny a remorkéry, a plavidel s vlastním pohonem. Společnost Ballard již pracuje na ukázkovém projektu pohonu říčních plavidel ve francouzském Lyonu ([obrázek 27](#)). Projekt bude pohánět tlačný člun jako užitkové plavidlo na jedné z nejnáročnějších řek světa, Rhoně.

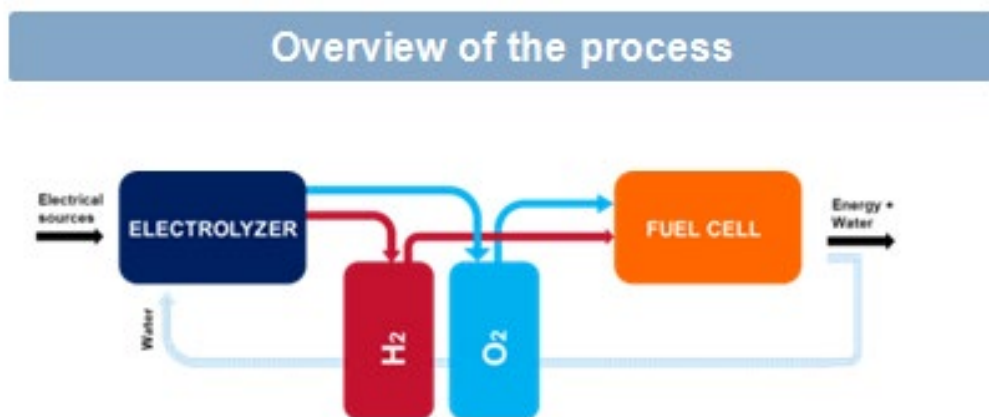


Obrázek 27. Projekt společnosti Ballard k pohonu říčních plavidel ve francouzském Lyonu

Ve snaze snížit znečištění ovzduší a emise uhlíku vlády, přístavní úřady a organizace po celém světě zpřísňují emisní normy pro námořní plavidla. Námořní průmysl se tak ocitá pod tlakem, aby splnil připravované předpisy o nulových emisích. Vodíkové palivové články – osvědčené řešení s nulovými emisemi pro pohon autobusů, nákladních vozidel a dalších těžkých dopravních prostředků – nabízejí reálný potenciál pro různá námořní plavidla. Systémy palivových článků s obnovitelným vodíkem představují nejpraktičtější a nejrealnější řešení s nulovými emisemi. Zavedení této technologie je zásadním krokem ke snížení emisí z námořních plavidel a k vyčištění ovzduší pro svět, ve kterém se lépe žije.

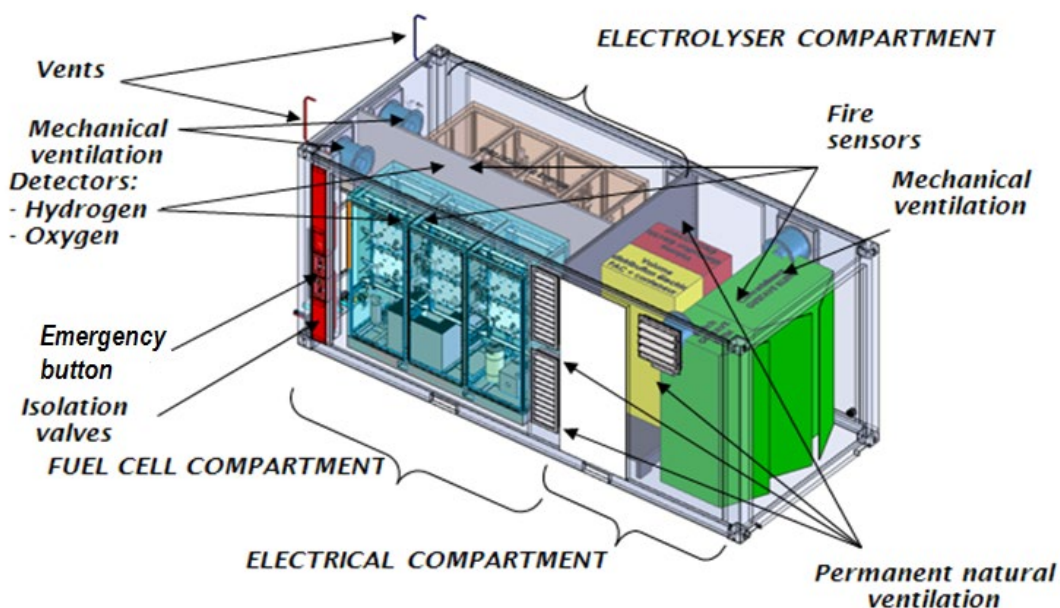
8. Vodíkové systémy skladování energie

Jako příklad vodíkového systému skladování energie lze uvést systém Greenenergy Box. Greenenergy BoxTM je kontejnerový vodíkový řetězec, který se skládá z elektrolyzérů, palivového článku, systému hospodaření s vodou a teplem a systémů elektrických konvertorů spojených se zásobníky vodíku a kyslíku. Greenenergy BoxTM je integrovaný modulární systém, který může nabídnout výkon od 50 do 500 kW s kapacitou úložiště od 0,2 do 2 MW. Jeho princip je znázorněn na [obrázku 28](#). Pro zvýšení výkonu a energetické kapacity lze vzájemně propojit několik systémů, a zajistit tak funkci vysoce výkonného záložního systému na několik hodin [1].



Obrázek 28. Přehled procesu v systému Greenenergy Box.

Fotovoltaické panely dodávají elektřinu do elektrické sítě a její přebytek se využívá v elektrolyzáru k výrobě plynného vodíku a kyslíku. Vyrobený plynný vodík a kyslík se skladují v oddělených zásobnících instalovaných stranou systému Greenenergy BoxTM. Díky systému palivových článků lze uskladněný vodík a kyslík využívat k výrobě elektřiny pro zajištění částečné energetické autonomie budov a také jako záložní systém pro případ výpadku dodávky elektrické energie. Systém Greenenergy BoxTM sám řídí elektřinu získanou z fotovoltaických panelů k elektrolyze vody nebo k dodávce elektřiny do sítě. Kromě toho je teplo, které systém rovněž produkuje při elektrolyze i v procesech palivových článků, rovněž řízeno a využíváno v přilehlých budovách. Vodotěsný a větru odolný systém Greenenergy BoxTM má tři různé sekce: elektrickou sekci, sekci pro palivové články a sekci pro elektrolyzáru, jak je znázorněno na obrázku 29.



Obrázek 29. Schéma systému Greenenergy BoxTM [1]



Systém Greenenergy Box™ je držitelem certifikace CE dle směrnice o nízkém napětí LVD 73/23/EHS, směrnice o elektromagnetické kompatibilitě EMC 89/336/EHS, směrnice o strojních zařízeních MD 98/37/ES a směrnice o tlakových zařízeních PED 97/23/ES. Posouzení rizik se u tohoto systému se provádí ve třech krocích. Nejprve je vypracován dokument nazvaný „Základní bezpečnostní hlediska“, který popisuje hlavní bezpečnostní požadavky, jež by měly být dodrženy ve fázích návrhu architektury a koncepce vodíkového řetězce. Jakmile je architektura systému dostatečně podrobná, provede se přezkoumání HAZOP (HAZard and OPerability Study, tj. studie rizik a provozuschopnosti) každého subsystému s cílem definovat potenciální příčiny jednotlivých odchylek procesu, související potenciální následky a posoudit stávající bariéry. Třetí fází je analýza stromové struktury poruchových stavů, která doplňuje přezkoumání HAZOP a upozorňuje na vady koncepce, nevhodnou konfiguraci systému a vnější zdroje nebezpečí. Všechny bezpečnostní studie jsou shromážděny v dokumentu nazvaném „Syntéza bezpečnostních studií systému Greenenergy Box™ [1]. Celková bezpečnostní strategie vodíkového řetězce je podrobně popsána v následujících částech.

- Potlačení a regulace úniků.
 - Materiály zařízení a potrubí jsou vybrány tak, aby byly slučitelné s použitím vodíku a kyslíku. Z norem IGC15/06, ISO/TR 15916 a ISO 11114-4 se vybírají zejména kritéria vodíkové křehkosti materiálu a kyslíkové koroze. Ke skladování vodíku a kyslíku pod tlakem se běžně používají ocelové lahve. Maximální uhlíkový ekvivalent pro vodík je 0,43, jak je popsáno uvedeno v normě IGC 121/04, odst. 3.
 - Upřednostňují se svařované spoje, které se provádějí tak, aby se minimalizovaly potenciální zdroje netěsností. Minimalizuje se počet spojů a osazených přípojek.
 - Obě části zařízení Greenenergy Box™, elektrolyzátor i palivový článek, jsou vybaveny dvěma vodíkovými a jedním kyslíkovým senzorem. Bezpečnostní uzavírací ventil se spustí při 10 % LFL vodíku (0,4 % H₂ ve vzduchu) a nouzové vypnutí nastane při 25 % LFL (1 % H₂ ve vzduchu). Detekce kyslíku se spustí vždy, když koncentrace kyslíku ve vzduchu dosáhne více než 23 % obj.
 - Kromě toho se úniky vodíku a kyslíku zjišťují také pomocí rozdílu tlaků v pohotovostních fázích. Pokud v zásobníku nebo části potrubí během pohotovostní fáze dojde k poklesu tlaku, může to znamenat, že došlo k úniku. Dojde-li během pohotovostní fáze k menšímu poklesu tlaku, spustí se alarm, a je-li ztráta tlaku příliš velká, systém nebude možné znovu spustit.
 - Před uvedením do provozu se provedou hydraulické zkoušky a zkoušky těsnosti dle požadavků směrnice o tlakových zařízeních.
 - Pravidelné kontroly a program preventivní údržby jsou organizovány tak, aby byla zajištěna maximální úroveň bezpečnosti. Pravidelně se provádějí zejména zkoušky těsnosti regulátorů tlaku, ventilů, potrubí, spojů a přípojek atd. Pravidelně se provádějí

vizuální kontroly, aby se zkontrolovala úroveň koroze. Informace týkající se četnosti kontrol a údržby jsou uvedeny v dodatcích F k normám IGC 121/04 a IGC 13/02.

