



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 3

Skladování vodíku

ÚROVEŇ III

Velitel zásahu

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň **Velitel zásahu**.

Toto téma je k dispozici také na úrovních I, II a IV

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 se zabývá různými možnostmi skladování vodíku – stlačený, zkapalněný a v pevných materiálech, jakož i nebezpečím a bezpečnostními otázkami s nimi spojenými. Velká pozornost byla věnována nejběžnějšímu způsobu skladování vodíku ve vysokotlakých zásobnících. Byly zváženy různé typy zásobníků vodíku a jejich hlavní součásti.

Projekt HyResponse je všeobecně uznáván, protože zde prezentované materiály staví na původní sérii přednášek HyResponse.

Klíčová slova

Skladování vodíku, stlačený vodík, skladovací nádoba, zkapalněný vodík, materiály pro skladování vodíku

Obsah

| | |
|--|----|
| Souhrn..... | 3 |
| Klíčová slova..... | 3 |
| 1. Cílové publikum..... | 5 |
| 1.1 Popis úlohy: Velitel zásahu..... | 5 |
| 1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel zásahu..... | 5 |
| 1.3 Předchozí učení: Velitel zásahu..... | 5 |
| 2. Úvod a cíle..... | 5 |
| 3. Možnosti skladování vodíku..... | 6 |
| 4. Skladování plynného vodíku..... | 8 |
| 4.1 Typy skladovacích nádob cGH ₂ | 9 |
| 4.2 Skladování vodíku na palubě dopravních prostředků..... | 12 |
| 4.3 Zařízení pro uvolnění přetlaku..... | 15 |
| 5. Důsledky katastrofického selhání vysokotlakého zásobníku vodíku (tlakové vlny, ohnivé koule, projektily)..... | 18 |
| 5.1 Stupeň požární odolnosti vodíkových nádrží..... | 19 |
| 5.2 Potenciální nebezpečí a bezpečnostní otázky spojené s cGH ₂ : shrnutí..... | 19 |
| 6. Bezpečnostní technologie..... | 20 |
| 7. Nové technologie skladování..... | 20 |
| 7.1 Náklady na skladování..... | 21 |
| 7.2 Objem úložiště, objem dle plochy a modularita..... | 21 |
| 7.3 Nový trend z roku 2020..... | 22 |
| 8. Využití e-Laboratoře..... | 24 |
| Literatura a odkazy..... | 24 |

1. Cílové publikum

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň Velitel zásahu. Přednášky jsou k dispozici také na úrovních I, II a IV: Hasič, Velitel posádky a Důstojník specialista.

Níže je uveden popis úlohy, úrovně odborné způsobilosti a očekávané znalosti na úrovni velitele zásahu.

1.1 Popis úlohy: Velitel zásahu

Velitelé zásahu odpovídají za strategické řízení taktiky a operací. Musí účinně a bezpečně organizovat zdroje, aby dosáhly nejvhodnějšího řešení zásahu. Velitel zásahu pracuje v jasném rámci velení, který mu pomáhá strukturovat, organizovat a řídit jakoukoli mimořádnou událost. Strategie a rámec musí být přizpůsobitelné co do rozsahu a funkcí, aby bylo možné čelit různým a novým typům mimořádných událostí a umožnit bezpečné a účinné nasazení a využití všech dostupných zdrojů.

1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel zásahu

Technické znalosti nacvičené s ohledem na rozvoj velitelských dovedností a jednání, které jsou základem pro správný úsudek, rozhodování a řízení dostupných zdrojů a pro interakci s ostatními organizacemi a agenturami. Vyžaduje se schopnost získávat, vstřebávat a používat informace někdy za složitých okolností a současně pracovat za podmínek extrémního stresu.

1.3 Předchozí učení: Velitel zásahu

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 a cíle

Vodík se obvykle ukládá a přepravuje dvěma způsoby: v podobě stlačeného vodíkového plynu, nebo v podobě kryogenní kapaliny. Vodík se nejčastěji skladuje v kovových nebo kompozitních lahvích/nádržích různých velikostí a objemů. Někdy je lze spojit do svazku nebo umístit do přepravního koše. Vzhledem k malé velikosti molekul je vodík na rozdíl od jiných běžných plynů při stejném tlaku náchylný k unikání přes některé materiály, trhliny nebo špatně provedené spoje skladovacích nádrží. Ačkoli vodík obecně nekoroduje a nereaguje s materiály používanými na skladovací nádoby, za určitých teplotních a tlakových podmínek může difundovat do kovové mřížky a způsobit jev známý jako „vodíková křehkost“. V případě požáru může navíc dojít k degradaci kompozitních materiálů použitých na skladovací nádoby a k narušení její izolace. V nejhorším případě může dojít ke katastrofickému protržení nádoby, což vyvolá tlakovou vlnu následovanou ohnivou koulí a odletujícími projektily/střepinami. Z tohoto důvodu musí být zařízení pro skladování vodíku zkonstruováno a udržováno na základě přísných bezpečnostních norem, aby byla zajištěna neporušenost skladovací nádoby.

Tato přednáška obsahuje přehled možností skladování vodíku a zabývá se také hlavními bezpečnostními a technickými otázkami, které jsou s nimi spojeny. Pojednává též o tématech interakce vodíku s různými typy materiálů a permeace vodíku, která jsou mimořádně důležitá pro technologie jeho skladování. Je třeba zmínit, že téma skladování vodíku je rozsáhlé, a proto je tato přednáška zaměřena především na systémy skladování tlakového, zkapalněného a pevného vodíku, přičemž pozornost je věnována především vysokotlaké technologii skladování, protože je nejrozšířenější. Jevy, jako jsou nezapálené úniky, požáry a výbuchy, budou probírány v dalších přednáškách.

3. Možnosti skladování vodíku

Skladování vodíku je základní technologií pro celou škálu aplikací palivových článků a vodíku (FCH), od vozidel až po stacionární a přenosnou energetiku [1]. Univerzální řešení pro skladování vodíku neexistuje. Místo toho je třeba pečlivě vybrat vhodné řešení, které bude vyhovovat požadavkům konkrétního systému. Například u FC osobních vozidel jsou důležitými faktory prostor a hmotnost, zatímco u FC vysokozdvížných vozíků a v námořních aplikacích může být vyšší hmotnost žádoucí vlastností. Ve vesmírných aplikacích využívá NASA kapalný vodík již řadu let [2].

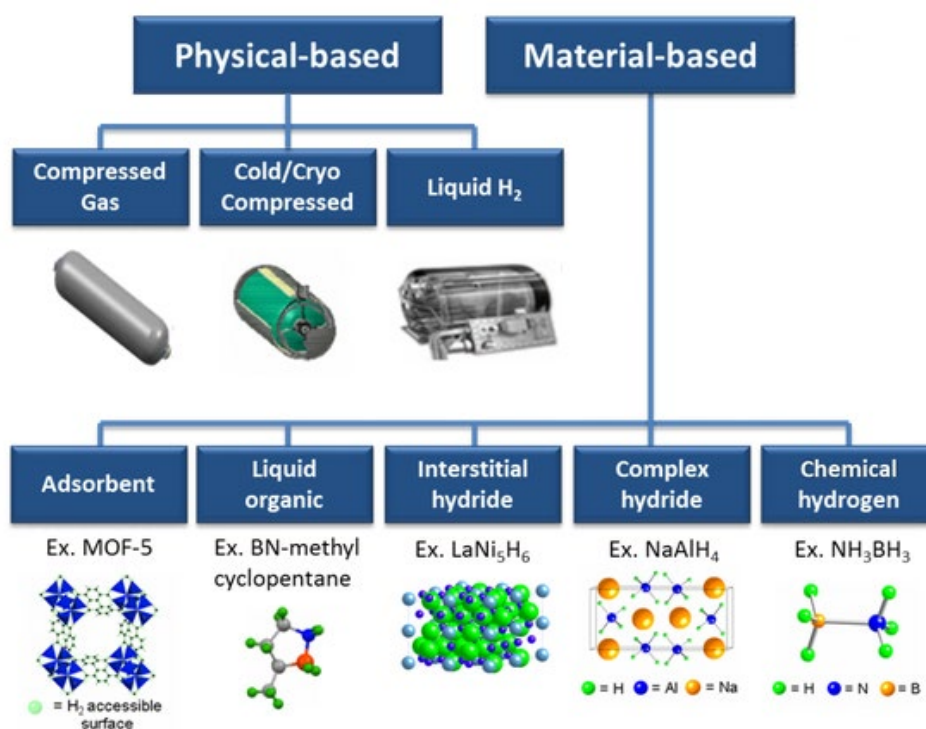
Vodík je nejlehčí plyn s nízkou normální hustotou 0,09 g/l (při teplotě 288 K a tlaku 1 bar). Jak vyplývá z [tabulky 1](#), má velmi vysokou energetickou hodnotu na jednotku hmotnosti (přibližně třikrát vyšší než benzín). Vzhledem k nízké hustotě má však vodík velmi nízkou energetickou hodnotu na jednotku objemu (asi čtyřikrát nižší než benzín). Skladování vodíku, zejména v rámci omezení velikosti a hmotnosti vozidla, proto představuje náročnou problematiku [3]. Probíhá výzkum zaměřený na vývoj bezpečné, spolehlivé, kompaktní, lehké a nákladově efektivní technologie skladování vodíku.

