



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 9

Nebezpečné vzdálenosti od vodíkových plamenů a hašení požáru

ÚROVEŇ II

Velitel posádky

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

Toto téma je k dispozici také na úrovních I, III 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 přednáška je zaměřena na zapálené úniky vodíku (mikroplameny, tryskové požáry, ohnivé koule). Na začátku byla zavedena užitečná terminologie. Dále je uvedena klasifikace různých typů vodíkových požárů.

Klíčová slova

Vodíkový oheň, délka plamene

Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova	3
1. Cílové publikum	5
1.1 Popis úlohy: Velitel posádky.....	5
1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel posádky	5
1.3 Předchozí učení: Velitel posádky	5
2. Úvod a cíle.....	5
3. Hlavní terminologie	6
4. Typy vodíkových požárů a plamenů.....	8
5. Sálavé tepelné toky z tryskových požárů a ohnivých koulí	9
5.1 Sálavé tepelné toky z tryskových požárů	9
5.2 Tryskové požáry vodíku v porovnání s tryskovými požáry obvyklých paliv	9
5.3 Vodíkové ohnivé koule	11
5.4 Vliv zpožděného zapálení na tlak tryskových požárů vodíku.....	12
6. Požár vozidel s pohonem na palivové články	12
Poděkování	19
Literatura a odkazy	19

1. Cílové publikum

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

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

1.1 Popis úlohy: Velitel posádky

Velitelé posádek jsou zodpovědní za taktické nasazení hasičských týmů, které na základě konkrétních pokynů vycházejících ze SOP a informací získaných na místě zásahu zahajují a řídí činnost týmů, které plní stanovené úkoly zaměřené na dosažení požadovaných výsledků, jako jsou vyhledávání a záchrana osob, hašení a lokalizace požáru a vyprošťování.

1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel posádky

Schopnost taktického rozhodování založená na znalostech, dovednostech a zkušenostech s chováním, které podporují úsudek při rozhodování za rychlého průběhu okolností. Na základě operačního učení a schopnosti interpretovat a v případě potřeby modifikovat SOP, využívat dříve nabyté informace a informace získané při incidentu se od velitele posádky očekává, že vytvoří a povede taktické operace poté, kdy vyhodnotí mimořádnou událost, určí priority a vyžádá si případnou další pomoc.

1.3 Předchozí učení: Velitel posádky

EQF 4 Faktické a teoretické znalosti v širokých souvislostech v rámci pracovního nebo studijního oboru. Řada kognitivních a praktických dovedností potřebných k řešení konkrétních problémů v oblasti práce nebo studia. Vykonávání samostatné činnosti v rámci pracovních nebo studijních podmínek, které jsou obvykle předvídatelné, ale mohou se měnit; dohlížení na běžnou práci ostatních a převzetí určité odpovědnosti za hodnocení a zkvalitňování pracovních nebo studijních činností.

2. Úvod a cíle

O pojmu „bezpečnost“ se často hovoří jako o „netechnické“ překážce pro nové technologie FCH. Před uvedením těchto technologií na trh je však třeba vyřešit několik technických otázek. Jednou z nich je zkrácení plamene vodíkového proudu ze současné hodnoty 10 až 15 m z palubní nádrže vozidla s FC, aby byla umožněna evakuace a záchrana cestujících a jejich zabezpečení záchranáři. Dalším důležitým nevyřešeným problémem je zvýšení požární odolnosti palubních nádrží na vodík z 1–7 minut (současná hodnota pro nádoby typu IV), aby se prodloužila doba poklesu tlaku v nádrži. Tím by se zabránilo vážnému poškození stavebních objektů, jako jsou garáže, při náhodném úniku vodíku. Navíc by se tím vyloučila i možnost vzniku velkých mraků směsi vodíku se vzduchem uvnitř tunelů, které mohou v případě požáru vést k úmrtí osob v celé délce tunelu. Vyšší požární odolnost vodíkových zásobníků by umožnila bezpečnou evakuaci civilních osob z místa nehody a zajistila by bezpečnost života cestujících i záchranářů [1].



Členové zásahových jednotek se budou muset bezpochyby zabývat událostmi a nehodami, při nichž dojde k požáru vodíku, protože vodíkový požár je typickým scénářem mnoha nehod. Znalost možné délky vodíkového plamene a souvisejících separačních vzdáleností má pro členy zásahových jednotek klíčový význam. Při požáru vzniká také tepelné záření, které může ve vzdálenostech mimo délku plamene způsobit poškození zdraví osob i škody na konstrukcích, budovách, zařízeních atd. Tato přednáška pojednává o několika faktorech, které ovlivňují rozsah tryskového požáru a související sálavý tepelný tok, jako jsou tlak ve vodíkovém zásobníku a velikost úniku. Tato přednáška se mimo jiné zabývá metodami detekce vodíkového požáru a technikami jeho zmírňování a hašení.