- Zabránění vzniku hořlavé nebo překysličené atmosféry.
 - Tři sekce systému Greenenergy BoxTM jsou přirozeně větrané díky bočním ventilačním otvorům umístěným na obou stranách pláště (obrázek 33).
 - Sekce palivových článků a elektrolyzéry jsou vybaveny ventilací typu ATEX, která se spouští při koncentraci vodíku a kyslíku nad 0,4 % obj. vodíku, resp. 23 % obj. kyslíku ve vzduchu. Maximální průtoky jsou stanoveny pro tepelný rozptyl, tj. 2 500 m³/h pro sekci palivových článků a 2 700 m³/h pro sekci elektrolyzéry.
 - Modelování náhodného úniku vodíku o průtoku 750 l/min pomocí metody LES (Large Eddy Simulation) vyvinuté na univerzitě v Ulsteru ukazuje, že vodíkovému senzoru trvá přibližně 10 s, než v přirozeně větrané sekci elektrolyzéry zjistí koncentraci vodíku vyšší než 0,4 % obj. Při konzervativní hypotéze 30 s pro dobu reakce vodíkového senzoru lze pozorovat, že po 40 s nepřetržitěho konstantního uvolňování je koncentrace vodíku ve vzduchu vznikající pod stropem stále nižší než LFL vodíku ve vzduchu, tj. méně než 4 % obj. vzduchu. Od tohoto okamžiku vyšle vodíkový senzor signál do řídicího systému, který spustí ventilátor sání vzduchu na maximální otáčky. Lze pozorovat, že vodíkový mrak je zcela zředěn za méně než 2 s.
- Potlačení/omezení zdrojů zapálení.
 - Vnitřní část pláště systému Greenenergy BoxTM, kam může vodík unikat nebo se šířit, není klasifikována, protože bezpečnostní bariéry zajišťují, aby v místě úniku nebo hromadění nedocházelo k úniku nebezpečného vodíku z hlediska událostí ATEX. Nicméně všechna zařízení instalovaná těsně pod stropem pláště a schopná zapálit hořlavou směs vodíku a vzduchu jsou certifikována pro ATEX zónu 2. Jedná se zejména o požární hlásiče, vodíková a kyslíková čidla a ventilační systém.
 - Systém Greenenergy BoxTM a nádrže jsou uzemněny a pospojovány tak, aby byly chráněny před nebezpečím bludných elektrických proudů a elektrostatického výboje.
- Ochrana proti přetlaku.
 - Všechny nádrže a potrubní vedení od systému Greenenergy BoxTM k zásobníkům jsou vybaveny přetlakovým ventilem (PRV). Tlak pojistného ventilu je nastaven tak, aby se ventil PRV aktivoval, když tlak v zásobníku dosáhne 1,15násobku maximálního provozního tlaku.
 - Ventilační otvory skladovacího zásobníku jsou namontovány svisle ve výšce minimálně 3 m. Jsou vybaveny krytem, jehož závaží je kalibrováno tak, aby se zvedalo pod tlakem, aby se zabránilo vniknutí vody do ventilačního otvoru.



- Systém Greenenergy Box™ je vybaven dvěma samostatnými a vzájemně dobře oddělenými průduchy pro vodík a kyslík umístěnými ve výšce minimálně 1 m nad střechou pláště, aby se zabránilo vzniku směsi vodíku a vzduchu obohacené kyslíkem. Každé samostatné odvzdušňovací potrubí je společné pro elektrolyzér a palivový článek a umožňuje snížení tlaku v systému za méně než 2 minuty v případě nouzového vypnutí.
- Nouzové a bezpečnostní vypnutí.
 - Řídicí systém, který se používá k automatickému ovládní systému, slouží také ke spouštění bezpečnostních funkcí. Řídicí systém obsahuje cca 70 bezpečnostních funkcí, které detekují jakoukoli odchylku procesu nebo únik plynů či požár v systému. V závislosti na amplitudě odchylky v porovnání s bezpečnostním prahem parametru se aktivuje nouzové nebo bezpečnostní vypnutí, po kterém následuje vypnutí napájení, odtlakování systému, inertizace a aktivace ventilace (s výjimkou požárů).
 - Hlavní bezpečnostní funkce, tj. detekce vodíku, kyslíku a požáru, nouzový vypínač a hlídací časovač řídicího systému, jsou realizovány pomocí logického kabelu a splňují požadavky úrovně SIL (Safety Integrity Level, úroveň bezpečnostní integrity) 1 [1].

9. Přehled nehod a havárií

9.1 Nehody a havárie v systémech a infrastruktuře FCH

Nehodou se rozumí událost, která může vést ke ztrátě nebo narušení provozu, služeb nebo funkcí, která – není-li zvládnuta – může přerůst v mimořádnou událost, krizi nebo katastrofu [43]. Havárií se rozumí nepředvídaná a neplánovaná událost nebo okolnost, která způsobí materiální ztráty nebo poranění osob. Hlášení nehod/havárií, k nimž došlo v systémech nebo infrastruktuře FCH, jakož i komplexní vyhodnocení jejich hlavních příčin a poučení z nich, jsou pro soukromý i veřejný sektor nesmírně cenné. Informace o nehodách a haváriích souvisejících s technologiemi FCH lze nalézt v následujících známých databázích:

- Získané poznatky z nastalých a takřka nastalých nehod v souvislosti s vodíkem: <http://h2tools.org/lessons/>
- Databáze nehod a havárií v souvislosti s vodíkem HIAD: <https://odin.jrc.ec.europa.eu/odin/index.jsp>
- Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industries (BARPI) <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/?lang=enbarpi/>

Všechny databáze by měly být pravidelně aktualizovány.

Například databázi H2Incidents (před nedávnem přejmenovanou na Hydrogen Tools: Lessons Learned) sestavila laboratoř Pacific Northwest National Laboratory za finanční podpory Ministerstva energetiky USA (<https://h2tools.org/lessons>). V této databázi jsou hlášeny nastalé a takřka nastalé nehody bez uvedení názvů společností a dalších podrobností. Důvěrnost

informací totiž přispívá k ochotě hlásit události. Nehody jsou klasifikovány dle prostředí, vybavení, škod a zranění, pravděpodobných příčin a přispívajících faktorů [3].

Rigas a Amyotte [3] definovali následující hlavní příčiny nehod/havárií:

- Mechanická porucha materiálu nebo zařízení.
- Napadení korozí.
- Nadměrný tlak.
- Křehnutí vodíku při nízkých teplotách.
- Výbuch expandující páry vroucí kapaliny (BLEVE).
- Prasknutí skladovací nádrže v důsledku nárazu rázové vlny nebo projektilu z blízkých výbuchů.
- Lidská chyba.

V této první přednášce se budeme zabývat pouze několika příklady nehod/havárií souvisejících s technologiemi FCH. Následující přednášky však budou obsahovat řadu relevantních příkladů pro každý studovaný systém FCH.

9.2 Havárie při výrobě vodíku



Zdroj: Millet a kol., 2011 [45]

Obrázek 30. Poškozené části vysokotlakého elektrolyzéry PEM.

K výbuchu elektrolyzéry při provozním tlaku 40 MPa došlo 7. prosince 2005 v předváděcím vodíkovém stánku na univerzitě v japonském Kjúšú [44]. Je možné, že po úniku přes membránu došlo k vnitřnímu tryskovému požáru vodíku a kyslíku, který vyústil v požár kovu (titanu) a výbuch nebo prasknutí pláště elektrolyzéry. Vnitřní kapalina a zplodiny hoření unikly do okolí, a to včetně parkoviště mimo budovu laboratoře. Čelní skla několika vozidel byla poškozena v důsledku působení fluorovodíku, který vznikl při rozkladu polymerního materiálu membrány [44]. Francouzsko-ruská studie [45] uvádí analýzu mechanismů poruch vodních elektrolytických článků PEM, které mohou v konečném důsledku vést ke zničení elektrolyzéry. Byl prokázán dvoustupňový proces zahrnující nejprve lokální perforaci pevného polymerního elektrolytu a následnou katalytickou rekombinaci vodíku a kyslíku uložených v komorách pro



elektrolýzu. Fotografie armatury z korozi-vzdorné oceli a matice perforované vodíkovo-kyslíkovým plamenem, který vzniká uvnitř PEM, jsou uvedeny na [obrázku 30](#).

9.3 Nehoda na čerpací stanici

K úniku plynného vodíku došlo na čerpací stanici Emeryville [60]. Selhalo přetlakové zařízení PRD, uvolnilo se 300 kg vodíku, který se následně vznítil. Plyn se vznítil na výstupu z odvětrávacího potrubí a hořel 2,5 hodiny, dokud místní hasiči nepovolili technikům vstoupit do stanice a zastavit přívod plynu. Během této události hasiči evakovali okolní podniky a školy a uzavřeli přilehlé ulice.

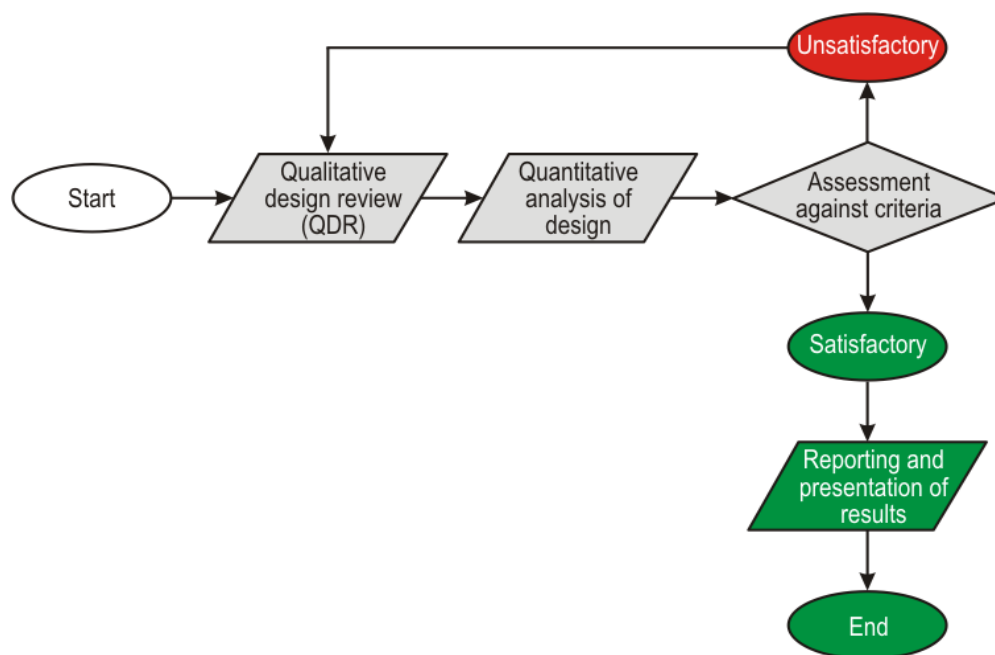
Zjištěné hlavní příčiny této události jsou:

- použití neslučitelných materiálů při výrobě zařízení PRD,
- nesprávná montáž, která vede k nadměrnému utažení vnitřní sestavy,
- nadměrné vytvrzení materiálů vnitřní sestavy výrobcem ventilu.