Volumetrická a gravimetrická kapacita (hustota) jsou dva pojmy, které se často používají při popisu přístupu ke skladování plynů. V případě vodíku se výzkumy zaměřují na zvýšení obou kapacit, tj. je žádoucí zvýšit volumetrickou i gravimetrickou kapacitu¹. Jak ukazuje [tabulka 1](#), v 1 kg vodíku je více energie než v 1 kg benzínu. Je však také zřejmé, že stejná hmotnost vodíku zaujímá větší objem. Vodík není za běžných teplot kapalný, a proto je pro jeho uskladnění v množství postačujícím pro určitý dojezd vozidla (nad 500 km) nutné buď jeho stlačení na velmi vysoký tlak (například na 700 bar pro automobilové aplikace), nebo jeho výrazné ochlazení do kapalného stavu. Tyto extrémní tlaky a teploty představují bezpečnostní rizika pro použité materiály a pro případ ztráty ochranné obálky.

¹ Gravimetrická kapacita určuje hmotnost skladovací nádrže potřebné k uskladnění daného množství H₂

Tabulka 1. Hmotnostní a objemová energetická hodnota vodíku a dalších obvyklých paliv [4]

| | Vodík | Zemní plyn | Benzín |
|---|-----------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| Energetická hodnota na jednotku hmotnosti | 2,8krát více než benzín | ~1,2krát více než benzín | 43 MJ/kg |
| Energetická hodnota na jednotku objemu | 4krát méně než benzín | 1,5krát méně než benzín | 120 MJ/galon |



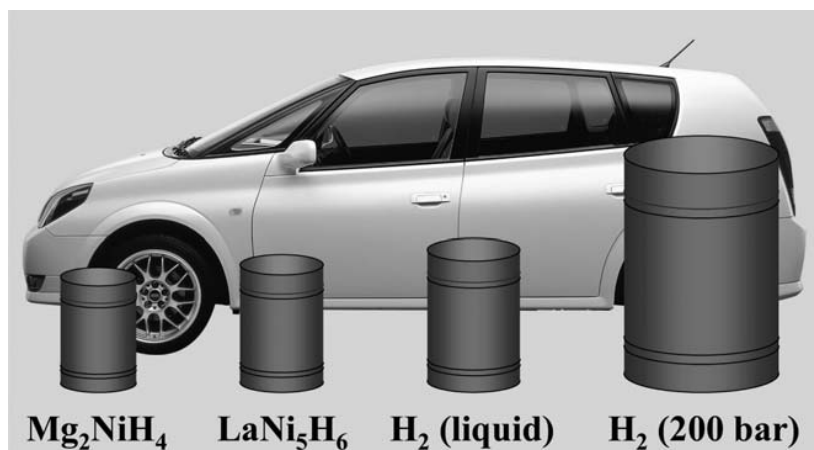
Zdroj: Ministerstvo energetiky USA (DoE): <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

Obrázek 1. Přehled technologií skladování vodíku

Vodík lze skladovat *fyzicky* jako stlačený plyn, (cGH₂) nebo jako kryogenní kapalinu (LH₂). Systémy skladování plynného vodíku obvykle vyžadují nádoby na stlačený plyn, tj. nádrže (odolávající tlaku až 700 bar). Skladování vodíku v kapalném stavu vyžaduje extrémně nízké teploty, protože jeho bod varu při tlaku 1 atm činí $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. LH₂ se běžně používá pro velkoobjemové skladování a přepravu vodíku (viz přednáška „Úvod do aplikací FCH a vodíkové bezpečnosti“). Vodík se může ukládat také v *materiálech*: na povrchu pevných látek

(adsorpcí), nebo uvnitř pevných látek (absorpcí) [1]. Přehled možností skladování vodíku je uveden na obrázku 1.

Obrázek 2 z odkazů [5, 6] znázorňuje objemové hustoty dosažené nebo očekávané při různých možnostech skladování v dopravních prostředcích. Americké ministerstvo energetiky stanovilo ve svém výzkumném programu [7] cílové hodnoty pro každý z parametrů, takže výzkum může být přerušeno, pokud se ukáže, že některého z cílů nelze dosáhnout.



Zdroj: Risø Energy Report 3, 2004.

Obrázek 2. Objem 4 kg vodíku uloženého různými způsoby v poměru k velikosti dopravního prostředku.

4. Skladování plynného vodíku

V současné době se vodík nejčastěji skladuje jako stlačený plyn v kovových a kompozitních tlakových lahvích pod různým tlakem. Jak jsme uvedli v předchozích přednáškách, mnoho FC aplikací využívá vodík při vyšším tlaku. Kromě toho proces stlačování vodíku zvyšuje jeho objemovou hustotu. Vodík pro průmyslové nebo laboratorní použití se obvykle stlačuje na tlak 15–20 MPa (150–200 bar). V dopravních prostředcích s vodíkovým pohonem se vodík pod tlakem 35–70 MPa skladuje v palubních nádržích. Na vodíkových čerpacích stanicích je plynný vodík postupně stlačován (až na 100 MPa) a skladován v zásobnících. Jako příklad lze uvést tři různé úrovně tlaku na čerpací stanici se skladováním plynů: skladování pod nízkým tlakem (v „doutníkových“ nádržích, $p = 4,5$ MPa), skladování pod středním tlakem (ve svazku lahví, $p = 20$ – 50 MPa) a skladování pod vysokým tlakem (v kompozitních lahvích, $p = 70$ – 100 MPa). Hlavní obavy týkající se cGH_2 jsou následující:

- velké množství energie potřebné ke kompresi,
- namáhání materiálů zásobníků způsobené opakovaným střídáním nízkých a vysokých tlaků,
- bezpečnostní problémy související s používáním tak vysokých tlaků v nádobách,
- vysoké hmotnosti a dodatečné náklady na konstrukci takových nádob.

Je třeba zvážit i další otázky, jako jsou propouštění vodíku a křehkost. Nádoby používané pro skladování cGH_2 proto musí být vyrobeny z odolných materiálů a musí odolat vysokým tlakům, aniž by došlo ke ztrátě jejich jímací schopnosti. Konstrukce a výroba, přeprava a používání nádob vhodných pro skladování vodíku pod tlakem jsou regulovány vládními orgány. Konstrukce zásobníků vodíku (a také materiály, ze kterých jsou vyrobeny) by měla splňovat požadavky norem RCS vypracovaných organizacemi ISO, CGA, ASME a dalšími (podrobnější informace o příslušných normách RCS jsou k dispozici v přednášce „Zákony, předpisy a normy pro členy zásahových jednotek“).

Následující definice je velmi užitečná:

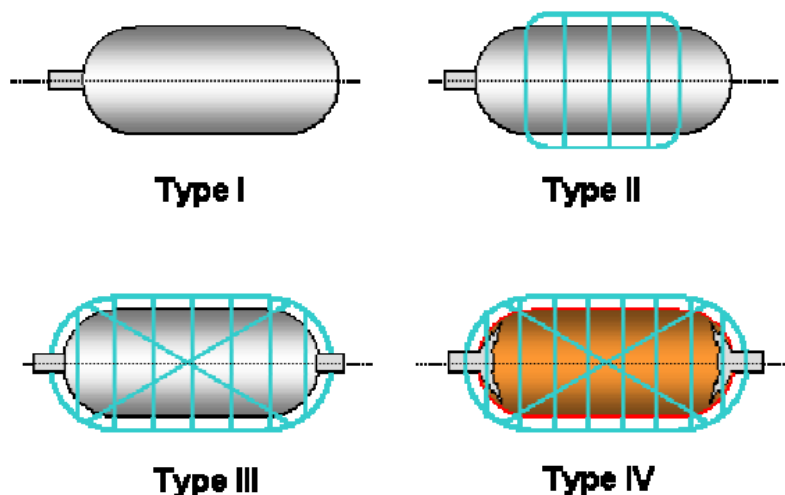
Jmenovitý pracovní tlak (NWP) je manometrický tlak, který je charakteristický pro obvyklý provoz systému. U nádrží s cGH_2 se NWP rozumí ustálený tlak stlačeného plynu ve zcela naplněné nádobě při jednotné teplotě 15 °C [8]. Vodík se v dopravních prostředcích s vodíkovým pohonem skladuje zpravidla při NWP 35 MPa nebo 70 MPa, přičemž maximální plnicí tlak činí 125 % NWP (43,8 MPa, resp. 87,5 MPa). Vodík se nejčastěji dává pod tlakem až 125 % NWP. Za běžného procesu (opětovného) doplňování paliva může tlak uvnitř zásobníku stoupnout až o 25 % nad hodnotu NWP, protože adiabatická komprese plynu způsobuje ohřev uvnitř zásobníků. Jakmile se nádoba po naplnění ochladí, tlak klesne. Podle výše uvedené definice se ustálený tlak systému rovná NWP, když je v zásobníku teplota 15 °C.