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

- rozlišit různé typy vodíkových požárů:
od mikroplamenů až po tryskové požáry a ohnivé koule,
- vyhodnotit délku plamene vodíku pomocí nomogramů, rozměrových a bezrozměrových korelací,
- posoudit průměrné umístění špičky tryskového plamene,
- předvídat stanovení separační vzdálenosti pro ochranu osob a konstrukcí,
- vysvětlit vliv různých faktorů na délku plamene tryskového požáru: velikost a tvar trysky, připojení proudění, vztlak, překážky nebo stěny,
- porovnat délky plamenů a tepelné toky tryskových požárů vodíku a jiných obvyklých paliv (CNG a LPG),
- vysvětlit tlakové účinky vodíkových tryskových požárů,
- vyjmenovat hlavní metody detekce vodíkových požárů,
- rozpoznat techniky pro zmírňování následků vodíkových požárů,
- provést postup hašení vodíkového požáru,
- posoudit hlavní bezpečnostní otázky související se současným stavem technologií FCH.

3. Hlavní terminologie

Pro úplné pochopení vodíkových požárů a dalších souvisejících jevů (jako jsou mikroplameny, zhašení, odpojení plamene, odfouknutí a vyfouknutí, tepelné vyzařování, viditelnost plamene, délka a rychlost plamene, dopadající tryskové požáry atd. je vhodné osvojit si několik definic uvedených níže. Věnujte prosím pozornost bezrozměrným číslům, která budou v této a dalších přednáškách často používána.

Pokles tlaku je proces, při kterém tlak v zásobníku během úniku klesá v závislosti na čase [1].

Odfouknutí je rychlé zhasnutí plamene bez odpojení [2].

Vyfouknutí je rychlé zhasnutí plamene s odpojením [2].

Limit vyfouknutí je mezní hodnota rychlosti proudění paliva, při jejímž překročení bude vznikající plamen vyfouknut [2].



Deflagrace je proces následující po slabém zapálení hořlavé směsi, které se šíří podzvukovou rychlostí do čerstvé, nespálené směsi [3].

Detonace je proces, při kterém se vlna spalování šíří v dosud nezreagovaném médiu nadzvukovou rychlostí [3].

Opětovné spojení je spojení odpojeného plamene s tryskou v důsledku snížení oddělovací rychlosti [2].

Účinný průměr je průměr proudu v místě, kde dochází k expanzi až na 1 bar v nedostatečně roztržitém proudu [4].

Roztržitý proud je proud s tlakem, který je na výstupu z trysky roven atmosférickému tlaku [1].

Stupeň požární odolnosti je míra doby, po kterou pasivní protipožární systém dokáže odolávat standardní zkoušce požární odolnosti [1].

Oddělení plamene je stav, kdy se plamen oddělí od hořáku.

Rychlost plamene je rychlost plamene vzhledem ke stanovišti stacionárního pozorovatele [3].

Bod vzplanutí je nejnižší teplota, při které palivo vytváří dostatek par, aby se vzduchem na jeho povrchu vytvořilo hořlavou směs [1].

Froudeho číslo (Fr) je bezrozměrné číslo, které se rovná poměru průřezové rychlosti proudění a gravitačního zrychlení [1].

Nebezpečná vzdálenost je vzdálenost od (zdroje) nebezpečí k (fyzikálním nebo numerickým modelováním nebo předpisem) stanovené hodnotě fyzikálního účinku (zpravidla tepelného nebo tlakového), která může vést k určitému stupni poškození (v rozsahu od „žádné poškození“ po „maximální poškození“) zdraví osob, zařízení nebo životního prostředí.

Laminární rychlost hoření je rychlost šíření plamene vzhledem k rychlosti nespáleného plynu, který se nachází před ním, za daných podmínek složení, teploty a tlaku nespáleného plynu [1].

Výška oddělení plamene je výška od výstupu z trysky k základně odděleného plamene [2].

Rychlost oddělení plamene je rychlost proudění paliva, která způsobuje oddělení plamene od trysky [2].

Machovo číslo (M) je bezrozměrné číslo, které se rovná poměru rychlosti proudění v konkrétním místě k rychlosti zvuku v konkrétním místě [1].

Maximální přípustný pracovní tlak ($MAWP$) je maximální tlak, kterému může být vystavena jakákoli součást nebo část tlakového systému v celém rozsahu konstrukčních teplot [5].

Podmínkami *normální teploty a tlaku (NTP)* se rozumí: teplota 293,15 K a tlak 101,325 kPa [1].



Nepremixovaný plamen (často nazývaný též *difuzní plamen*) je plamen, ve kterém se nemísí oxidant s palivem před dosažením čela plamene. Při spalování se oxidant spojuje s palivem difuzí. Rychlost plamene je omezena rychlostí difuze.