Těmto problémům se dalo předejít vhodnými postupy zabezpečování jakosti / řízení jakosti během kontroly konstrukce a bezpečnosti.

10. Úvod do rámce a norem vodíkového bezpečnostního inženýrství

Vodíkové bezpečnostní inženýrství (HSE) se definuje jako aplikace vědeckých a inženýrských principů na ochranu života, majetku a životního prostředí před nepříznivými účinky nehod/havárií v souvislosti s vodíkem [46]. Navzdory vědeckému pokroku v oblasti vodíkové bezpečnosti a vodíkového inženýrství v posledním desetiletí, zejména díky partnerství HySafe [47], stále schází formální zastřešující a na výkonu založená metodika pro BOZP. BOZP zahrnuje konstrukční rámec a technické subsystémy. Rámec pro navrhování BOZP, vyvinutý na univerzitě v Ulsteru, je podobný britské normě BS7974 o požární bezpečnosti stavebních konstrukcí [48]. Rozsah tohoto rámce byl rozšířen tak, aby odrážel specifické jevy související s vodíkovou bezpečností, mimo jiné vysokotlaké úniky a rozptyl pod tlakem, samovznícení při náhlém úniku vodíku do ovzduší, tryskové požáry s vysokou hybností, deflagrace a detonace, techniky zmírňování následků, např. odvětrání deflagrace a přirozené/nucené ventilace atd. Proces BOZP obsahuje tři hlavní kroky, jak je uvedeno na [obrázku 31](#).



Obrázek 31. Kroky procesu vodíkově bezpečného inženýrství [44]

Nejprve se provádí kvalitativní posouzení návrhu (QDR) týmem, jehož součástí mohou být investor, inženýr vodíkové bezpečnosti, architekt, zástupci příslušných orgánů, např. záchranných složek, a další zainteresované strany. Tento tým definuje scénáře nehod, předkládá zkušební bezpečnostní návrhy a formuluje akceptační kritéria. Druhým krokem je kvantitativní analýza bezpečnosti vybraných scénářů a zkušebních návrhů, kterou provedou odborně způsobilí technologové s využitím nejnovějších poznatků vědy a techniky v oblasti vodíkové bezpečnosti a validovaných modelů a nástrojů. Třetím krokem je posouzení provozu vodíkového systému a/nebo systému palivových článků v rámci zkušebních bezpečnostních návrhů dle předem stanovených akceptačních kritérií. QDR je kvalitativní proces založený na zkušenostech a znalostech týmu. Umožňuje účastníkům ustanovit celou řadu bezpečnostních strategií. V ideálním případě je QDR prováděno v rané fázi konstrukce a systematickým způsobem, aby bylo možné do technologie aplikace nebo infrastruktury HFC zapracovat všechna podstatná zjištění a relevantní položky ještě před vypracováním pracovních výkresů. V praxi však bude proces QDR pravděpodobně zahrnovat několik iterací, protože proces konstrukce postupně přechází od široké koncepce k větším podrobnostem. Během QDR by měly být stanoveny bezpečnostní cíle. Ty by měly odpovídat konkrétním aspektům návrhu systému, protože systém HSE lze použít buď k vypracování komplexní strategie vodíkové bezpečnosti, nebo k posouzení pouze jednoho aspektu konstrukce. Hlavními cíli vodíkové bezpečnosti jsou ochrana života, snižování škod na majetku a ochrana životního prostředí. Tým QDR by měl ke každému havarijnímu scénáři vypracovat jeden nebo více zkušebních bezpečnostních návrhů. Různé návrhy by měly splňovat stejné bezpečnostní cíle a měly by být



vzájemně porovnány z hlediska nákladové efektivity a proveditelnosti. Na první pohled je zásadní, aby navržené zkoušky omezily nebezpečí zavedením preventivních opatření a zajištěním snížení závažnosti a četnosti následků. Přestože BOZP poskytuje určitou volnost, je při definování návrhů zkoušek povinné plně respektovat příslušné předpisy.

Tým QDR musí stanovit akceptační kritéria, dle kterých lze posoudit kvalitu návrhu. Lze použít tři hlavní metody: deterministickou, srovnávací a pravděpodobnostní. Tým QDR může v závislosti na návrhu zkoušky definovat akceptační kritéria podle všech tří metod. Tým QDR by měl předložit soubor kvalitativních výstupů, které budou použity ke kvantitativní analýze: výsledky architektonické kontroly, cíle vodíkové bezpečnosti, významná nebezpečí a související jevy, specifikace scénářů pro analýzu, jeden nebo více zkušebních návrhů, akceptační kritéria a navrhované metody analýzy. Po provedení QDR by měl tým rozhodnout, který zkušební návrh (které zkušební návrhy) bude pravděpodobně optimální. Tým by měl poté rozhodnout, zda je k prokázání toho, že návrh splňuje cíl/cíle vodíkové bezpečnosti, nutná kvantitativní analýza. V návaznosti na QDR lze provést kvantitativní analýzu pomocí technických subsystémů (TSS), kde lze různé aspekty analýzy kvantifikovat pomocí deterministické nebo pravděpodobnostní studie. Procesu kvantifikace předchází proces QDR ze dvou hlavních důvodů, kterými jsou zajistit plné pochopení problematiky, dále zajistit, aby se analýza zabývala příslušnými aspekty vodíkového bezpečnostního systému, jakož i zjednodušit problematiku a snížit náročnost potřebných výpočtů na nezbytné minimum. Kromě toho by měl tým QDR určit i vhodné metody analýzy. Na výběr jsou jednoduché inženýrské výpočty, simulace CFD, jednoduchá pravděpodobnostní studie, úplná pravděpodobnostní studie atd. Deterministická studie využívající srovnávací kritéria bude obecně vyžadovat méně údajů a zdrojů než pravděpodobnostní přístup a bude zřejmě představovat nejjednodušší metodou k dosažení přijatelného návrhu. Provedení úplné pravděpodobnostní studie bude pravděpodobně odůvodnitelné pouze v případě, že se bude jednat o zásadně nový přístup ke konstrukci vodíkového systému nebo k praxi v oblasti vodíkové bezpečnosti. Analýza může být kombinací některých deterministických a některých pravděpodobnostních prvků. Po kvantitativní analýze by měly být výsledky porovnány s akceptačními kritérii určenými v rámci QDR. Z hlediska posouzení kvality provozu bezpečnostního systému na základě kritérií lze uvažovat o třech základních typech přístupů:

- Deterministický přístup prokazuje, že na základě výchozích předpokladů nenastane definovaný soubor podmínek.
- Srovnávací přístup prokazuje, že návrh poskytuje úroveň bezpečnosti rovnocennou s úrovní bezpečnosti v podobných systémech a/nebo odpovídá normativním předpisům (jako alternativa k BOZP založené na výkonu).
- Pravděpodobnostní přístup prokazuje, že riziko výskytu dané události je přijatelně nízké, např. stejné nebo nižší než riziko stanovené pro stávající podobné systémy.



Pokud žádný ze zkušebních návrhů vypracovaných týmem QDR nespĺňuje stanovená akceptační kritéria, měl by se proces QDR a kvantifikace opakovat, dokud strategie vodíkové bezpečnosti nespĺní tato akceptační kritéria a další požadavky na konstrukci. Při opětovném provádění QDR lze zvážit několik možností podle doporučení [48]: vypracování dalších návrhů zkoušek, přijetí více diskriminačního přístupu k návrhu, např. použitím deterministických technik namísto srovnávací studie, přehodnocení cílů návrhu, např. zda náklady na vodíková bezpečnostní opatření pro prevenci škod na majetku převažují nad potenciálními přínosy. Po nalezení uspokojivého řešení by měla být výsledná strategie BOZP plně zdokumentována. V závislosti na zvláštnostech a rozsahu studie BOZP by zpráva o výsledcích a zjištěních měla dle požadavků obsahovat i následující informace [48]:

- cíle studie,
- úplný popis systému/infrastruktury BOZP,
- výsledky QDR,
- kvantitativní analýza (předpoklady, technické posudky, výpočty, validace metodik, analýza citlivosti),
- posouzení výsledků analýzy na základě kritérií,
- závěry (strategie vodíkové bezpečnosti, požadavky na řízení, případná omezení),
- seznam souvisejících dokumentů (např. výkresy, projektová dokumentace, technická literatura atd.); pro zjednodušení posouzení návrhu BOZP je proces kvantifikace rozdělen do několika technických subsystémů (TSS).

Při vývoji jednotlivých TSS by měly být zohledněny následující požadavky:

- TSS by měly společně přiměřeně pokrývat všechny možné aspekty inženýrství vodíkové bezpečnosti.
- TSS by měly být vyváženy z hlediska své jedinečnosti a možnosti samostatného využití na straně jedné a jejich komplementaritou a synergiemi s jinými TSS na straně druhé.
- TSS by měly být výběrem nejnovějších poznatků v konkrétní oblasti vodíkové bezpečnosti, ověřených inženýrských nástrojů, včetně empirických a poloempirických korelací a soudobých nástrojů, jako jsou modely a kódy CFD.
- TSS by měly být flexibilní, aby umožňovaly aktualizaci stávajících nebo použití nových vhodných a validovaných metod, které v sobě odrážejí nejnovější pokrok v oblasti vědy a techniky vodíkové bezpečnosti.