4.1 Typy skladovacích nádob cGH_2

Vzhledem k řadě jedinečných vlastností vodíku (viz přednášku „Vlastnosti vodíku z hlediska bezpečnosti“) by měl být vodík kompatibilní s materiály, z nichž jsou vyrobeny stěny skladovacích zásobníků. Pro přepravu a skladování vodíku byly vyvinuty a používají se čtyři typy nádob:

- Typ I: bezešvá kovová nádoba.
- Typ II: bezešvá kovová nádoba s obručovitě ovinutým obalem z vláknitopryskyřičného kompozitu.
- Typ III: kovová vložka plně obalená vláknitopryskyřičným kompozitem.
- Typ IV: polymerní vložka plně obalená vláknitopryskyřičným kompozitem.

V roce 2014 byl vyroben první prototyp zásobníku typu V. Jedná se o celokompozitovou nádobu bez vložky [9]. Schematické znázornění typů nádob používaných na cGH_2 je uvedeno na [obrázku 3](#).



Zdroj: Barthelemy, 2009 [10].

Obrázek 3. Typy vodíkových zásobníků používaných ke skladování stlačeného plynného vodíku

Tlak, při kterém bude vodík skladován, ovlivňuje především tloušťku stěn zásobníku, velikost/hmotnost zásobníků, výběr materiálů a náklady. Ke konstrukci a výrobě vodíkových zásobníků se obvykle používají tři typy materiálů: kovy (hliník nebo ocel), polymery (vysokohustotní polyethylen nebo polyamid) a uhlíková vlákna impregnovaná termosetovými nebo termoplastickými pryskyřicemi. Kovy by neměly propouštět vodík ani podléhat vodíkové křehkosti, zejména pokud mají během své životnosti procházet mnoha tlakovými/teplotními cykly. Vodíkové nádrže jsou navrženy na minimální tlak při protržení, přičemž minimální tloušťka stěny je dána pevností kovu v tahu [9] nebo pouze pevností kompozitu v případě nádrží typu IV, kde vložka není nosná. Přestože se konstrukce vodíkových nádrží v posledních letech zkvalitnila, zejména díky použití lehkých materiálů, jako jsou polymery a hliník, problémy s velkým objemem a velkou hmotností stále přetrvávají. Například hmotnost vodíku uloženého v kovové láhvi představuje pouze asi 1 % její celkové hmotnosti [11].

Nádoby typu I jsou bezešvé nádoby vyrobené z oceli nebo hliníku. Jsou velmi těžké a mají silné stěny. Nádrže typu I jsou určeny pro tlak nejvýše 25 MPa. Nádrže typu I se používají ve vozidlech na stlačený zemní plyn (CNG) a lze je považovat za relativně levnou možnost skladování pro některé stacionární aplikace. Nádrže typu II jsou bezešvé kovové nádoby s obroučovitě ovinutým obalem z vláknitopryskyřičného materiálu. Jsou také velmi těžké a vydrží tlak až 45–80 MPa. Tyto nádrže lze použít jako vysokotlaké zásobníky na vodíkových čerpacích stanicích. Jejich cena je konkurenceschopná díky relativně nízkému počtu použitých vláken (obrázek 3). Nádrže I a typu II nejsou vhodné k použití v automobilovém průmyslu z důvodu velké hmotnosti a rozměrů.

Nádrže typu III a IV jsou obvykle lehčí a mají tenčí stěny než nádrže typu I a II. Nádrže typu III s NWP 35 MPa mají bezešvé nebo svařované hliníkové vložky, plně obalené kompozitem

z vláknité pryskyřice. Použité materiály jsou méně ovlivněny vodíkovou křehkostí. Nádrže typu IV s NWP 70 MPa jsou vyrobeny z nekovových (tj. plastových) vložek, na které navazuje vnější nosná vrstva z kompozitních vláken a pryskyřice. K dispozici je také kovové šroubení k instalaci uzavíracích ventilů a tepelně aktivovaného zařízení pro uvolnění přetlaku (TPRD). Vláknem obepínající polymerní vložka zajišťuje potřebnou pevnost pro zadržení vodíku pod tlakem, zatímco vložka působí především jako bariéra proti jeho pronikání [11]. Minimální poměry tlaku při protržení u kompozitních obalů s různými vlákny, tj. minimální skutečný tlak při roztržení nádrže dělený jejím nominálním pracovním tlakem (NWP), by neměly být menší než hodnoty uvedené v tabulce 2.

Tabulka 2 Minimální tlakové poměry při protržení různých typů vodíkových nádob

| Construction | | Container type | | | |
|--------------|--------|----------------|--------|--------|--------|
| | | Type 1 | Type 2 | Type 3 | Type 4 |
| All metal | | 2,25 | | | |
| Over-wrap | Glass | | 2,4 | 3,4 | 3,5 |
| | Aramid | | 2,25 | 2,9 | 3,0 |
| | Carbon | | 2,25 | 2,25 | 2,25 |
| | Hybrid | | | (1) | |

Explanatory note:

(1) For container designs using hybrid reinforcement, i.e. two or more different structural fibre types, consideration shall be given to the load share between the different fibres based on the different elastic moduli of the fibres. The calculated stress ratios for each individual structural fibre type shall conform to the specified values. Verification of the stress ratios may also be performed using strain gauges. The minimum burst pressure ratio shall be chosen such that the calculated stress in the structural fibres at the minimum burst pressure ratio times nominal working pressure divided by the calculated stress in the structural fibre at nominal working pressure meets the stress ratio requirements for the fibres used.

V průběhu revize GTR č. 13 fáze 2 [32] bylo rozhodnuto snížit minimální tlak při protržení z 225 % na 200 % jmenovitého pracovního tlaku (NWP). Za zmínku stojí, že autor proti tomuto snížení argumentoval ve výboru [33]. Minimální tlak při protržení na úrovni 2násobku NWP odpovídá pouze 160 % maximálního provozního tlaku očekávaného za provozu.

Tyto lahve jsou sice lehčí než lahve s celokovovou vložkou, ale jsou dražší. Nevýhodou nádrží typu IV je možnost prostupu vodíku přes polymerní vložku. V současné době se tyto typy nádrží přednostně používají v automobilovém průmyslu (vysokozdvížné vozíky, osobní vozidla, autobusy atd.).

Mezi příklady skladovacích nádob, které se používají ve stacionárních aplikacích, patří: svazek nebo koš s lahvemi, pevné trubkové svazky nebo trubkový návěs používaný k rozvozu vodíku do čerpacích stanic (obrázek 4).



Zdroj: Fotobanka společnosti AirLiquide

Obrázek 4. Příklady zásobníků vodíku obvyklých ve stacionárních aplikacích:

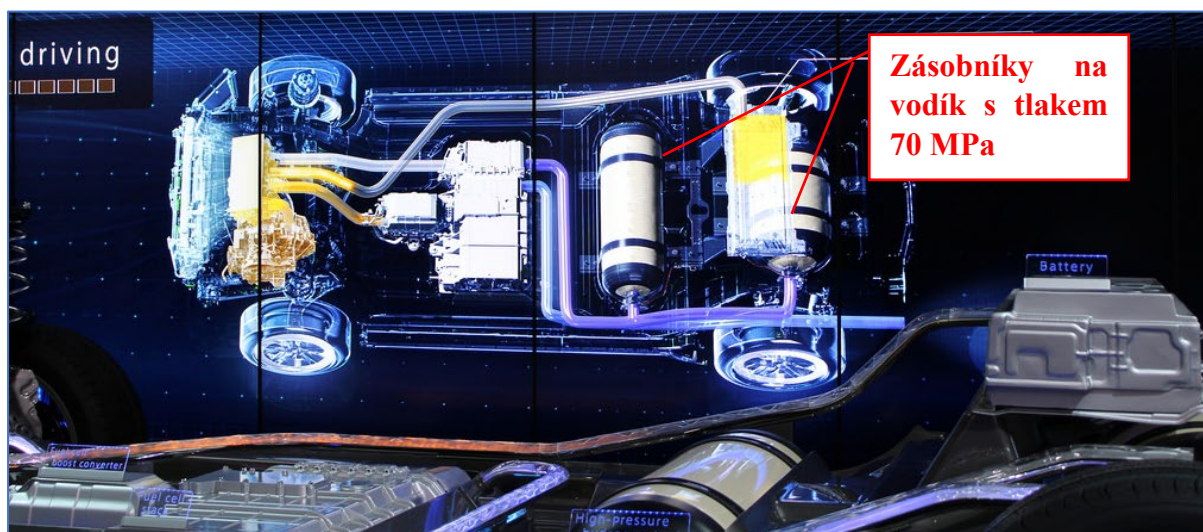
(a) pevný svazek lahví, (b) koš lahví.