Přetlak je tlak v tlakové vlně, který je vyšší než atmosférický tlak nebo tlak uvnitř ochranné konstrukce a který překračuje maximální přípustný pracovní tlak ochranné konstrukce [5].

Premixovaný plamen je plamen, ve kterém se oxidant mísí s palivem před dosažením čela plamene. Spalování premixovaného paliva s oxidantem vytváří tenké čelo plamene, protože reakční složky jsou snadno dostupné.

Zhášecí spára je jiskřiště mezi dvěma rovnoběžnými plochými elektrodami, ve kterém je potlačeno zapálení hořlavé směsi paliva a vzduchu. Zhášecí spára je rozměr průchodu, který má zabránit šíření otevřeného plamene hořlavou směsí paliva se vzduchem, která vyplňuje průchod [1].

Reynoldsovo číslo (Re) je bezrozměrná veličina, která měří poměr mezi setrvačnou silou a viskozitou. [1].

Bezpečná (též separační) vzdálenost minimální vzdálenost, která odděluje „konkrétní cíle (např. osoby, stavby nebo zařízení) od následků možných havárií souvisejících s provozem vodíkového zařízení“ [6].

Nedostatečně roztržitý proud je proudění, u něhož je tlak na výstupu z trysky vyšší než atmosférický tlak [1].

Délka viditelného plamene je osová vzdálenost od hrotu trysky ke konci plamene [2]. K měření délky plamene se často používají digitální snímky ve viditelném, infračerveném (IR) a ultrafialovém (UV) spektru, přičemž naměřené délky plamene se na různých snímcích liší [9].

4. Typy vodíkových požárů a plamenů

Vodík může hořet různými způsoby, mezi něž se řadí zášlehový požár, tryskový požár, deflagrace, detonace atd. Požáry vodíku se mohou pohybovat od mikropřetlaků s hmotnostním průtokem 10^{-9} kg/s až po plameny s vysokým hmotnostním průtokem (stovky kg/s). Uvolněný vodík může hořet jako laminární difuzní nebo turbulentní nepremixovaný plamen v závislosti na Reynoldsově čísle (Re) na výstupu z místa úniku. Plameny mohou být řízeny vztlakem a dominovány hybností. Většina nebezpečných úniků vodíku bude probíhat v režimu proudění s dominující hybností. V závislosti na podmínkách na výstupu z proudu může být tryskový požár podzvukový (Machovo číslo $M < 1$), zvukový, případně nadzvukový a současně nedostatečně roztržitý. V situacích, kdy je možné selhání zásobníku s okamžitým únikem vodíku do okolní atmosféry, mohou vznikat i ohnivé koule velkých rozměrů (desítky metrů). Přítomnost překážek, povrchových ploch a krytů významně ovlivňuje tryskový plamen. Zvláštní případ představují požáry zkapalněného vodíku (LH₂). V současné době je k dispozici jen málo poznatků o požárech LH₂. Ve znalostech existují jisté nedostatky. Vše ale naznačuje, že

kondenzace a tuhnutí kyslíku (atmosférického) v případě úniku/rozlití LH₂ může za určitých podmínek způsobit vznik výbušné směsi.

5. Sálavé tepelné toky z tryskových požárů a ohnivých koulí

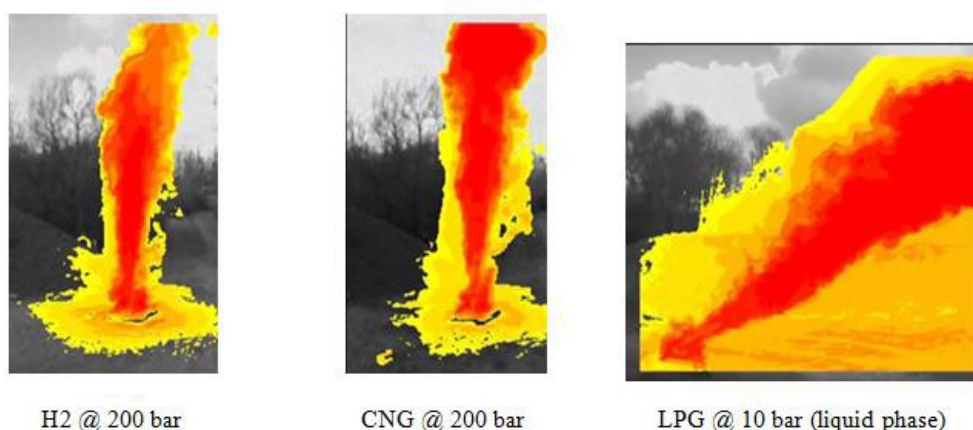
5.1 Sálavé tepelné toky z tryskových požárů

Vodík hoří v čisté atmosféře neviditelným plamenem. V porovnání s ostatními palivy má poněkud vyšší adiabatickou teplotu premixovaného plamene pro stechiometrickou směs ve vzduchu, a to 2 403 K. Tato teplota může být příčinou vážného poranění na místě nehody, zejména v čistém laboratorním prostředí, kde je vodíkový plamen prakticky neviditelný. Spalování vodíku a horké proudy však způsobují změny v okolí, které lze využít k detekci plamene. Ačkoli nesvítící vodíkový plamen ztěžuje vizuální detekci, na okolní atmosféru silně působí teplo a turbulence a zvedá se chochol horkých spalin. Tyto změny se nazývají *signatura požáru*.