V současné době jsou navrženy a vyvíjeny následující TSS pro [46]:

- TSS1: zahájení uvolňování a rozptylu.
- TSS2: zapálení.



- TSS3: deflagrace a detonace.
- TSS4: požáry.
- TSS5: dopady na osoby, konstrukce a životní prostředí.
- TSS6: techniky zmírňování následků.
- TSS7: zásah složek civilní ochrany.

Vodíkové bezpečnostní inženýrství je klíčem k úspěchu vodíkového hospodářství. Jedná se o výkonný nástroj pro zajištění vodíkové bezpečnosti kvalifikovanými odborníky na rostoucím trhu s HFC systémy a infrastrukturou. A v neposlední řadě, BOZP může zajistit vysokou úroveň konkurenceschopnosti produktů na bázi vodíku a palivových článků.

11. Úvod do e-Laboratoře

Vzdělávání a odborná příprava pro nově vznikající odvětví palivových článků a vodíkových systémů (FCH) jsou zásadní pro profesní rozvoj současných i budoucích pracovníků. Představují základ vedoucího postavení a konkurenceschopnosti evropských výrobců FCH. Online úložiště digitálních materiálů – e-laboratoř – bylo poprvé vyvinuto v rámci evropského projektu „Nové nástroje pro vzdělávání a odbornou přípravu založené na digitálních aplikacích souvisejících s technologií vodíku a palivových článků“ (tzv. „nástroje NET-Tools“). Původní elektronická laboratoř NET-Tools obsahuje rozsáhlou sadu digitálních nástrojů. Nástroje, které byly považovány za nejvhodnější pro zásahové jednotky, byly zpřístupněny prostřednictvím elektronické laboratoře pro bezpečnost vodíku, která je k dispozici prostřednictvím elektronické platformy HyResponder (<https://hyresponder.eu/e-platform/>) nebo přímo na adrese <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>

Výpočet nebezpečných vzdáleností na základě výkonu, termín nedávno zavedený normou ISO TC197 Vodíkové technologie, je klíčovým prvkem vodíkového bezpečnostního inženýrství pro systémy a infrastrukturu FCH, např. čerpací stanice. Zásady e-Laboratoře pro vodíkovou bezpečnost umožňují posoudit bezpečné vzdálenosti pro nezapálené úniky (velikost hořlavého obalu); zapálené úniky (tryskové požáry); rozpad tlakové vlny při deflagraci, detonaci a prasknutí vysokotlaké zásobní nádrže vodíku při požáru, ohnivé koule atd. Tato dlouho očekávaná sada nástrojů vodíkového průmyslu umožňuje stanovit nebezpečné vzdálenosti pro nezapálené úniky a tryskové požáry v interaktivním režimu, např. změnou parametrů systému, jako jsou tlak a průměr potrubí (netěsnosti). Nejmodernější bezpečnostní nástroje e-Laboratoře pro vodíkovou bezpečnost představují volně přístupnou, rozšířenou evropskou obdobu nástroje HyRAM (Hydrogen Risk Assessment Methods; Metody posuzování rizik související s vodíkem), který byl v minulém desetiletí vyvinut v Sandia National Laboratories (SNL) za finanční podpory Ministerstva energetiky USA. Elektronická laboratoř prokazuje evropské prvenství v oblasti bezpečného vodíkového inženýrství. Umožňuje například vypočítat vzdálenosti ohrožení určené tepelnými a tlakovými účinky ohnivé koule a tlakové vlny po



roztržení nádrže při požáru. Tato funkce v nástroji HyRAM schází a podobný kanadský (UTRQ) rámec je implementován pomocí webového vývojového prostředí Smalltalk Seaside.

11.1 Vědecké principy

Tato část popisuje vědecké principy, které stojí za technickými nástroji e-Laboratoře pro vodíkovou bezpečnost. Nástroje jsou sdruženy do skupin dle podobnosti aplikací.

11.1.1 Nezapálená uvolnění

Teorie nedostatečně rozšířeného proudu [44, 49] stojí za nástrojem „Jet parameters“ (Parametry proudu) a dalšími nástroji souvisejícími s nedostatečně rozšířeným proudem. Umožňuje výpočet parametrů proudění vodíku ve skutečných i fiktivních tryskách. Hustota ve skutečné trysce je potřebná pro použití v zákonu podobnosti pro rozpad koncentrace ve vodíkovém proudění [54, 50] a pro parametry ve fiktivní trysce, které se hojně používají jako okrajové podmínky pro výpočetní simulace dynamiky tekutin (CFD). Nástroj umožňuje výpočet hmotnostního průtoku vysokotlakého vodíku uvolňovaného otvorem v zásobníku i úzkým kanálem se ztrátami. Nástroj pro předpověď axiálního rozpadu koncentrace unikajícího vodíku pro podzvukové, zvukové a nadzvukové proudění využívá podobnostní zákon, který je ověřen v širokém rozsahu podmínek od expandujících až po vysoce expandující proudění [44]. Tento nástroj vypočítává vzdálenost nebezpečí, tj. délku hořlavé obálky, pro proudění s dominující hybností, která představují prakticky všechny reálné úniky z vysokotlakých vodíkových zařízení a skladů.

Teorie nedostatečně roztržitého proudu slouží k vytvoření a ověření univerzálního zákona podobnosti popsaného v následující části, který platí jak pro roztržitý, tak pro nedostatečně roztržitý proud v režimu řízeném momentem hybnosti. Teorie je použita k odvození: univerzální korelace pro délku plamene vodíkového proudu, nástroje pro výpočet doby poklesu tlaku při uvolňování vodíku ze zásobníku atd. Teorie je nezbytná pro provádění vodíkového bezpečnostního inženýrství pro různé aplikace.

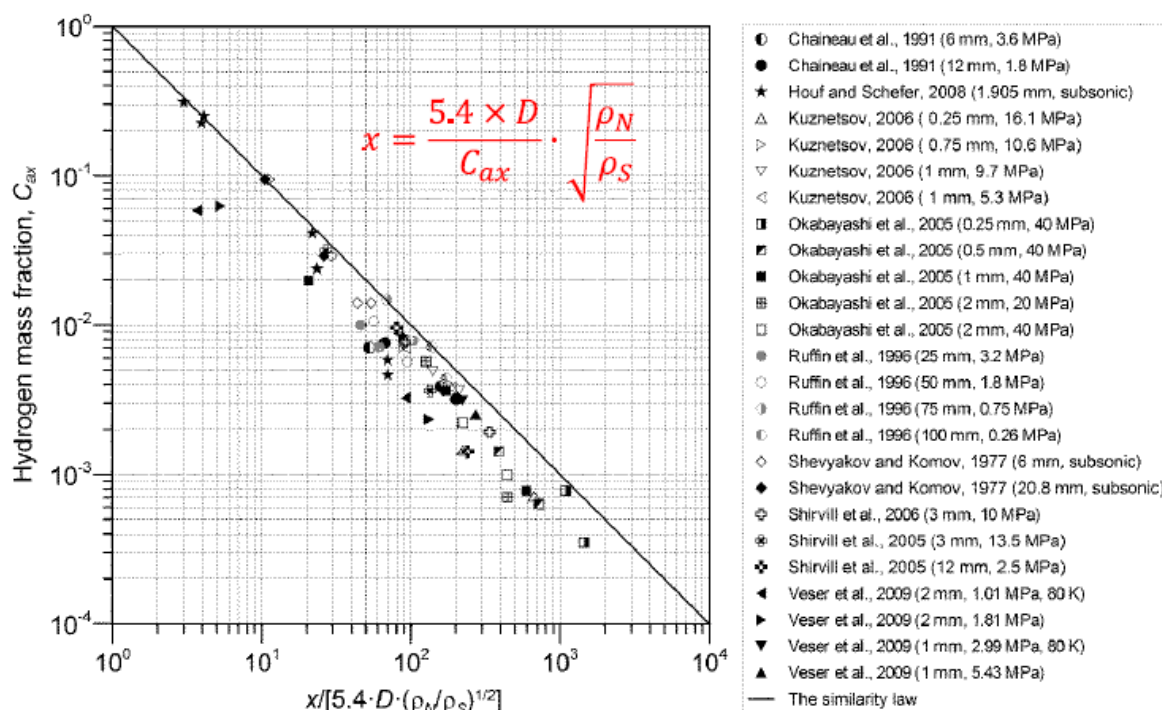
11.1.2 Zákon podobnosti

Je třeba pamatovat, že tepelné účinky tryskových požárů, tlakové účinky deflagrace nebo detonace a tlakové a tepelné účinky protržení vysokotlakého zásobníku při požáru (tlaková vlna a ohnivá koule) by mohly převážit nad nebezpečnou vzdáleností určenou velikostí hořlavé obálky nebo nebezpečnou vzdáleností tryskového požáru. Znalost zákonů popisujících rozptyl vodíku a tvorbu hořlavého mraku, včetně axiálního rozpadu koncentrace pro náhodné proudy, je tedy pro vodíkové bezpečnostní inženýrství nezbytná.

Na obrázku 32 je znázorněn zákon podobnosti pro předpověď axiálního rozpadu koncentrace unikajícího plynu pro podzvukové, zvukové a nadzvukové proudění, který byl odvozen a uveden v [44, 50]. Platí pro širokou škálu podmínek od roztržitých až po velmi nedostatečně roztržitě proudy. Lze jej použít pro výpočet nebezpečných vzdáleností na základě velikosti

hořlavé obálky. Neideální chování vodíku při vysokých tlacích a nedostatečné roztržení proudu na výstupu z trysky jsou posuzovány pomocí Noble-Abelovy stavové rovnice (EoS) pro reálný plyn.

Pro vodíkové proudy do stojatého vzduchu pro pevnou koncentraci vyjádřenou v hmotnostních procentech C_{ax} je poměr vzdálenosti x k průměru trysky konstantní, tj. $x/D = \text{konst.}$ To znamená, že vzdálenost k spodní hranici hořlavosti (nebezpečná vzdálenost) je přímo úměrná průměru úniku. Při konstrukci vodíkových systémů a palivových článků je tedy třeba mít na paměti požadavek na minimalizaci vnitřního průměru potrubí, tj. velikost netěsnosti pro konzervativní scénář prasknutí v plném průřezu, a současně dodržet technologické požadavky na hmotnostní průtok.