4.2 Skladování vodíku na palubě dopravních prostředků

Jak již bylo zmíněno, nejvhodnějšími nádobami pro skladování vodíku ve vozidlech jsou nádoby typu III a IV. Tyto technologie se běžně používají i pro skladování jiných plynů (např. zemního plynu nebo vzduchu), ale hlavním rozdílem v případě vodíku je potřeba mnohem vyššího tlaku: 35–70 MPa v porovnání 20 MPa v případě zemního plynu. Systémy pro skladování vodíku instalované v dopravních prostředcích by měly plnit následující funkce:

- příjem vodíku při (opětovném) čerpání paliva,
- zadržení vodíku do doby, než bude potřeba,
- uvolňování vodíku do systému FC k pohonu vozidla.

V současné době používají FC vozidla nádrže, které uchovávají cGH_2 . Palubní skladování LH_2 není v současné době ve vozidlech komerčně příliš rozšířené [4]. Zavádění LH_2 do automobilových aplikací se vyvíjí jako špičková technologie. Palubní vodíkový systém obvykle obsahuje: jednu nebo několik zásobních nádrží cGH_2 , tankovací nádobu a vodíkové palivové potrubí. Nádrže bývají zpravidla umístěny v zadní části vozidla. Každá nádrž je vybavena vlastním zařízením TPRD. V případě požáru se ze zařízení TPRD uvolňuje vodík buď jednotlivě, nebo mohou být zařízení TPRD směřována do jediného ventilačního místa. Směr uvolňování vodíku ze zařízení TPRD je svisle dolů nebo pod mírným úhlem, pokud je automobil v normální poloze se čtyřmi koly na zemi [4, 8]. Vodíkové palivové potrubí obsahuje vodík s mnohem nižším tlakem (od okolního tlaku do přibližně 0,7 MPa) než v nádržích. Vedení jsou vyrobena z nerezové oceli, která je s vodíkem kompatibilní. Příklad vozidla FC Toyota Mirai a jeho zásobníků na vodík (70 MPa) je na obrázku 5. Další podrobnosti o tomto voze najdete na adrese: <http://www.toyota.com/mirai/fcv.html>



(a)



(b)

Zdroj: Obrázky Google, zdarma.

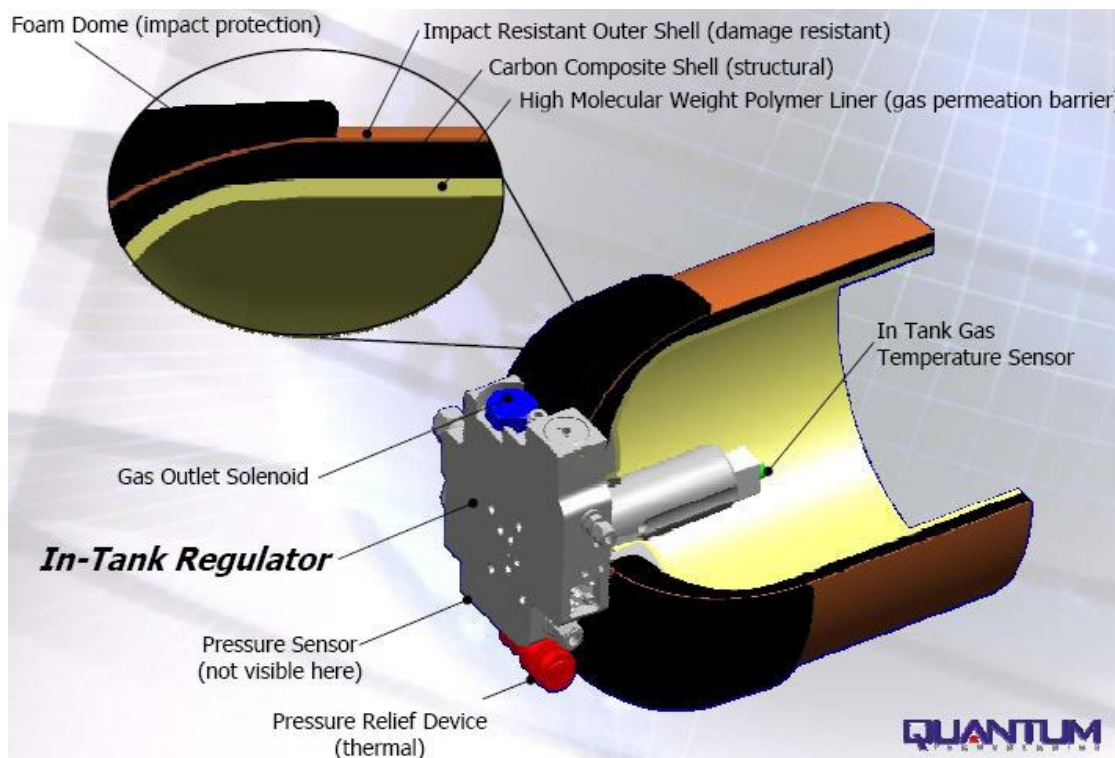
Obrázek 5. (a) Hlavní součásti vozidla Toyota Mirai FC a (b) jeho zásobník vodíku.

Dnešní lehká osobní vozidla s palivovými články (FCV) zpravidla skladují až 6 kg vodíku, který je potřebný k zajištění dojezdu v rozmezí 400–500 km [4]. Podobně jako u autobusů na CNG je i u autobusů na vodík tento uložen na střeše v několika nádržích. Palivový článek je obvykle umístěn v zadním motorovém prostoru autobusu. Na palubě autobusu s vodíkovým pohonem může být uloženo až 50 kg vodíku. Zásobníky na vodík vyrábějí nejen výrobci automobilů jako Toyota nebo Honda, ale také společnosti jako Lincoln Composites, Plastic Omnium, Dynatek Industries, Quantum Technologies a další.

Průřez nádrží typu IV vyráběných společností Quantum Technologies je znázorněn na obrázku 6. Nádrž je vybavena:

- nárazuvzdornou pěnovou kopulí, která je lehká, pohlcuje energii a je cenově konkurenceschopná;
- nárazuvzdorným vnějším pláštěm, který je neprůstřelný a poskytuje nádrži odolnost proti proříznutí/oděru,

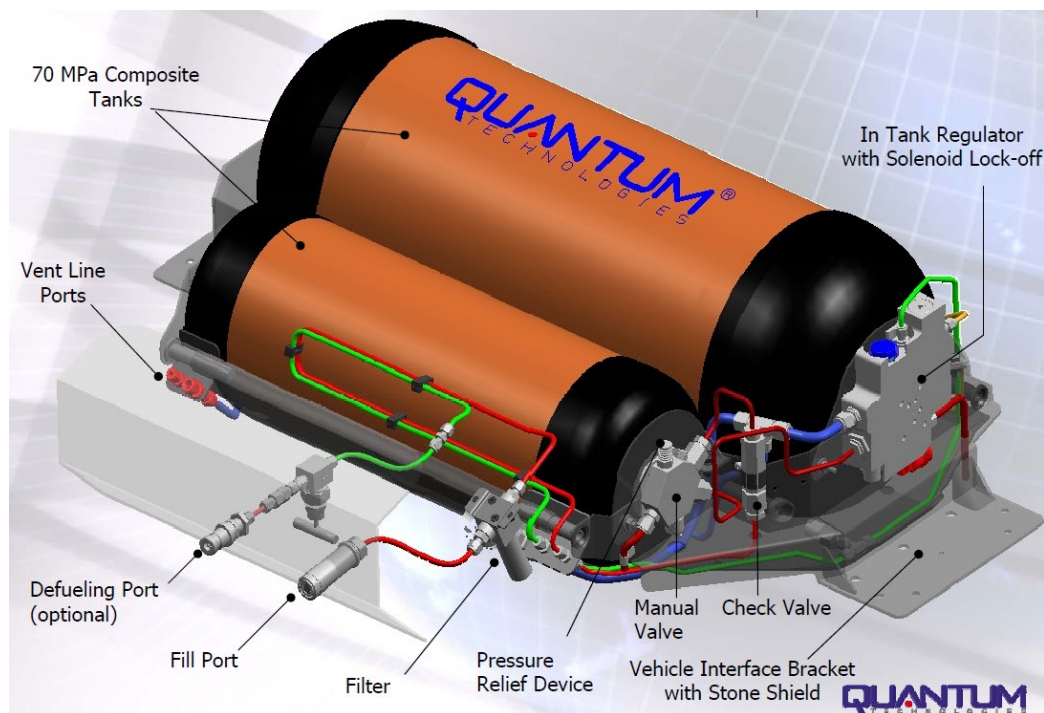
- skořepinou z plastu vyztuženého uhlíkovými vlákny (CFRP), která je lehká, odolná proti korozi, únavě, průhybům a relaxaci,
- polymerní vložkou, která je lehká, odolná proti korozi a slouží jako bariéra proti průniku.