Následující oddíl vychází z práce provedené v Ulsteru ve středisku HySAFER [7]. Než se budeme zabývat sálavým tepelným tokem, je třeba poznamenat, že vodíkový plamen vydává jen minimální množství infračerveného záření a prakticky žádné viditelné záření. Vzhledem k absenci pásem záření CO₂ a silné absorpci okolní vodní párou je poměr viditelných a infračervených vodíkových tryskových plamenů 0,88 a poměr ultrafialové a infračervené délky plamene činí 0,78 [10]. Konvekční a radiální tepelné toky jsou však i nadále důležitými parametry a musí být posuzovány z hlediska ochrany života, majetku a životního prostředí.

Vlivem sálavého tepelného toku na osoby, životní prostředí a konstrukce se podrobně zabývá přednáška 6 – Kritéria poškození zdraví osob a majetku.

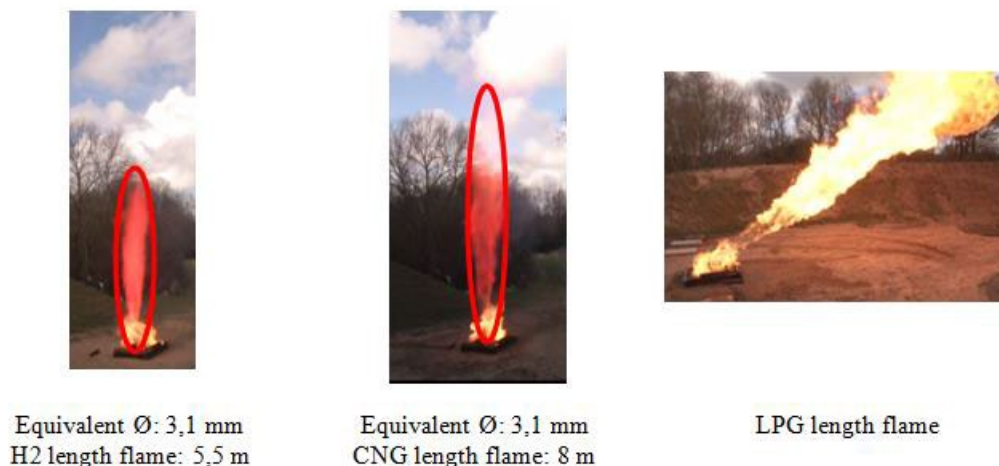
5.2 Tryskové požáry vodíku v porovnání s tryskovými požáry obvyklých paliv



Obrázek 1. Infračervený snímek tryskových požárů zobrazující tepelné záření vznikající při spalování vodíku (200 bar), CNG (200 bar) a LPG (10 bar).

Jak je patrné z [obrázku 1](#), v důsledku neúplného spalování CNG a LPG vznikají CO₂, CO, saze a další produkty, které v porovnání s vodíkem více ovlivňují záření. Tento jev vysvětluje, proč

se spalování vodíku vyznačuje nižšími tepelnými účinky než jiná běžná paliva, ačkoli jeho teplota přesahuje teplotu plamene CNG. **Obrázek 1** ukazuje srovnání tepelného záření, které produkují vodík (200 bar), CNG (200 bar) a LPG (10 bar) – tepelná signatura vodíkového tryskového požáru je o něco menší než u CNG a obě jsou výrazně menší než tepelné záření z požáru LPG.



Obrázek 2. Srovnání délky plamene tryskového požáru vodíku (průměr otvoru 3,1 mm), CNG (průměr otvoru 3,1 mm) a LPG.

Jak ukazuje obrázek 2, při stejném průtoku je v důsledku spotřeby kyslíku, která je u CNG čtyřikrát a u LPG pětkrát vyšší než u vodíku, délka plamene proudového požáru CNG a LPG větší než délka plamene vodíku.

Je důležité si uvědomit, že vodíkový plamen není v čistém prostředí viditelný. U systémů FCH a infrastrukturních aplikací jsou však vždy přítomny hořlavé materiály, které způsobují zbarvení plamene, jak je znázorněno na obrázku 2.

Vypočtené délky plamene v závislosti na průměru zařízení TPRD v několika typických případech jsou uvedeny v tabulce 1. K získání výsledků byl použit nástroj „Flame length correlation and three hazard distances for jet fires“ (Korelace délky plamene a tří nebezpečných vzdáleností tryskových požárů) v e-Laboratoři (<https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>).