Obrázek 32. Zákon podobnosti [44]

11.1.3 Vliv vztlaku

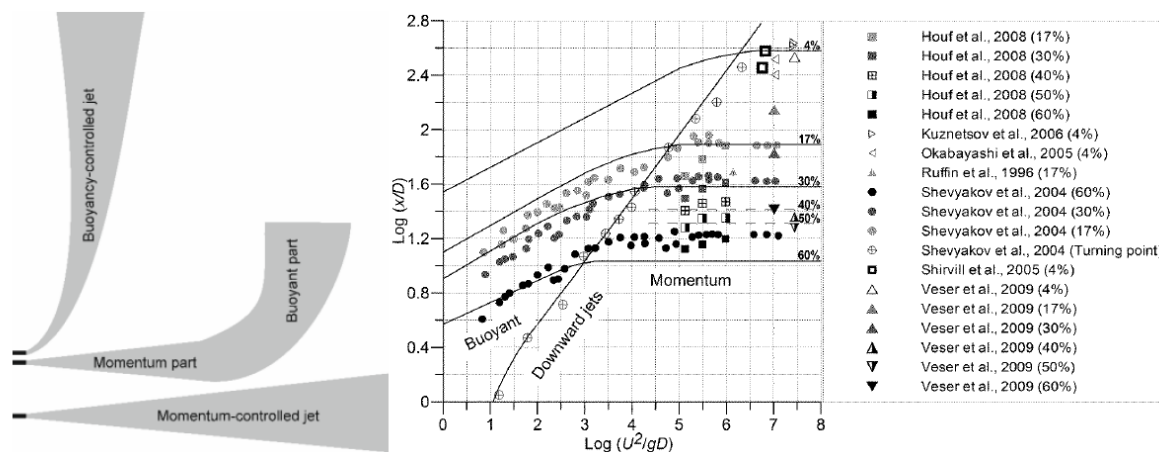
Nástroj „Effect of buoyancy“ (Vliv vztlaku) umožňuje vypočítat zkrácení nebezpečné vzdálenosti pro vodíkové proudění s dominující hybností v okamžiku změny na proudění řízené vztlakem. Vychází z experimentálně ověřené a publikované Ševjakovovy teorie [44]. Inženýrská technika [44] určuje, která část vodíkového proudu (roztržitého i nedostatečně roztržitého) je řízena momentem hybnosti, zatímco zbytek proudu je řízen vztlakem.

Existují tři typy proudění v závislosti na úloze vztlaku dle obrázku 33 (vlevo): proudění s plně dominující hybností není ovlivněno vztlakem; proudění plně řízené vztlakem se rychle odklání z horizontálního do vertikálního směru proudění; třetí typ je přechodové proudění, u kterého je

část blíže k trysce dominována hybností a část vzdálenější od trysky, kde rychlost proudění klesá a zvětšuje se průměr proudu, je řízena vztlakem. Pro bezpečnostní vodíkové inženýrství je důležité vědět, kdy k tomuto přechodu dochází. Přímou totiž ovlivňuje i nebezpečnou vzdálenost, a tedy i na náklady na infrastrukturu.

Na obrázku 33 (vpravo) je uvedeno pět teoretických křivek (plné čáry) a experimentální data pro roztržité proudy a data jiných výzkumníků pro nedostatečně roztržité proudy jsou znázorněna na obrázku 33 (vpravo). Jak vyplývá z dostupných testů použitých k ověření korelace, prakticky všechny nedostatečně roztržité proudy při vodíkových haváriích/nehodách budou řízeny momentem hybnosti. Čtyři z pěti teoretických křivek v grafu se vztahují na koncentrace vodíku 4 %, 17 %, 30 % a 60 % objemových. Každá z těchto čtyř křivek má vzestupnou vztakovou část a plochou část, kde dominuje hybnost. Pátá křivka „Downward jets“ (svislé proudy) je obzvláště zajímavá. U proudu směřujícího svisle dolů udává bezrozměrnou vzdálenost od trysky k bodu obratu, kde proud mění směr proudění z klesajícího na stoupající. Pátá křivka dle očekávání protíná všechny čtyři ostatní křivky v grafu v oblasti přechodu z proudění s dominující hybností k proudění řízenému vztlakem.

Snadno aplikovatelná technika na obrázku 33 (vpravo) může být velmi užitečná při vývoji nákladově efektivních technických řešení vodíkové bezpečnosti. Například nebezpečnou vzdálenost pro uvolnění horizontálního proudu lze podstatně zkrátit, protože jako údaj o oddělení lze brát pouze délku části proudění s dominující hybností nikoliv celkovou vzdálenost, tj. obě části proudu – s dominující hybností a řízené vztlakem – do dolní meze hořlavosti (LFL) 4 % obj. vodíku.



Obrázek 33. Typy proudů v závislosti na úloze vztaku (vlevo), závislost vzdálenosti na poměru průměru trysky x/D , pro konkrétní koncentraci vodíku ve vzduchu, na Froudeho čísle (vpravo).

11.1.4 Pokles tlaku

Nástroj „Blowdown of storage tank“ (Pokles tlaku v zásobníku) slouží k výpočtu dynamiky tlaku uvnitř nádrže během vypouštění za adiabatických a izotermických podmínek, které lze



kombinovat tak, aby se dynamika poklesu tlaku přiblížila realitě. Oba modely udávají obdobnou dynamiku tlaku, ale odlišnou dynamiku teploty uvolněného vodíku.

Model adiabatického poklesu tlaku vychází z předpokladu rychlého uvolnění z vysokotlakého zásobníku a zanedbatelného vlivu přenosu tepla na teplotu uvolňovaného vodíku. Adiabatický model udává nižší teplotu uvolněného vodíku na konci procesu. Zatímco izotermický pokles tlaku v zásobníku vychází z předpokladu relativně dlouhého uvolňování z vysokotlakého zásobníku, takže přenos tepla výrazně mění teplotu uvolňovaného vodíku. Kombinace adiabatického modelu na začátku a následně izotermického modelu poskytuje dobrou aproximaci pro dynamiku teploty uvolněného vodíku pozorovanou při experimentech.

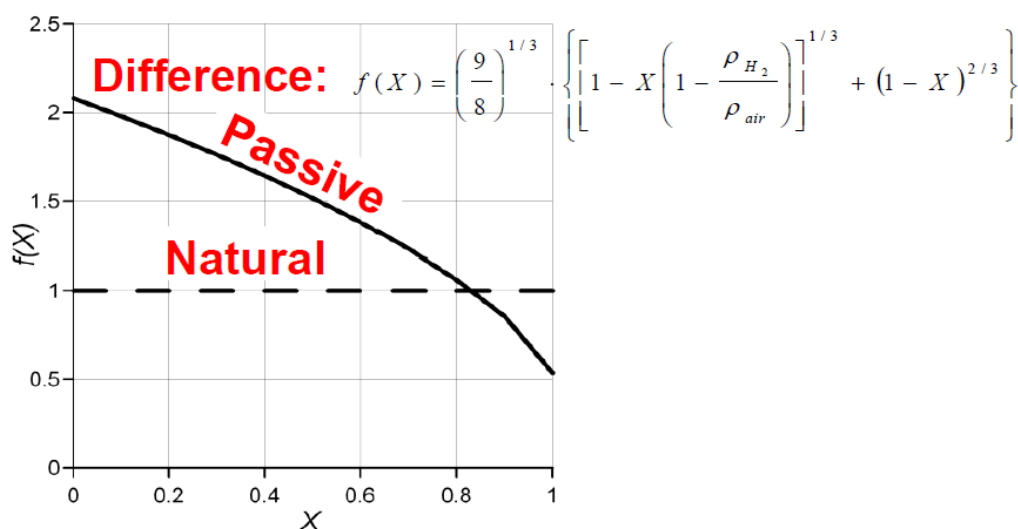
Oba modely jsou postaveny na modelu pro parametry roztržité i nedostatečně roztržité proudy, který popisuje parametry roztržité a nedostatečně roztržité proudy v charakteristických fázích jejich vývoje – v zásobníku, v ústí a na fiktivním (účinném) výstupu z trysky a využívá Noble-Abelovu stavovou rovnici a rovnici o zachování hmoty a energie.

Tento nástroj lze použít k sestavení opatření ke zmírnění rizik a bezpečnostních strategií na základě posouzení požární odolnosti vodíkových nádrží ve vozidlech. Hodnota požární odolnosti by měla být vyšší než součet doby iniciace tepelně aktivovaného zařízení pro uvolnění přetlaku (TPRD) a doby poklesu tlaku ve skladovací nádrži, aby se vyloučilo její katastrofické selhání v případě požáru. Je zřejmé, že použití zařízení TPRD s větším průměrem by vytvořilo větší hořlavý oblak nebo ostrý plamen. Při „zpožděném zapálení“ nebo deflagraci turbulentního hořlavého oblaku by vznikl vyšší přetlak. Z tohoto důvodu by měl průměr zařízení TPRD co nejmenší, pakliže to přispěje ke zvýšení požární odolnosti.

11.1.5 Pasivní ventilace

Nástroj „Passive ventilation“ (Pasivní ventilace) umožňuje výpočet koncentrace vodíku v prostoru se známou kapacitou ventilace pro danou rychlost uvolňování a naopak (výpočet kapacity ventilace pro udržení koncentrace vodíku pod stanovenou úrovní při známé rychlosti uvolňování vodíku).

Model je vyvinut pro předpoklad dokonalého mísení a jsou v něm porovnány rovnice pro pasivní (únik hořlavého nebo toxického plynu) a přirozenou (problémy s kvalitou ovzduší) ventilaci [51], aby se ukázal zásadní rozdíl mezi oběma přístupy. Rovnice přirozené ventilace se zpravidla odvozují za předpokladu, že neutrální rovina se nachází v polovině výšky ventilačního otvoru, avšak pro pasivní ventilaci při náhodném úniku v uzavřeném prostoru může být neutrální rovina umístěna kdekoli pod polovinou výšky ventilačního otvoru. Vývoj modelu pasivní ventilace ukázal, že přesné analytické řešení pasivní ventilace se liší od přibližného řešení pro přirozenou ventilaci více než 2násobně pro chudé a bohaté směsi, jak ukazuje obrázek 34, kde X je molární zlomek vodíku.