Zdroj: Warner, 2005 [12]

Obrázek 6. Průřez stěnou vodíkové nádrže Quantum s integrovanými systémy pro skladování paliva

Celkový pohled na kompozitní nádrže Quantum Technologies 70 MPa s klíčovými bezpečnostními a komunikačními prvky je znázorněn na obrázku 7. Tyto nádrže jsou velmi robustní a mnohem pevnější než nádrže na benzín, které mohou být vyrobeny z plastu.



Zdroj: Warner, 2005 [12]

Obrázek 7. Nádrž na stlačený plyný vodík typu IV od společnosti Quantum Technologies

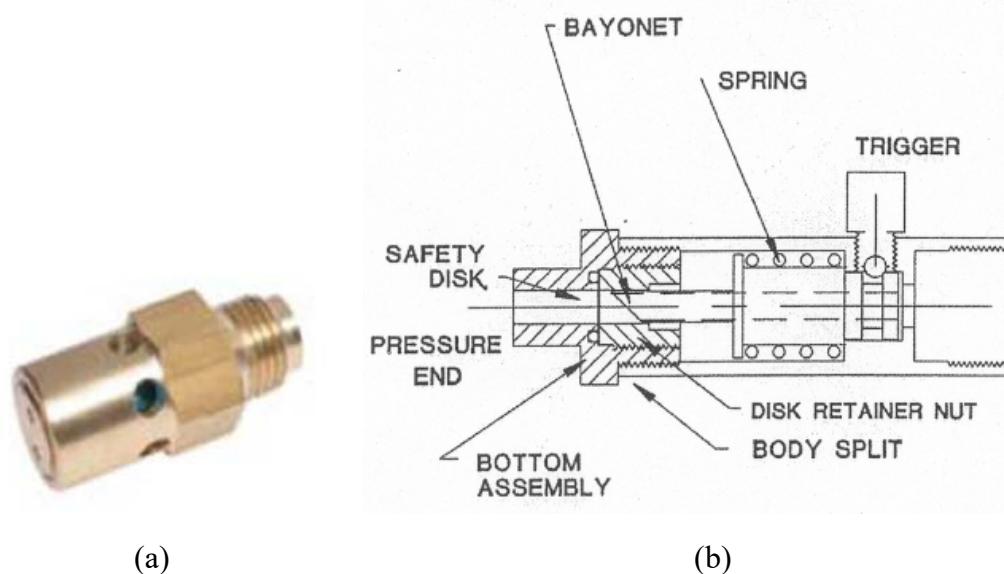
Hlavním problémem nádrží typu IV je prostup vodíku polymerní vložkou. Podle nařízení EU by rychlost prostupu vodíku (při teplotě 20 °C) u FC vozidel neměla překročit 6 NmL/hod/L, aby se zabránilo vzniku hořlavého složení v nejhrošším věrohodném scénáři soukromé garáže s rychlostí větrání 0,03 výměny vzduchu za hodinu (ACH) [13]. O pronikání vodíku podrobněji projednávají další části této přednášky. Pronikání vodíku polymerní vložkou může vést k jeho hromadění v prostoru mezi vložkou a CFRP a vzniku „puchýře“. To může způsobit částečné nebo úplné zhroucení vložky, pokud tlak nahromaděného vodíku převyší vnitřní tlak ve vložce (např. při odtakování nádrže). Proto je pro řešení tohoto problému velmi potřebný vývoj specializovaných polymerních materiálů.

4.3 Zařízení pro uvolnění přetlaku

Hlavním bezpečnostním prvkem systémů pro skladování vodíku (v automobilových i stacionárních aplikacích) jsou *zařízení pro uvolnění přetlaku (PRD)*, jejichž definice je následující: zařízení pro uvolnění přetlaku je bezpečnostní zařízení, které chrání před poruchou skladovací nádoby tím, že uvolní část nebo celý obsah nádrže v případě vysokých teplot, vysokých tlaků nebo jejich kombinace [14]. V případě požáru zajišťuje *tepelně aktivované zařízení pro uvolnění přetlaku (TPRD)* řízené uvolnění plyného vodíku GH_2 z vysokotlakého zásobníku, dříve než dojde k oslabení jeho stěn vlivem vysokých teplot, což vede ke *katastrofálnímu protržení zásobníku*. TPRD uvolní veškerý obsah zásobníku. Neuzavírají se a neumožňují opětovné natlakování nádoby.

Očekává se, že zásobníky a nádoby, které byly vystaveny požáru, budou vyřazeny z provozu a znehodnoceny [8]. Zařízení PRD jsou zkonstruována v souladu s předpisy a normami. Zařízení PRD by měla být vyráběna, montována, provozována, udržována, kontrolována a opravována v souladu s právními předpisy a pravidly místních jurisdikcí [15]. Podle nařízení Evropské komise (EU) č. 406/2010 musí být palubní zásobník vodíku vybaven zařízeními PRD/TPRD [13].

Zařízení PRD jsou navržena tak, aby se otevřela, když tlak nebo teplota dosáhnou určité meze. Zařízení TPRD se otevřou, pokud je teplota vyšší než 108–110 °C. Vodíkové nádrže by měly být chráněny neuzavíratelnými TPRD (povšimněte si, že vozidla na CNG jsou obvykle vybavena uzavíratelnými PRD). Na trhu je k dispozici mnoho typů zařízení PRD. Mezi nejběžnější patří tavná kovová zátka, skleněná baňka nebo bajonet (obrázek 8). Tavná kovová zátka uvnitř PRD se při teplotách vyšších než 110 °C roztaví, otevře a vypustí celý obsah nádrže. Skleněná baňka v zařízení PRD (obrázek 8a) je dutá a obsahuje kapalinu. Po zahřátí se baňka rozbije; uvolní se tak talířový ventil, který se posune doleva. Tím se otevře těsnicí O-kroužek a plyn se vypustí radiálními otvory. Bajonetové zařízení PRD (obrázek 8b) se po dosažení spouštěcí teploty (cca 124 °C) roztaví a umožní pohyb kuličkového ložiska a uvolnění pružiny, která bajonetem prorazí bezpečnostní disk. Obsah zásobníků se uvolňuje přes dutý bajonet.



Obrázek 8. Skleněná baňka (a) a bajonetový (b) typ PRD.

Bez zařízení PRD může dojít k přehřátí zásobníku, což může vést k jeho katastrofickému selhání, uvolnění hořlavého plynu a velkého množství mechanické energie uložené v důsledku komprese. „I bez chemické energie způsobené hořlavostí plynu může mechanické uvolnění tlaku způsobit, že se nádrž rozlomí, prorazí ochranný kryt karoserie vozidla a odletí do velké vzdálenosti. Při použití zařízení PRD může řízené uvolňování po krátkou dobu (než se sníží tlak v nádrži) vést k intenzivnímu plameni, ale celkové riziko se pravděpodobně sníží“ [16].

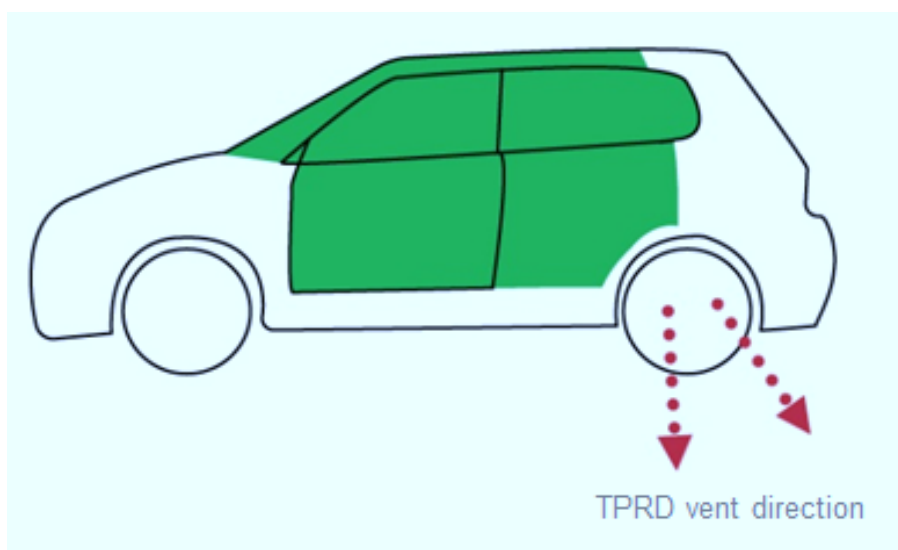
Bohužel, i když jsou zařízení PRD namontována, mohou v různých režimech selhat: buď předčasnou aktivací, nesprávným odvzdušněním, nebo tím, že se neaktivují vůbec – což je nejnebezpečnější scénář. Důvody selhání zařízení PRD bývají různé. Zařízení PRD se mohou zablokovat nečistotami, kameny nebo ledem, a proto v případě potřeby nezasáhnou. Mohou být zkorodovaná nebo jinak poškozená, takže uvolňují tlak, i když by neměla. Videozáznamy, které Southwest Research Institute pořídil během testů, kdy se zařízení PRD neotevřela u zásobníků CNG a u zásobníků vodíku, naleznete zde: <http://depts.washington.edu/vehfire/begin.html>

Podle Globálních technických předpisů (GTR) pro vozidla na vodíkové palivo (2013) nesmí být zařízení PRD „opětovně uzavíratelné a musí být tepelně aktivované. Musí být montované přímo do otvoru zásobníku nebo alespoň jednoho zásobníku v sestavě zásobníků nebo do otvoru ventilu zabudovaného do zásobníku tak, aby vypouštěl vodík do atmosférického vývodu, který vede ven z vozidla. Zařízení PRD nesmí být odpojitelné od jím chráněného obalu z důvodu běžného provozu nebo poruchy jiné součásti“ [8].