Tabulka 1 Vypočtená délka plamene v závislosti na průměru zařízení TPRD v typických případech

Skladovací tlak (bar)	Průměr ústí (mm)	Teplota nádrže (°C)	Délka plamene (m)
350	1,0	20	2,6
700	1,0	20	3,3
350	1,0	50	2,5

700	1,0	50	3,2
350	3,0	20	7,8
700	3,0	20	9,9
350	3,0	50	7,5
700	3,0	50	9,6
350	1,0	100	3,1
700	3,0	100	9,2

5.3 Vodíkové ohnivé koule

Vodíkové ohnivé koule mohou vzniknout v důsledku katastrofické poruchy vodíkové nádrže. Případ pro bezpečnost zveřejněný na webu „h2safe.net“ (http://h2safe.net/case_safety.html) [11] analyzuje relativní četnosti způsobů selhání a uvádí, že pouze asi 10–27 % úniků tlakových plynů je klasifikováno jako katastrofické. Přesto je třeba zdůraznit, že nesprávná funkce bezpečnostního zařízení nádrže, TPRD, může vést ke katastrofickému protržení zásobníku vodíku. Ulsterská univerzita se zabývala modelováním následků a účinků katastrofického protržení zásobníku se zaměřením na tepelné záření a tlakové vlny. Jako vodítko lze použít velikosti ohnivé koule, které uvádí Zalosh [12]. Experimenty týkající se katastrofické poruchy vodíkového zásobníku byly provedeny na samostatné nádobě (nádrž typu IV; objem 72,4 l; zásobní tlak 34,3 MPa; bez zařízení TPRD) a na nádobě instalované pod vozidlem SUV (nádrž typu III, objem 88 l; zásobní tlak 31,8 MPa, bez zařízení TPRD). Samostatná nádrž typu IV katastrofálně selhala po 6 min 27 s od začátku požáru. Po něm následovala ohnivá koule o průměru 7,7 m, která vznikla 45 ms po protržení nádrže. Tato ohnivá koule se odpojila za 1 s [12].

U nádrže typu III pod vozidlem vnikly přibližně po 4 minutách působení propanbutanového ohně plameny a plyny do prostoru pro cestující. Ke katastrofickému protržení nádrže došlo po 12 minutách a 8 sekundách působení požáru, přičemž vznikla ohnivá koule o maximálním průměru 24 m a trvající 4,5 sekundy. Různé části zkušebního vozidla a zásobníku byly nalezeny ve vzdálenosti až 107 m. Je třeba zdůraznit, že výše uvedené vzdálenosti mohou být u vodíkových zásobníků natlakovaných na 70 MPa ještě větší [12].

Vývoj a ověření CFD modelu pro simulaci dynamiky tlakové vlny a ohnivé koule po samostatném protržení vysokotlaké vodíkové nádrže při požáru v otevřené atmosféře nedávno provedli na Ulsterské univerzitě Molokov a kol. [21]. Vzájemné doplňování a synergie experimentálních dat a numerické analýzy umožnily získat podrobné informace o dynamice tlakových vln a ohnivých koulí, a tím odstranit mezery ve znalostech o fyzikálních jevech, které za ní stojí. Jedná se o první studii, která kvantitativně vysvětluje mechanismus přispívání hoření vodíku k síle tlakové vlny. Například hoření vodíku po protržení nádrže s objemem 36



l a tlakem 70 MPa při požáru zvyšuje maximální přetlak tlakové vlny ve výšce 5 m o 37 %. Simulovaná ohnivá koule vykazovala typický vývoj ve fázi růstu, než se vznesla v důsledku působení vztlačky. Velikost a tvar ohnivé koule (7,7 m po 45 ms) byly přesně reprodukovány v rámci experimentu provedeného v USA.

5.4 Vliv zpožděného zapálení na tlak tryskových požárů vodíku

Bezprostředně po vzniku úniku z vysokotlakého vodíkového zařízení dochází k nestabilní fázi vzniku proudění. Opožděné zapálení a následné hoření nestabilního, vysoce turbulentního oblaku směsi vodíku se vzduchem, který se v této fázi vytvoří, může vést ke značnému přetlaku v blízkém okolí, jenž může poškodit zdraví osob. Tento proces je v podstatě deflagrací a probíhá před vznikem kvazistálého tryskového požáru [1].