Obrázek 34. Rozdíl mezi pasivní a přirozenou ventilací

Při řešení bezpečnostních otázek souvisejících s únikem vodíku je třeba si počínat obzvláště opatrně, protože rozdíly mezi pasivní a přirozenou ventilací mohou mít závažné bezpečnostní důsledky. Podle teorie pasivní ventilace je vertikální ventilace účinnější než horizontální ventilace o stejné ploše, což je třeba zohlednit při návrhu konstrukce pasivních ventilačních systémů.

11.1.6 Nucená ventilace

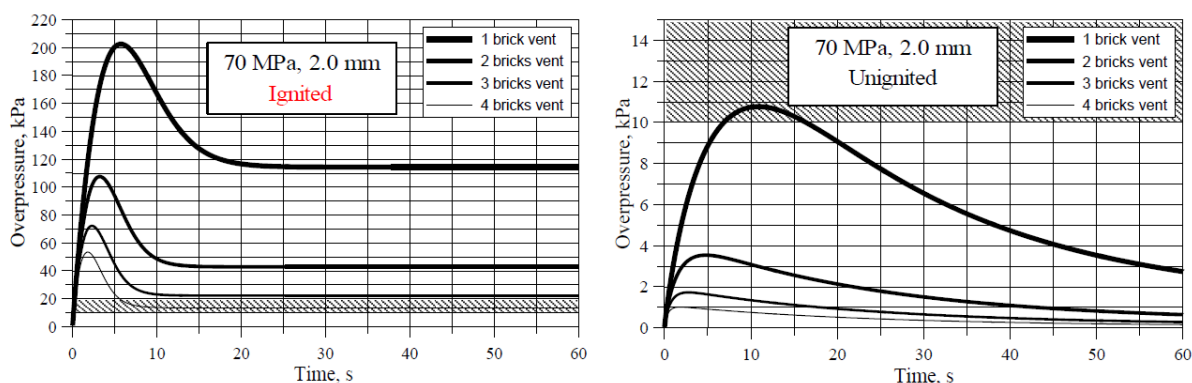
Nástroj „Forced ventilation“ (Nucená ventilace) slouží k výpočtu parametrů mechanického ventilačního systému tak, aby se koncentrace vodíku držela pod požadovanou úroveň. Parametry zahrnují objemový průtok vzduchu, který je nutný u daného hmotnostního průtoku vodíku, který bude nižší než stanovená mez za předpokladu dokonalého mísení. Model je založen na principech pasivní ventilace a výpočtu jejího průtoku vzduchu pro zajištění koncentrace vodíku v uzavřeném prostoru pod požadovanou úrovní. Použití nucené ventilace v numerických experimentech potvrdilo výpočty a prokázalo snížení koncentrace plynu na požadovanou úroveň. To dokladuje, že navrženou metodiku lze použít k výpočtu rychlosti ventilace palivových článků a vodíkových systémů a že ji lze využít jako nástroj pro vodíkové bezpečnostní inženýrství.

11.1.7 Jev tlakové špičky

Dalším unikátním počinem e-Laboratoře vodíkové bezpečnosti, který není k dispozici v žádném jiném podobném softwaru pro posuzování nebezpečí a rizik, je v roce 2010 v Ulsteru odhalený jev PPP („pressure peaking phenomenon“ neboli jev tlakové špičky) [52]. Umožňuje výpočet dynamiky tlaku v uzavřeném prostoru, jako je garáž, v případě nečekaného úniku vodíku. K dispozici jsou možnosti postupného uvolňování vodíku i uvolňování s konstantním hmotnostním průtokem. Nástroj lze použít jak na zapálené (požár od zařízení TPRD), tak na nezapálené (selhání zařízení TPRD) úniky.

Jev tlakové špičky je charakteristický pouze pro plyny lehčí než vzduch, pokud jsou uvolňovány do prostoru s omezenou plochou ventilačních otvorů. PPP je výraznější v případě zapáleného uvolňování než nezapáleného uvolňování ze shodného zdroje [53], viz obrázek 35. Norma ISO vyžaduje, aby se při provádění vodíkového bezpečnostního inženýrství pro vnitřní použití vodíkových systémů a systémů palivových článků zohlednila PPP.

Prevence a zmírňování následků PPP lze dosáhnout pouze snížením hmotnostního průtoku ze zařízení TPRD, tj. zmenšením průměru jeho trysky. Takové opatření bude naopak vyžadovat vyšší požární odolnost nádrží používaných v dopravních prostředcích.

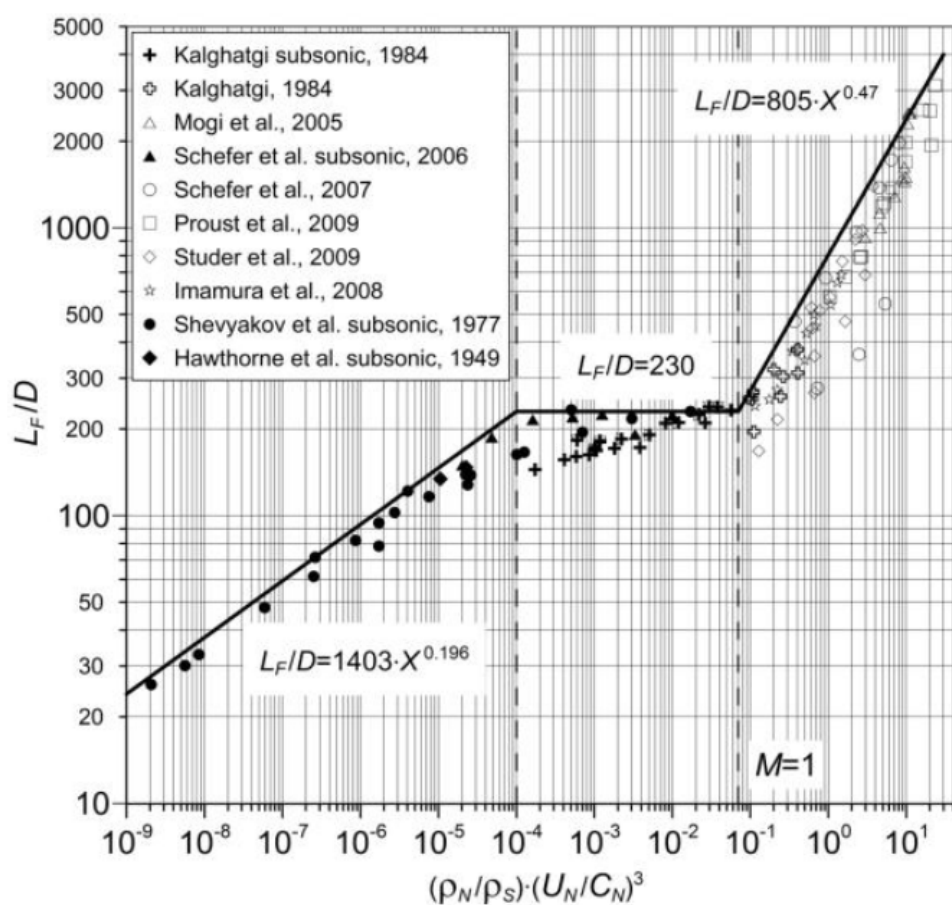


Obrázek 35. Dynamika přetlaku při tryskovém požáru vodíku v garáži: Průměr TPRD 2 mm a skladovací tlak 70 MPa (rychlost uvolňování 107 g/s) Zapálený (vlevo) vs. nezapálený (vpravo) [53].

11.1.8 Vzdálenost nebezpečí tryskového požáru

Nástroj „Jet fire“ (Tryskový požár) používá bezrozměrnou korelaci délky vodíkového plamene [50] k výpočtu tří nebezpečných vzdáleností, tj. vzdálenosti „bez vzniku škod“ do $T=70\text{ °C}$, což je 3,5násobek délky plamene, „hranice bolesti“ (115 °C , 5 min), což je 3násobek délky plamene a „hranice úmrtí“ (309 °C , 20 s), což je 2násobek délky plamene. Univerzální korelace délky plamene zahrnuje laminární a turbulentní plameny, vztlakem a hybností řízené požáry, roztržité (podzvukové a zvukové) a nedostatečně roztržité (zvukové a nadzvukové) tryskové požáry, čímž pokrývá celé spektrum úniků s reakcí s vodíkem [50]. Teoretické a experimentální výsledky ukazují, že délka plamene musí být funkcí nejen Froudeho čísla (Fr), ale také Reynoldsova (Re) a Machova čísla (M), a v této korelaci jsou zohledněny všechny tyto faktory. Jednou z jeho výhod je absence parametrů na výstupu z fiktivní trysky, které jsou odvozeny v omezeném rozsahu platnosti předpokladu zvukového proudění na fiktivní trysce. Parametry potřebné k předpovědi délky plamene jsou pouze parametry na výstupu ze skutečné trysky: průměr, hustota a rychlost proudění vodíku, rychlost zvuku při tlaku a teplotě na výstupu ze skutečné trysky. Bezrozměrná korelace pro délku vodíkového proudového plamene v klidném vzduchu činí $L_F/D - (\rho_N/\rho_S)(U_N/C_N)^3$, jak je uvedeno na obrázku 36. Kde L_F je délka

plamene, D je průměr trysky, ρ_N a ρ_S jsou hustota plynu u trysky a hustota okolního vzduchu, U_N a C_N jsou rychlost u trysky a rychlost zvuku v uvolněném plynu u trysky.



Obrázek 36. Bezrozměrná korelace délky plamene [50]

Použití korelace vyžaduje použití teorie nedostatečně roztržitého proudu pro výpočet těchto parametrů. Nejistota při výpočtu parametrů proudění na výstupu ze skutečné trysky je menší než nejistota na fiktivní trysce. Za Machovým diskem totiž dochází k výrazné nerovnoměrnosti rychlosti, která se odchyluje od předpokladu rovnoměrné rychlosti na výstupu z fiktivní trysky, který je společný pro všechny teorie nedostatečně roztržitého proudu.