Podle požadavků GTR [8] nesmí být vypouštění plynného vodíku z PRD směřováno:

- na nekryté elektrické svorky, nekryté elektrické spínače nebo jiné zdroje zapálení,
- do prostorů pro cestující nebo zavazadlových prostorů, nebo směrem k těmto prostorům,
- do veškerých krytů kol vozidla nebo směrem na tyto kryty,
- k jakékoli součásti třídy 0,
- dopředu od vozidla, nebo vodorovně od zádi nebo boků vozidla [8].

Směr uvolňování vodíku ze zařízení TPRD je vyznačen na obrázku 9 [4].



Obrázek 9. Možné směry uvolňování vodíku v případě aktivace zařízení TPRD ve vozidle s vodíkovým pohonem

5. Důsledky katastrofického selhání vysokotlakého zásobníku vodíku (tlakové vlny, ohnivé koule, projektily)

Co se stane, když se TRPD při požáru neaktivuje? Studie provedené v Southwest Research Institute v USA [17, 18] prokázaly, že dojde ke katastrofickému protržení nádrže. Byly testovány dva typy nádrží (typ III a typ IV), které nebyly vybaveny zařízením TRPD, byly natlakovány přibližně na 35 MPa a obsahovaly pouze 1,64 kg vodíku. Oheň vznikl pomocí propanbutanového hořáku. Nádrž typu IV (s vložkou z vysokohustotního polyethylenu, strukturální vrstvou z uhlíkových vláken a vnější vrstvou ze skleněných vláken) o objemu 72,4 l a rozměrech délky \times D = 84 \times 41 cm byla testována samostatně. Rychlost uvolňování tepla (HRR) při požáru byla 370 kW. Tlak uvnitř nádoby P byl 34,3 MPa. Nádrž typu III (s objemem 88 l a D \times Š = 4,5 \times 1,8 m) byla umístěna pod typické sportovní užitkové vozidlo (SUV), 28 cm nad zemí. HRR = 265 kW, P = 31,8 MPa. Vnitřní teplota a tlak v tlakové láhvi se během posledního období mezi 6 min a 6 min 27 s požární expozice, která vyvrcholila katastrofickým protržením nádrže typu IV, zvýšily jen nepatrně (v důsledku nízké tepelné vodivosti CFRP), a to z 27 na 39 °C a z 34,5 na 35,7 MPa. Důvodem není zvýšení tlaku, ale degradace vnějšího pláště nádrže. Hoření kompozitních vrstev nádrže začalo za 45 s u typu IV a za 20 s u typu III, což se poznalo podle výskytu černých sazí. Doba selhání po iniciaci požáru (tj. požární odolnost) byla naměřena 6 min 27 s u nádrže typu IV a 12 min 18 s u nádrže typu III. Bylo zjištěno, že plamen pronikl do interiéru vozidla SUV již po 4 minutách. Pokud se tedy cestující nacházejí uvnitř vozidla, musel by být jejich úspěšný únik nebo záchrana provedena v takto krátkém časovém úseku [17].

U nádrže typu IV (samostatné) se naměřené špičkové tlaky tvořící *tlakovou vlnu* pohybovaly od 300 kPa ve výšce 1,9 m do 41 kPa ve výšce 6,5 m. Nejvyšší tlak byl ve směru kolmém k podélné ose nádrže. Zde je třeba zmínit, že tlaky vyšší než 83 kPa dokáží způsobit těžká poranění i smrt [19]. U nádrže typu III (pod vozidlem SUV) byly špičkové tlaky nižší: 140 kPa ve výšce 1,2 m a 12 kPa ve výšce 15 m. Nicméně tato hladina je dostatečná pro sražení člověka k zemi (10 až 20 kPa) [19]. Je také třeba poznamenat, že energie uložená v nádrži je úměrná PV (kde P je tlak a V je objem). Větší nádrže s vyšším tlakem mají v případě protržení nádrže vyšší potenciál ohrožení tlakovou vlnou [17].

Velikost vzniklých *ohnivých koulí* byla 7,7 m v průměru 45 ms po protržení nádrže typu IV a 24 m v průměru u nádrže typu III. Ohnivé koule se zvedly za 1 s. Doba trvání ohnivé koule byla v obou případech přibližně 4,5 s (zaznamenáno infračerveným videozáznamem) a dvakrát kratší, pokud byla zaznamenána vysokorychlostními kamerami, které zaznamenávají viditelné spektrum světla. Špičkové hodnoty tepelného toku naměřené při zkoušce nádrže typu III ve vzdálenosti 15,2 m činily 210–300 kW/m² (upozorňujeme, že přibližně 35 kW/m² tepelného toku vede k 1% úmrtnosti za 10 sekund) [17].

V případě nádrže typu IV (samostatný test) byla největším projektilem 14kg horní polovina nádrže nalezená 82 m od svého původního umístění. U zkoušky nádrže typu III (zkouška SUV) byl nalezen velký úlomek nádrže ve vzdálenosti 41 m od vozidla SUV. Střepiny z vozidla SUV byly nalezeny ve vzdálenosti až 107 m. Je možné, že neobjevené střepiny mohly doletět ještě dále [17]. Podle experimentů, které uvádí Weyandt [19], lze za „střelu“ považovat i samotný automobil (s výtlakem až 22 m). Za žádných okolností by se hasiči neměli pokoušet hořící vodíkovou nádrž z vozidla odstranit. V Ulsteru byla vyvinuta nová metodika, která umožňuje stanovit vzdálenosti ohrožení pro dva obecné případy: poškození zdraví lidí a poškození budov v případě katastrofické havárie vysokotlaké vodíkové nádrže [19, 20]. Tento nový přístup bude tématem přednášky věnované vodíkovým deflagracím, detonacím a tlakovým vlnám.

5.1 Stupeň požární odolnosti vodíkových nádrží

Je naléhavě nutné prokázat zvýšenou *požární odolnost* nádrží typu III a IV používaných výrobci automobilů nebo takových nádrží, které při požáru neexplodují ani při selhání zařízení TPRD. Například současná úroveň požární odolnosti nádrží typu IV zůstává nízká: pohybuje se od 3,5 do 6,5 minuty. I v případě použití zařízení TPRD je vzhledem k poměrně velkému průměru otvoru (4–6 mm) zařízení TPRD délka vznikajícího plamene příliš velká (10 až 15 m) a nebezpečná vzdálenost pro veřejnost by mohla být okolo 50 m [21]. To velmi ztěžuje nebo někdy i znemožňuje vlastní evakuaci nebo záchranné práce na místě nehody.

5.2 Potenciální nebezpečí a bezpečnostní otázky spojené s cGH₂: shrnutí

Mezi potenciální nebezpečí spojená se skladováním stlačeného plynného vodíku na palubě se řadí:

- Obtížná identifikace uvolňování vodíku, protože plyn je bez barvy, chuti a zápachu. Do vodíku nelze přidávat odoranty.
- Vodík může způsobit *křehnutí* kovů. To může mít za následek snížení pevnosti materiálu a následně prasknutí zásobníku, a únik vodíku.
- Dlouhodobé hromadění vodíku v uzavřených prostorech, jako jsou garáže nebo mechanické dílny, prostory pro cestující ve vozidlech. V důsledku vytěsnění vzduchu vodíkem může dojít k *udušení*.
- Vznik hořlavých směsí vodíku a kyslíku nebo vodíku a vzduchu. Nasátí hořlavé směsi do ventilačního systému budovy může vést k deflagraci nebo dokonce k detonaci.
- Vysokotlaké vodíkové proudy mohou proniknout holou kůží [22].
- Přetlak a impuls mohou způsobit poškození ušních bubínků, prasknutí nádrže, odletování úlomků, roztržení skleněných tabulí atd.
- *Jev tlakové špičky* může vést ke zhroucení garáže během jediné sekundy (bude popsán v následujících přednáškách).