6. Požár vozidel s pohonem na palivové články

Vozidla s palivovými články (FCV) jsou jednou z hlavních aplikací technologií FCH, které zažívají nebyvalý rozvoj. Podobně jako u bateriového elektromobilu není automobil s palivovými články vybaven spalovacím pístovým motorem. Palivové články přeměňují energii uloženou v chemické formě přímo na elektrickou energii, která pohání automobil. Na celém světě vzniklo několik tisíc vozidel FCV a malé flotily vozů s palivovými články využívají zejména firmy a státní úřady, ale i soukromé osoby. Patří mezi ně sériové modely Hyundai (iX35 s palivovými články a NEXO) a modely Toyota Mirai I a II. V Německu jezdí více než tisíc vozidel, která mají k dispozici sto čerpacích stanic! Také některá vozidla hasičské záchranné služby jsou již vybavena palivovými články.

Například podle statistik požárů ve Velké Británii [13] v letech 2011–2012 ve Spojeném království zaznamenáno 28 800 požárů silničních vozidel. Pro srovnání, v USA došlo ve stejném období ke 172 500 požárům silničních vozidel. Postiženy byly různé typy vozidel: osobní automobily, těžká nákladní vozidla, lehká nákladní vozidla, vozidla veřejné dopravy atd. Většina (65 %) požárů vznikla u osobních automobilů, 10 % u lehkých užitkových automobilů, 4 % u nákladních vozidel a 2 % u autobusů nebo minibusů [13]. Příčiny požáru mohou být náhodné, úmyslné nebo neznámé. Většina úmyslných požárů (43 %) se týkala silničních vozidel: 13 900 požárů. Počet úmrtí při požárech silničních vozidel v letech 2011–2012 činil 37 [13].

V letech 2000 až 2006 bylo zdokumentováno 20 katastrofických poruch nádrží na CNG, z nichž 11 bylo způsobeno požárem vozidla [14]. Z těchto 11 událostí vyplývá, že většina zařízení PRD se neaktivovala (v případě lokalizovaného požáru). „Zkoušky ukázaly, že všechny palivové nádrže (CNG i vodíkové) bez ohledu na pracovní tlak jsou velmi náchylné k rychlé degradaci v důsledku lokálních požárů.“ [14] To znamená, že při posuzování rizik nelze vyloučit jejich katastrofické selhání [11].

Nebezpečí a související rizika pro FCV by měla být prokázána a interpretována odborným způsobem, s plným pochopením důsledků všemi zúčastněnými stranami, počínaje projektanty

FC systémů přes regulační orgány až po uživatele. První srovnání „závažnosti“ úniku a zapálení vodíkového a benzínového paliva provedl Swain [15]. **Obrázek 3** ukazuje snímky tryskového požáru vodíku a požáru benzínu po 3 s (vlevo) a 60 s (vpravo) od vzniku požáru vozidla. Je třeba poznamenat, že tyto rané snímky NEODPOVÍDAJÍ novějšímu úhlovému provedení zařízení TPRD s menším průměrem.



Obrázek 3. Tryskový požár vodíku a požár benzínu: 3 s (vlevo) a 60 s (vpravo) po iniciaci požáru vozidla [15].

Scénář s vozidlem na vodíkový pohon uvedený na obrázku 3 je vzácný. (Upozorňujeme, že u vozidel FCV neprobíhá uvolňování vodíku svisle vzhůru.) Může se realizovat při falešné samočinné aktivaci zařízení pro uvolnění přetlaku (PRD). Uvolnění vodíku z palubního zásobníku prostřednictvím zařízení PRD by totiž ve většině případů bylo způsobeno vnějším požárem. Scénář s vnějším požárem výrazně mění nebezpečí a související rizika v porovnání se situací znázorněnou na obrázku 3.



Obrázek 4. Zkouška požáru FCV od benzinové kaluže: vlevo – požár benzínu těsně před aktivací zařízení TPRD, vpravo – 1 sekundu po aktivaci zařízení TPRD [16].

Obrázky 4 a 5 ukazují výsledky studie požáru vozidel s vodíkovým pohonem provedené v Japonsku [16]. Vozidlo s FC bylo vybaveno tepelným zařízením pro uvolnění přetlaku (TPRD) s vnitřním průměrem ventilačního potrubí 4,2 mm. Při zkoušce znázorněné na obrázku 4 byla nádrž na stlačený vodík namontována přesně v místě odstraněné benzinové nádrže. Z tohoto

důvodu nebylo možné použít větší nádrž a byla použita malá nádrž s objemem 36 l při tlaku 70 MPa. Šíření požáru z benzinového vozidla na vozidlo s FC bylo zkoumáno s cílem řešit scénáře, kdy při srážce vozidel nebo přírodní katastrofě, jako je například zemětřesení, vzplanou různé typy vozidel. Experiment ukázal, že při aktivaci zařízení TPRD na nádrži ve vozidle s FC benzinovým požárem vznikne ohnivá koule o průměru více než 10 m (obrázek 4, vpravo).