11.1.9 Zmírnění deflagrace

V e-Laboratoři vodíkové bezpečnosti jsou k dispozici tři nástroje pro zmírnění deflagrace: dimenzování ventilace prostoru s homogenní směsí vodíku a vzduchu [54], dimenzování ventilace prostoru s lokalizovanou nejednotnou směsí [55], výpočet horní hranice množství vodíku, které lze povolit v uzavřeném prostoru, jako je například sklad [55].

Korelace pro dimenzování ventilace homogenní směsí vodíku a vzduchu ve ventilovaném uzavřeném prostoru [54] je založena na novém pokroku v chápání a modelování spalovacích jevů relevantních pro deflagraci s ventilací vodíku a vzduchu a na jedinečných rozsáhlých testech provedených různými výzkumnými skupinami. Mezi jevy hoření, které korelace



zohledňuje, patří: turbulence generovaná samotným čelem plamene, mechanismus čelního bodu vyplývající z přednostní difuze vodíku ve vzduchu v roztažených plamenech, růst fraktální plochy turbulentního povrchu plamene, počáteční turbulence v hořlavé směsi, jakož i vlivy poměru stran uzavřeného prostoru a přítomnosti překážek. Nástroj umožňuje vypočítat plochu ventilačního otvoru pro snížení deflagračního tlaku na žádoucí úroveň a odhadnout přetlak uvnitř ventilovaného prostoru při použití dané plochy ventilačního otvoru.

Model pro lokální nestejnorodou směs [55] popisuje deflagrace směsí vodíku a vzduchu a definuje bezpečnostní požadavky na ventilované deflagrace lokalizovaných směsí v uzavřeném prostoru. Mezi příklady lokalizovaných směsí se řadí „kapsy“ plynu uvnitř uzavřeného prostoru a také rozvrstvená distribuce plynu, která je z hlediska úniku vodíku obzvláště důležitá. Nástroj umožňuje odhadnout maximální přetlak uvnitř ventilovaného prostoru a vypočítat plochu ventilace tak, aby nedošlo k překročení požadovaného bezpečnostního limitu.

Byl vyvinut termodynamický model pro předpověď maximální hmotnosti vodíku, která může být uvolněna v prostoru o určitém objemu, aniž by došlo k destruktivnímu deflagračnímu přetlaku [55]. Tento termodynamický model byl následně převeden do e-Laboratoře v podobě samostatného nástroje. Model předpokládá, že uzavřený prostor je částečně naplněn vzduchem a směsí vodíku se vzduchem. Pokud se tato směs vodíku se vzduchem spaluje v uzavřeném prostoru, lze nalézt modelové řešení pro výsledný absolutní tlak. Nástroj umožňuje vypočítat hmotnost zásob pro daný přetlak a objem uzavřeného prostoru, jakož i objem uzavřeného prostoru pro daný přetlak a hmotnost zásob.

11.1.10 Tlaková vlna a ohnivá koule po protržení nádrže při požáru

Nástroj „Blast wave“ (Tlaková vlna) pro rozpad přetlaku je k dispozici pro aplikace se samostatnou skladovací nádrží a s nádrží pod vozidlem. Model zohledňuje skutečné účinky plynu a spalování hořlavého plynu uvolněného do ovzduší (chemická energie) coby příspěvek k síle tlakové vlny [56]. Chemická energie spalování se dynamicky přičítá k mechanické energii a je zohledněna v energeticky odstupňované bezrozměrné vzdálenosti. Model lze použít jako bezpečnostní inženýrský nástroj pro typické aplikace skladování vodíku, včetně nádrží v dopravních prostředcích a samostatných nádrží na čerpacích stanicích. Prediktivní model pro výpočet nebezpečných vzdáleností definovaných parametry tlakové vlny vzniklé protržením vysokotlakého zásobníku plynu při požáru.

Nástroj „Fireball“ (Ohnivá koule) pro výpočet průměru „ohnivé koule“ po protržení vodíkové nádrže při požáru je založen na předpokladu úplného spálení vodíku uvolněného do vzduchu [56, 57]. Je založen na omezeném množství experimentálních dat, a proto vyžaduje další validaci.

11.2 Shrnutí e-Laboratoře

Tato část předkládá přehled vědeckých principů, na nichž jsou založeny technické nástroje e-Laboratoře vodíkové bezpečnosti, která je k dispozici na [adrese https://hyresponder.eu/e-](https://hyresponder.eu/e-)



platform/. Vyvinuté inženýrské nástroje jsou zaváděny tak, aby k nim veškeré zájmové skupiny měly bezplatný přístup. Modely zavedené v on-line nástrojích vycházejí z recenzovaných publikací a jsou validovány na základě experimentů.

Literatura a odkazy

1. HyResponse Deliverable D2.1 – popis vybraných systémů a infrastruktury FCH, příslušných bezpečnostních prvků a koncepcí (2014). K dispozici na adrese: <http://www.hyresponse.eu> [přístup k datu 10.10.2020].
2. Mays, T. (2014). Scientific progress and technological bottlenecks in hydrogen storage (Vědecký pokrok a technologické překážky v oblasti skladování vodíku). H2FC Evropská technická škola vodíkových a palivových článků. 23.–27. června 2014, Kréta, Řecko.
3. Rigas, F a Amyotte, P (2013). Vodíková bezpečnost. Boca Raton: CRC press. Taylor and Francis Group.
4. Rigas, F and Amyotte, P (2013). Myths and facts about hydrogen hazards (Mýty a fakta o nebezpečnosti vodíku). Chemical Engineering Transactions. Svazek 31.
5. ENVIRONMENTAL GRAFFITI ALPHA (2010). The Hindenburg Disaster in Pictures (Katastrofa vzducholodi Paul Hindenburg v obraze). K dispozici na adrese: <http://www.environmentalgraffiti.com/anthropology-and-history/news-hindenburgdisaster-accident-waiting-happen>. [přístup k datu 24.12.2011].
6. Světové fórum pro harmonizaci předpisů pro vozidla (WP.29), 160. zasedání, Ženeva, 25.–28. června 2013.
7. Ministerstvo energetiky USA (2008). Bezpečnostní školení na téma práce s vodíkem pro jednotky prvotního zásahu. K dispozici na adrese: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [přístup k datu 06.11.2020].
8. CEP, Partnerství pro čistou energii, 2014. K dispozici na adrese: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [přístup k datu 01.05.2014].
9. HyFLEETE-CUTE (2006–2009). K dispozici na adrese: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/history-fuel-cell-electric-buses/hyfleet-cute-2006-2009> [přístup 04.11.2020].
10. Zaetta, R a Madden, B (2011). Projekt Next HyLights. Výstup 3.1: Hydrogen Fuel Cell Bus Technology State of the Art Review (Přehled současného stavu technologie autobusů na vodíkové palivové články).
11. California Fuel Cells Partnership, 2014. K dispozici na adrese: <http://cafcp.org/> [přístup k datu 06.11.2020].
12. Adams, P (2004). Identification of the optimum on-board storage pressure for gaseous hydrogen city buses (Určení optimálního tlaku pro skladování plynného vodíku v autobusech městské hromadné dopravy). Evropský integrovaný projekt pro vodík – fáze 2 (EIHP2), březen 2004.



13. Şenel, K. (2007), Hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanımı. yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
14. <http://ram-home.com/ram-old/tu-155.html> [přístup k datu 06.11.2020]
15. Dincer, I., Acar, C. (2016). A review on potential use of hydrogen in aviation applications (Přehled možných způsobů využití vodíku v leteckém průmyslu). *International Journal of Sustainable Aviation*, 2: 74–100.
16. <http://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/> [přístup k datu 06.11.2020].
17. Bicer, Y., Dincer, I. (2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts (Posouzení životního cyklu vodíku a dalších potenciálních paliv pro letadla). *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 10722–10738
18. Koroneos, C. J., & Moussiopoulos, N. (2002). Cryoplane –hydrogen vs. kerosene as aircraft fuel (Kryoletoun – vodík vs. kerosin coby letecká paliva). *Sborník příspěvků XXVII. valného shromáždění Geofyzikální společnosti, Nice, Francie*, s. 21–26.
19. Contreras, A., Yiğit,., Özay, K. a Veziroğlu, T. N. (1997). Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels (Vodík jako letecké palivo: porovnání s uhlovodíkovými palivy). *Mezinárodní časopis o energii získávané z vodíku International Journal of Hydrogen Energy*, 22: 1053–1060
20. Lee DS, Pitari G, Grewe V, Gierens K, Penner JE, Petzold A, Prather MJ, Schumann U, Bais A, Bernsten T, Iachetti D, Lim LL, Sausen R. Transport impacts on atmosphere and climate: aviation (Dopad dopravy na atmosféru a klima: letecká doprava). *Atmos Environ* 2010;44(37):4678–734
21. Contreras A, Yiğit S, Özay K, Veziroğlu TN. Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels (Vodík jako letecké palivo: porovnání s uhlovodíkovými palivy). *Časopis Int. J. tritium Energy* 1997; 22(10– 11):1053– 60.
22. Khandelwal B, Karakurt A, Sekaran PR, Sethi V, Singh R. Hydrogen powered aircraft: the future of air transport (Letadla na vodíkový pohon: budoucnost letecké dopravy). *Prog Aersp Sci* 2013;60:45–59.
23. Verstraete D. Long range transport aircraft using hydrogen fuel (Dopravní letadla s dlouhým doletem využívající vodíkové palivo). *Int J Hydrog Energy* 2013;38(34):14824–31.
24. Verstraete D. The potential of liquid hydrogen for long range aircraft propulsion (Potenciál kapalného vodíku pro pohon letadel s dlouhým doletem); 2009
25. Sharpe JE, Bimbo N, Ting VP, Rechain B, Joubert E, Mays TJ. Modelling the potential of adsorbed hydrogen for use in aviation (Modelování potenciálu adsorbovaného vodíku k použití v letectví). *Microporous Mesoporous Mater* 2015; 209:135–40