- Vodík lze snadno zapálit, protože jeho MIE je 0,017 mJ (což je 10krát méně než u jiných paliv). Uvolněný vodík může zapálit i jiskra z elektrostatického výboje.
- Když hoří čistý vodík, jeho plameny jsou na denním světle neviditelné.
- Vodík hoří rychle a nevytváří kouř.
- Vnější požár, teplo nebo tepelné záření mohou způsobit mechanické protržení nádrže v důsledku tepelného rozkladu polymerních a kompozitních materiálů. Současná hodnota požární odolnosti (veřejně dostupná) je až 12 minut, než může dojít ke katastrofickému selhání.
- V případě poruchy TPRD je možný i nejhorší scénář: protržení (tj. porucha s katastrofálními následky) vodíkového zásobníku, při kterém vznikne ohnivá koule, tlaková vlna a hořící projektily.

6. Bezpečnostní technologie

Kompozitní nádoby pro skladování vysokotlakého vodíku v dopravních prostředcích jsou vyráběny a používají se v silniční, železniční, námořní a letecké dopravě v mnoha zemích po celém světě. Nejslabším místem kompozitních nádob je jejich reakce na oheň. Například při lokálním požáru nemusí být proces TPRD iniciován, jak ukázaly například nehody vozidel na stlačený zemní plyn v USA. Kromě toho by proces TPRD mohl být zablokován před požárem při nehodě apod. Tyto potenciální nedostatky vodíkového bezpečnostního inženýrství se mohou stát kritickými pro ochranu životů a majetku kvůli ničivým následkům protržení nádrže, tj. tlakové vlně, ohnivé kouli a projektilům. Kvantitativní posouzení rizik používání vozidel na vodíkový pohon (HPV) na londýnských silnicích provedené ve středisku HySAFER Ulsterské univerzity ukázalo, že riziko používání vodíkových automobilů je přijatelné, pokud doba do protržení zásobníku vodíku při požáru, tj. stupeň požární odolnosti (FRR), činí přibližně 50 minut [23]. Tento požadovaný FRR není srovnatelný s $FRR = 4-6$ min, který se v současnosti pozoruje při experimentech.

7. Nové technologie skladování

Tato kapitola pojednává o nových technologiích skladování vodíku. Tato první verze se zaměřuje na nové technologie nádrží pro skladování plynného vodíku stlačeného na úroveň 350 až 700 bar pro osobní vozidla FCEV.

Nové technologie skladování jsou nezbytné, protože současné technologie nádrží typu III (pro 350 bar) a IV (pro 350, 500 a 700 bar) jsou stále drahé, příliš těžké, neforemné a nedostatečně přizpůsobivé.

7.1 Náklady na skladování

I když je cena ve srovnání se systémem skladování současných tepelných vozidel stále vysoká, technické a ekonomické studie provedené CEA v projektu FCH-JU-Copernic (2016) a společností Polaris-Partner v projektu FCH-JU Tahya (2020) ukazují, že v letech 2016 a 2020 bude dosaženo cílové hodnoty 600 EUR a 400 EUR za kilogram skladovaného vodíku.

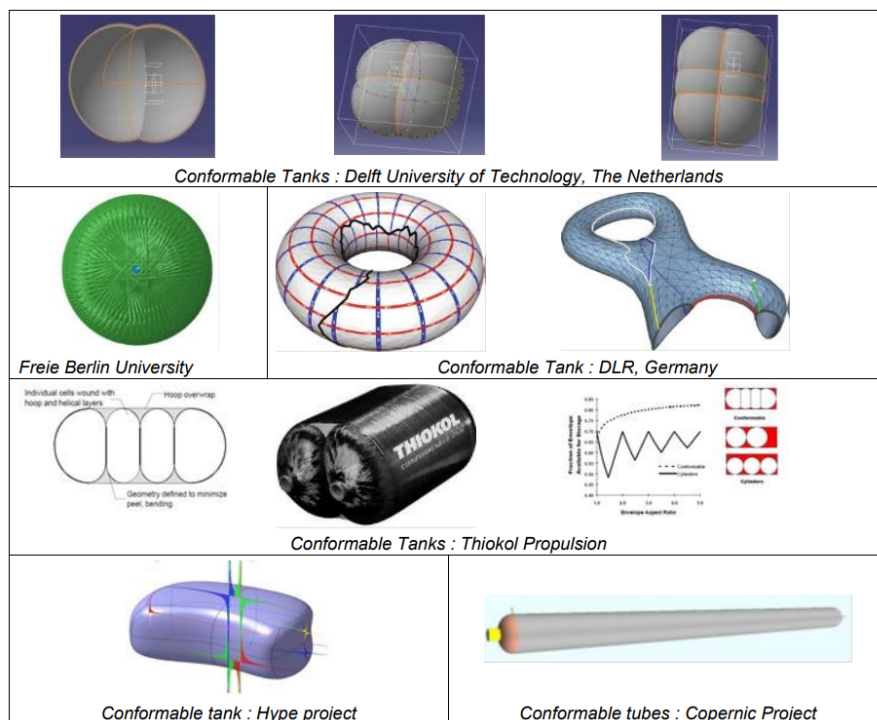
Tabulka 9. Výkonnostní cíle pro systémy skladování stlačeného vodíku

| Tank storage system Indicators | Unit | State of the art | | FCH-JU Target | | | FCH-JU Copernic project 2014-2016 (5 000 units/year) | FCH-JU Tahya project 2018-2020 (20000 units/year) |
|---|-------------------------------|------------------|-------|---------------|-------|-------|--|---|
| | | 2012 | 2017 | 2020 | 2024 | 2030 | 2016 | 2020 |
| Cost - Capex (at tank storage system) | (€ tss)/kg H ₂ | 3000 | 1500 | 500 | 400 | 300 | 600 | 400 |
| Volumetric capacity (at tank storage system) | (kg H ₂)/(L tss) | 0,02 | 0,024 | 0,03 | 0,033 | 0,035 | 0,022 | - |
| Gravimetric capacity (at tank storage system) | (kg H ₂)/(kg tss) | 4 | 5 | 5,3 | 5,7 | 6 | 5 | - |
| EC79 Test achieved | | | | | | | yes* | - |
| R134 achieved | | | | | | | not tested | - |

* H₂ cycling test not scheduled in the project

7.2 Objem úložiště, objem dle plochy a modularita

V praxi je nutné oddělit objem používaný k uskladnění plynu (VS) od plochy skladovacího systému (VE). Ten zahrnuje objem nádrže a také ztrátový objem související s existencí podpěr nebo spojováním těchto nádrží do svazků. Všimněte si například asociace tvarů lahví s rovnoběžníkovým VE, zatímco fyzicky má VS takřka válcový tvar. Pokud je důležitým cílem integrace skladovacího systému do motorového vozidla, přináší tvar láhve omezení, která jsou jen stěží slučitelná se současnou konstrukcí vozidel. Na úrovni integrace zůstávají dva cíle: kompaktnost (VS/VE, která by měla směřovat k unifikaci) a velikost (VE, která by měla být co nejmenší). Termín konformita spojuje oba předchozí aspekty. K tomuto pojmu můžeme přidat také pojem modularity, který v konečném důsledku umožňuje velkou volnost pro vnější tvar úložného systému i pro celkovou hmotnost vodíku na palubě vozidla, a to v souvislosti s možnostmi montáže a různorodým počtem modulů. Na druhé straně je aspekt konformity nebo dokonce modularity také silně spojen se snížením nákladů na skladovací systémy a jejich velikost. Směrem k přizpůsobivosti a kromě kompaktnosti a velikosti by modularita mohla být také způsobem, jak zmenšit ztrátový objem při integraci nádrže, pokud by bylo možné definovat účinná řešení s více nádržemi. Níže uvedená tabulka zobrazuje příklady různých konformních nádrží. Většina těchto nádrží představuje pouze koncept, protože jejich cena by byla pro veřejné využití pravděpodobně neúnosná (především kvůli výrobním nákladům).

Obrázek 10. Příklady nových geometrií nádrží H₂

7.3 Nový trend z roku 2020

V posledních 10 letech představovaly velké kompozitní tlakové nádrže s ochranným obalem praktické řešení pro začlenění systému skladování vodíku do stávající konstrukce vozidel vyvinuté především pro spalovací motory. S rychlým rozšířením BEV po celém světě mají výrobci vozidel potřebu sdílet shodnou konstrukci vozidel a hledat nové možnosti konstrukce skladovacích systémů s vyhovujícími nádržemi. Začlenění obou energetických systémů do jedné karoserie by umožnila úspory z rozsahu, zjednodušila a zkrátila technické a výrobní procesy a umožnila flexibilní výrobu, která by mohla tlumit výkyvy poptávky, aniž by se snížila očekávání zákazníků ohledně prostoru, výkonu, bezpečnosti nebo nákladů. Výrobci automobilů tak na jedné straně zdůvodňují nové tvary tím, že mohou používat stejnou platformu pro vozidla BEV a FCEV (obrázek 11). Jedná se o nádrže „krabicového“ tvaru. Na druhou stranu zvyšují dojezd vozidel využitím ztraceného prostoru.