V dalším testu, který provedli Tamura a kol. [16], byla dvě vozidla zaparkována přibližně 0,85 m od sebe a bylo zkoumáno šíření požáru z vozidla s FC na benzinové vozidlo. Obrázek 5 ukazuje dvě vozidla po aktivaci zařízení TPRD ve vozidle s FC. Z toho lze vyvodit závěr, že únik osob z vozidla nebo zajištění první pomoci při takové konstrukci systému uvolňování vodíku nejsou možné a výrobci automobilů se musí tímto problémem bezpečnosti zákazníků teprve zabývat.



Obrázek 5. HFCV s aktivovaným zařízením TPRD (vlevo) a benzinové vozidlo (vpravo) [16].

V testovacích podmínkách je příčinou šíření požáru z vozidla s FC na sousední benzinové vozidlo plamen šířící se z vnitřního a vnějšího vybavení vozidla s FC, nikoli vodíkový plamen ze zařízení TPRD (je třeba poznamenat, že ve studii, kterou provedli Tamur a kol., byla použita malá zásobní nádrž s objemem pouhých 36 litrů a s kratší dobou uvolňování vodíku [16] namísto větší nádrže, která je nutná pro zajištění konkurenceschopného dojezdu). Autoři dospěli k závěru, že v případě lodí přepravujících automobily a dalších podobných situací, kde jsou vozidla s FC zaparkována těsně vedle sebe, výsledky testů ukazují na možnost, že požár vozidla s FC aktivuje zařízení TPRD, a tím vytvoří vodíkové plameny, které následně mohou způsobit aktivaci zařízení TPRD pod podlahou v sousedním vozidle s FC.

Pro minimalizaci škod způsobených požárem vozidla s FC autoři [16] navrhli, že je důležité včas odhalit a uhasit požár před aktivací zařízení TPRD. Je známo, že uhasit požár vodíku je v mnoha praktických situacích obtížné, ne-li zcela nemožné. Lze doufat, že výrobci automobilů vyvinou vhodná bezpečnostní technická řešení, včetně zkrácení plamene z vozidla poháněného

vodíkem při nehodě, čímž vyloučí možný „dominový efekt“ v případě nehody a pomohou záchranářům zvládnout takové požáry a úspěšně provést záchranné operace. Experimenty, které provedli Tamura a kol., jednoznačně prokázaly, že zvládnutí požáru vozidla s FC může být velmi náročné jak z hlediska životů, tak z hlediska bezpečnosti a škod na majetku [16].

Jak již bylo zmíněno, stlačený plyný vodík je v současné době hlavní technologií pro skladování vodíku na palubě vozidel. Skladovací tlak zde činí až 70 MPa. Zpravidla se používají nádrže typu IV (s polymerní vložkou). Požární odolnost těchto nádrží je bohužel nízká. Například Stephenson [17] uvádí dobu do katastrofického selhání v rozmezí 3,5 až 6,5 minuty. Současným „řešením“, jak zabránit katastrofickému selhání těchto nádrží v podmínkách požáru, je rychlé uvolnění vodíku přes zařízení TPRD s otvorem s poměrně velkým průměrem (cca do 5 mm). Toto „řešení“ je však nepřijatelné, a to i v otevřené atmosféře, kvůli dlouhým plamenům, které znemožňují bezpečnou evakuaci osob a záchranné práce (obrázek 6). Kromě toho představuje vážný problém pro bezpečnost života a ochranu majetku, je-li vozidlo s FC umístěno v uzavřeném prostoru, jako jsou garáže, tunely nebo parkoviště [8].



Obrázek 6. Vodíkový tryskový požár ze zařízení PRD orientovaného vzhůru ve vozidle s palivovými články [18]. (POZNÁMKA: současná zařízení TPRD mívají zpravidla šikmý vývod)

Požár uvedený na obrázku 6 vznikl na popelníku přístrojové desky [18]. Zařízení PRD směřovalo vzhůru a aktivovalo se 14 min 36 s po počátku požáru (scénář s orientací směrem vzhůru). Testované vozidlo s FC bylo vybaveno dvěma tlakovými lahvemi s objemem 34 l, každá o tlaku 35 MPa a průměru zařízení PRD 5 mm (aby bylo možné uvolnit vodík za 5 minut a před katastrofickým protržením lahví).