26. Nojumi H, Dincer I, Naterer GF. Greenhouse gas emissions assessment of hydrogen and kerosene-fueled aircraft propulsion (Posouzení emisí skleníkových plynů z pohonu letadel na vodík a kerosin). *Int J Hydrog Energy* 2009; 34(3):1363–9
27. Cecere D, Giacomazzi E, Ingenito A. A review on hydrogen industrial aerospace applications (Přehled způsobů využití vodíku v leteckém průmyslu). *Int J Hydrog Energy* 2014; 39(20):10731–47
28. Verstraete D. On the energy efficiency of hydrogen-fuelled transport aircraft (O energetické účinnosti dopravních letadel na vodíkové palivo). *Int J Hydrog Energy* 2015;40(23):7388–94.
29. Fernandes MD, de ST, Andrade P, Bistrizki VN, Fonseca RM, Zacarias LG, Gonçalves HNC, de Castro AF, Domingues RZ, Matencio T. SOFC-APU systems for aircraft: a review (Systémy SOFC-APU pro letadla: přehled). *Int J Hydrog Energy* 2018; 43(33):16311–33
30. S Eelman, de Poza, Krieg T. Fuel cell APU'S in commercial aircraft – an assessment of SOFC and PEMFC concepts (APU palivových článků v dopravních letadlech – posouzení koncepcí SOFC a PEMFC). Uvedeno v: Sborník příspěvků 24. mezinárodního kongresu o letectví; 2004.
31. Staffell I, Scamman D, Velazquez Abad A, Balcombe P, Dodds PE, Ekins P, Shah N, Ward KR. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system (Úloha vodíku a palivových článků v globálním energetickém systému). *Energy Environ Sci* 2019.
32. DOE funds to deploy fuel cells for baggage vehicles at airports (Finanční prostředky DOE na zavedení palivových článků pro zavazadlová vozidla na letištích). *Fuel Cells Bull.* (Zpravodaj palivových článků), sv. č. 5; 2012. s. 3–4.
33. McConnell VP. Fuel cells in forklifts extend commercial reach (Palivové články ve vysokozdvizných vozících rozšiřují komerční dosah). *Fuel Cells Bull.* (Zpravodaj palivových článků) 2010; 2010(9):12–9. 33. 44. Fuel cell forklift from German partnership (Vysokozdvizný vozík na palivové články od německého partnerství). *Fuel Cells Bull.* (Zpravodaj palivových článků), sv. č. 12; 2003. s. 9.
34. Plug Power, FedEx project rolls out fuel cell airport tractors (Projekt Plug Power, společnost FedEx zavádí letištní tahače na palivové články). *Fuel Cells Bull.* (Zpravodaj palivových článků), sv. č. 5; 2015. s. 2–3.
35. Toyota, Hino deliver fuel cell bus for Haneda airport route in Tokyo (Společnosti Toyota a Hino dodávají autobusy s palivovými články na trasu k letišti Haneda v Tokiu). *Fuel Cells Bull.* (Zpravodaj palivových článků), sv. č. 1; 2011, s. 3.



36. US Hybrid, BYD to develop fuel cell bus for Honolulu Airport (Společnosti US Hybrid a BYD vyvíjejí autobus s palivovými články pro letiště Honolulu). Fuel Cells Bull. (Zpravodaj palivových článků), sv. č. 6; 2018. s. 2.
37. Belmonte N, Staulo S, Fiorot S, Luetto C, Rizzi P, Baricco M. Fuel cell powered octocopter for inspection of mobile cranes: design, cost analysis and environmental impacts (Oktokoptéra poháněná palivovými články pro inspekci mobilních jeřábů: konstrukce, analýza nákladů a dopady na životní prostředí). App Energy (Aplikovaná energie) 2018; 215:556–65.
38. Fuel cell and hybrid power systems offer compelling value for UAVs whose missions demand greater runtime than batteries can support (Systémy palivových článků a hybridní energetické systémy nabízejí přesvědčivou hodnotu pro bezpilotní letadla, jejichž mise vyžadují delší dobu provozu, než jakou mohou zajistit baterie). [Online]. K dispozici na adrese: (<http://www.ballard.com/markets/uav>). [Přístup 20. října 2018].
39. AeroVironment flies world's first hydrogen powered plane (Společnost AeroVironment letí s prvním letadlem na vodíkový pohon na světě). Fuel Cells Bull. (Zpravodaj palivových článků), sv. č. 9; 2005. s. 2–3.
40. Bradley TH, Moffitt BA, Mavris DN, Parekh DE. Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft (Vývoj a experimentální charakterizace letadla s pohonem na palivové články). J Power Sources 2007;171(2):793–801.
41. Gong A, Verstraete D. Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: current status and research needs (Pohon na palivové články v malých bezpilotních letounech s pevnými křídly: současný stav a požadavky výzkumu). Int J Hydrog Energy 2017;42(33):21311–33.
42. Kim T, Kwon S. Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft (Konstrukce a vývoj malého bezpilotního letounu poháněného palivovými články). Int J Hydrog Energy 2012; 37(1):615–22
43. Bird, L. (2011). Dictionary of Business Continuity Management Terms (Slovník pojmů z oblasti řízení kontinuity podnikání). Business Continuity Institute. K dispozici na adrese: <http://www.thebci.org/glossary.pdf> [přístup k datu 27.12.2015].
44. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering (Základy bezpečnostního vodíkového inženýrství), části I a II. K dispozici na adrese: www.bookboon.com, e-kniha k bezplatnému stažení.
45. CEP, Partnerství pro čistou energii, 2014. K dispozici na adrese: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [přístup k datu 01.05.2014].
46. Saffers, J-B a Molkov, V (2014). Hydrogen safety engineering framework and elementary design safety tools (Rámec vodíkového bezpečnostního inženýrství a základní nástroje pro



- bezpečnou konstrukci). Mezinárodní časopis o energii získávané z vodíku *International Journal of Hydrogen Energy*, 39 (11), s. 6268–6285.
47. BRHS, Biennial Report on Hydrogen Safety (Dvouletá zpráva o bezpečnosti vodíku) (2009). Evropská síť excelence „Bezpečnost vodíku jako nosiče energie“ (NoE HySafe). K dispozici na adrese: www.hysafe.org [přístup k datu 06.11.2020].
 48. BSI (2001) Britská norma BS7974:2001 „Application of fire safety engineering to the design of buildings - Code of Practice (Aplikace požárně bezpečnostního inženýrství při konstrukci budov – Kodex zásad)“. Dokument PD 7974-0:2002 (2002) Application of fire safety engineering principles to the design of buildings - Part 0: Guide to design framework and fire safety engineering procedures (Aplikace požárně bezpečnostního inženýrství při konstrukci budov – Část 0: Průvodce konstrukčním rámcem a postupy požárně bezpečnostního inženýrství), British Standard Institution.
 49. V. Molkov a M. Bragin, High-Pressure Hydrogen Leak Through a Narrow Channel, Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere (Vysokotlaký únik vodíku úzkým kanálem, nerovnovážné jevy: plasma, spalování, atmosféra), (2009), 332–338.
 50. V. Molkov a J.-B. Saffers, Hydrogen Jet Flames (Ostré vodíkové plameny), mezinárodní časopis o vodíkové energii *International Journal of Hydrogen Energy*, sv. 38, č. 19, (2013) 8141–8158.
 51. V. Molkov, V. Shentsov, and J. Quintiere, Passive Ventilation of a Sustained Gaseous Release in an Enclosure With One Vent (Pasivní ventilace trvalého úniku plynu v uzavřeném prostředí s jedním ventilačním otvorem), mezinárodní časopis o vodíkové energii *International Journal of Hydrogen Energy*, sv. 39, č. 15, (2014) 8158–8168.
 52. S. Brennan a V. Molkov, Safety Assessment of Unignited Hydrogen Discharge From Onboard Storage in Garages With Low Levels of Natural Ventilation (Posuzování bezpečnosti vypouštění nezapáleného vodíku z palubních nádrží v garážích s nízkou úrovní přirozené ventilace), mezinárodní časopis o vodíkové energii *International Journal of Hydrogen Energy*, sv. 38, (2013) 8159–8166.
 53. D. Makarov, V. Shentsov, M. Kuznetsov a V. Molkov, Pressure Peaking Phenomenon: Model Validation Against Unignited Release and Jet Fire Experiments (Jev tlakové špičky: validace modelu na základě experimentů s uvolněním nezapáleného vodíku a tryskového požáru), mezinárodní časopis o vodíkové energii *International Journal of Hydrogen Energy*, sv. 43, č. 19, (2018) 9454–9469.
 54. V. Molkov a M. Bragin, Hydrogen–Air Deflagrations: Vent Sizing Correlation For Low-Strength Equipment and Buildings (Deflagrace vodíku a vzduchu: korelace dimenzování ventilace pro zařízení a budovy s nízkou pevností), mezinárodní časopis o vodíkové energii *International Journal of Hydrogen Energy*, sv. 40, č. 2, (2015) 1256–1266.
 55. D. Makarov, P. Hooker, M. Kuznetsov a V. Molkov, Deflagrations of Localised Homogeneous and Inhomogeneous Hydrogen-Air Mixtures in Enclosures (Deflagrace lokalizovaných homogenních a nehomogenních směsí vodíku se vzduchem v uzavřených



- prostorách), mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy, sv. 43, (2018) 9848–9869.
56. V. Molkov a S. Kashkarov, Blast Wave From a High-Pressure Gas Tank Rupture in a Fire: Stand-Alone and Under-Vehicle Hydrogen Tanks (Tlaková vlna z protržení vysokotlaké plynové nádrže při požáru: samostatné a podvozkové vodíkové nádrže), mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy, sv. 40, č. 36, (2015) 12581–12603.
57. M. Dadashzadeh, S. Kashkarov, D. Makarov a V. Molkov, „Socioekonomická analýza a kvantitativní posouzení rizik bezpečnostních konstrukcí u palubních skladovacích systémů, Mezinárodní konference o vodíkové bezpečnosti, Hamburk, Německo, (2017) svazek 184.
58. Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives (Skladování vodíku: nedávná zlepšení a průmyslové perspektivy). Int J Hydrogen Energy (2017) 42:7254–7262.
59. Norský parlament přijal nařízení o nulových emisích ve fjordech, které jsou na seznamu světového dědictví UNESCO. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/norway-adopts-zero-emission-regulations-in-world-heritage-fjords-24820> [přístup k datu 04.11.2020]
60. Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Vyšetřování nehody s únikem vodíku v zařízení AC Transit Emeryville (revidováno). Zpráva laboratoře Sandia. SAND2012-8642