OEM desires

- Same platform for BEV and FCEV = « **box** » **shape tanks**
- Longer autonomy = **use of void/lost spaces**

Options

Pressure Vessel

Blow Molded Container

← LOW SHAPEABLE HIGH →

Consolidated Container

Serpentine Container

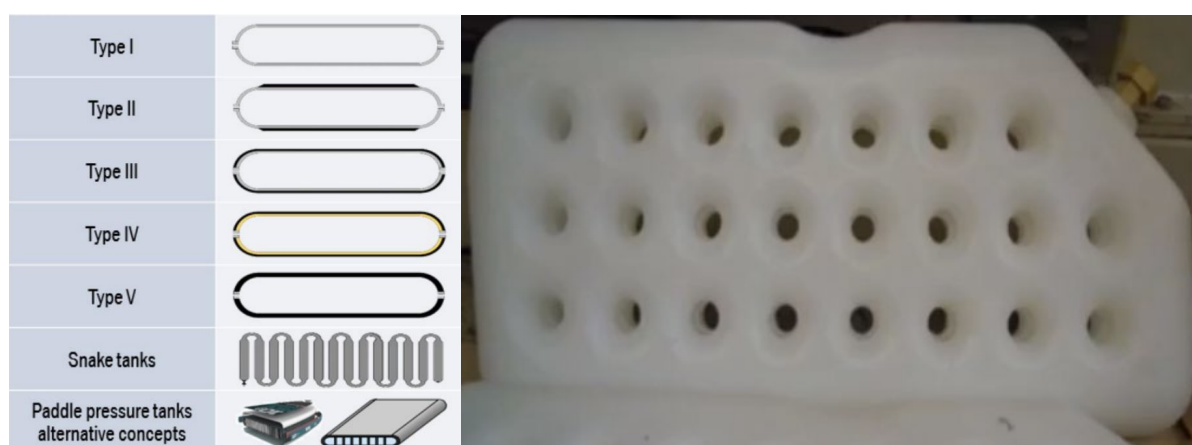
Internal Support Container

- **Conformable tanks (GTR13)**

79% of the square's surface

Obrázek 11. Nový trend pro integraci a tvar tlakových skladovacích systémů

Obrázek 12 ukazuje přehled různých tlakových nádrží, které lze použít pro alternativní systémy skladování vodíku, jež lze integrovat do prostoru vyhrazeného pro baterie. Tlakové nádrže typu I, II, III, IV a V lze začlenit jako samostatné tlakové nádrže (jak se v současné době používají v běžných vozidlech s palivovými články) nebo mohou být uspořádány podobně jako krabice s pastelkami v podvozku vozidla ve čtvercovém konstrukčním prostoru baterie elektrických vozidel. Nádrže mohou být zapojeny sériově nebo paralelně a jsou hlavními součástmi systému skladování vodíku v podvozku. Tyto tlakové nádrže mají stále svůj typický válcový tvar s kopulovitým zakončením, ale díky schopnosti přizpůsobit svůj celkový tvar volnému konstrukčnímu prostoru by mohly být klasifikovány jako „přizpůsobivé tlakové nádrže“. Do této kategorie :přizpůsobivých nádrží: patří také takzvaná „terária“ a tlakové nádrže s lopatkami.



Obrázek 12 Klasické a alternativní nádrže a alternativní vložky vyráběné společností RAIGI

8. Využití e-Laboratoře

V přednášce 1 byla představena e-Laboratoř pro vodíkovou bezpečnost. Řada nástrojů, které obsahuje, je užitečná zejména v aplikacích souvisejících se skladováním vodíku. Patří mezi ně výpočet dynamiky poklesu tlaku ve skladovací nádrži, doby do protržení nádrže a korelace požárních koulí.

Literatura a odkazy

1. DoE. Skladování vodíku (2015). K dispozici na adrese: <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> [přístup k datu 06.11.2020].
2. NASA. Shrnutí: vesmírné aplikace vodíkových a palivových článků. K dispozici na adrese: http://www.nasa.gov/topics/technology/hydrogen/hydrogen_2009.html [přístup k datu 06.11.2020].
3. Úvod do problematiky vodíku pro stavební úřady, Ministerstvo energetiky USA, Washington DC. K dispozici na adrese:

- http://www.hydrogen.energy.gov/training/code_official_training/ [přístup k datu 06.11.2020].
4. 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].
 5. Energetická zpráva Risø 3: Vodík a jeho konkurenti (2004). Editoři: Larsen, H, Feidenhans, R a Petersen, LS. Národní laboratoř Risø. ISBN 87-550-3349-0.
 6. Zuettel, A (2013). Vodík: výroba, skladování, aplikace a bezpečnost. H2FC Evropská technická škola vodíkových a palivových článků. 23.–27. září 2013, Kréta, Řecko.
 7. Cíle DoE pro palubní systémy skladování vodíku v lehkých užitkových vozidlech (2009). Zveřejněno na webových stránkách DOE/EERE. K dispozici na adrese: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/targets_onboard_hydro_storage.pdf [přístup k datu 06.11.2020].
 8. GTR, Návrh globálního technického předpisu (GTR) o vozidlech na vodíkové palivo, 2013. ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2013/41. Organizace spojených národů. Ekonomická komise OSN pro Evropu. Výbor pro vnitrostátní dopravu. Světové fórum pro harmonizaci předpisů pro dopravní prostředky (WP.29), 160. zasedání, Ženeva, 25.–28. června 2013.
 9. Mafeld, A. (2015). CPV: Regionální trendy na světovém trhu. JEC Asia: Fórum o kompozitních tlakových nádobách. Singapur, 22. října 2015.
 10. Barthelemy, H (2009). Technologie skladování vodíku: kompatibilita materiálů s vodíkem. Výukové materiály 4. ročníku ISCARW, Korsika, červen 2009.
 11. Klebanoff, L (Ed) (2012). Technologie skladování vodíku: Materiály a aplikace. Boca Raton: CRC Press. Taylor&Francis.
 12. Warner, MJ (2005) Nízkonákladové vysokotlaké zásobníky vodíku s vysokou účinností, Quantum Technologies, Irvine, Kalifornie. K dispozici na adrese: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/04_warner_quantum.pdf [přístup k datu 06.11.2020].
 13. Nařízení Komise (EU) č. 406/2010 ze dne 26. dubna 2010, kterým se provádí nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 79/2009 o schvalování typu vozidel na vodíkový pohon. Úřední věstník Evropské unie. Svazek 53, 18. května 2010. K dispozici na adrese: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:FULL:EN:PDF> [přístup k datu 06.11.2020].
 14. Sunderland, P (2010a). Vozidla s vodíkovým pohonem a bezpečnostní předpisy v USA. Výukové materiály 8. konference ISCARW, Belfast, Spojené království, červen 2010.

15. Malek, MA (2006). Zařízení pro uvolnění přetlaku dle norem ASME a API přehledně. New York: McGraw Hill.
16. Vyšetřování požárů motorových vozidel, přístup k počítačovému školení. K dispozici na adrese: <http://depts.washington.edu/vehfire/topics.html> [přístup k datu 06.11.2020].
17. Zalosh, R (2007). Tlakové vlny a ohnivé koule vznikající při protržení vodíkové palivové nádrže během požáru. Sborník příspěvků z 5. semináře o nebezpečí požáru a výbuchu, Edinburgh, Spojené království, 23.–27. dubna 2007, s. 2154–2161.
18. Weyandt, N (2006). Požár vozidla s vyvoláním katastrofálního selhání vodíkové tlakové lahve v typickém vozidle SUV, Výzkumný ústav požárů motorových vozidel. Zpráva. Prosinec 2006. K dispozici na adrese: www.mvfri.org [přístup k datu 06.11.2020].
19. Barry, TF (2003). Modelování profilu expozice požáru: některé údaje o mezní hodnotě poškození (TDL). Bílá kniha, TFBarry Publications, září 2003.
20. Molkov, V a Kashkarov, S (2015). Tlaková vlna z protržení vysokotlaké plynové nádrže při požáru: samostatné a podvozkové vodíkové nádrže. Svazek. 40, č. 36, s. 12581–12603, 2015.
21. 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.
22. Hammer, W (1989). Řízení a technologie bezpečnosti práce, 4. vydání, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989, ISBN 0-13-629379-4, kapitola 19.
23. M. Dadashzadeh, S. Kashkarov, D. Makarov a V. Molkov, „Metodika posuzování rizik pro skladování vodíku v dopravních prostředcích“, Int. vodíková energie, svazek 43, s. 6462–6475.