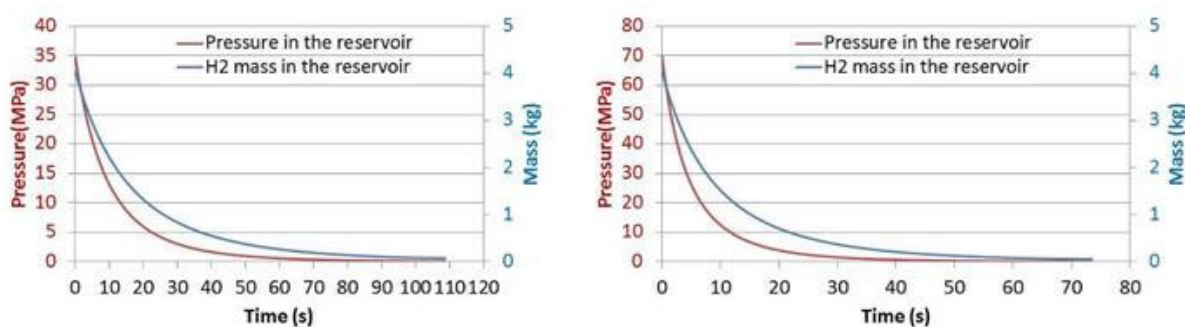
Scénář s únikem vodíku přes zařízení PRD směrem dolů je znázorněn na obrázku 7. V tomto případě bylo zařízení PRD aktivováno v čase 16 min 16 s po vzniku požáru [18].



Obrázek 7. Vodíkový tryskový požár ze zařízení PRD nasměrovaného dolů ve vozidle s FC (vlevo – pohled zezadu vozidla; vpravo – pohled z boku vozidla) [18].

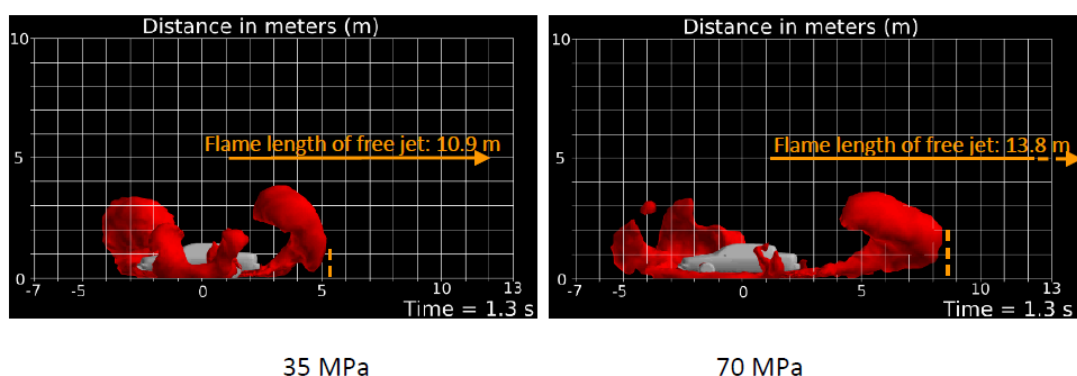
Obrázky 6 a 7 ukazují, že současná konstrukce zařízení TPRD v případě úniku vodíku a tryskového požáru neumožňuje evakuaci řidiče a cestujících, znemožňuje zásah záchranářů a ohrožuje veřejnost. Únik vodíku přes zařízení TPRD lze považovat za typický scénář nehody. Když teplota překročí 110 °C, aktivuje se zařízení TPRD a vodík se uvolní. Zařízení TPRD jsou běžně umístěna na skladovacích nádržích, pod vozidlem s palivovými články. Uvolnění je směrováno svisle dolů a vodíkový plamen dopadá na zem. K zapálení úniku ze zařízení TPRD s největší pravděpodobností dojde v případě požáru vozidla, a to nezávisle na tom, zda je vozidlo zaparkované, nebo v pohybu. Nebezpečí související s tímto scénářem závisí na době, po jejímž uplynutí dojde k zapálení. V případě okamžitého zapálení se dopadající vodíkový plamen (pod vozidlem) rozšíří ven a vytvoří prostředí požáru s vysokou teplotou, které představuje nebezpečí pro zdraví člověka a ohrožení majetku. Bez okamžitého zapálení vytvoří uvolněný vodík hořlavý mrak, který může způsobit požár s opožděným zapálením.

Ve studiích na Ulsterské univerzitě se vyhodnocují deterministické separační vzdálenosti pro zapálená uvolnění v otevřené atmosféře [49]. Pro zapálené úniky byly přijaty tři teplotní limity jako kritéria škodlivosti pro různé zranitelné cíle. Pro širokou veřejnost se za akceptační kritérium, při kterém nevzniknou škody, považuje teplota 70 °C. U členů zásahových jednotek bez tepelného ochranného oděvu byla za hranici bolesti považována teplota 115 °C. U členů zásahových jednotek s tepelným ochranným oděvem se konzervativně předpokládalo, že by neměly pracovat v prostředí s teplotou přesahující 260 °C, protože ochranná výstroj je navržena tak, aby se při vystavení takové teplotě po dobu pěti minut nezapálila, neroztavila, neodkapávala ani neoddělila [20].



Obrázek 8. Dynamika tlaku a hmotnosti ve vodíkovém zásobníku při uvolňování vodíku přes otvor zařízení TPRD s průměrem 4,2 mm: nádrž 171 l, počáteční tlak 35 MPa (vlevo) a nádrž 101 l, počáteční tlak 70 MPa (vpravo) [19].

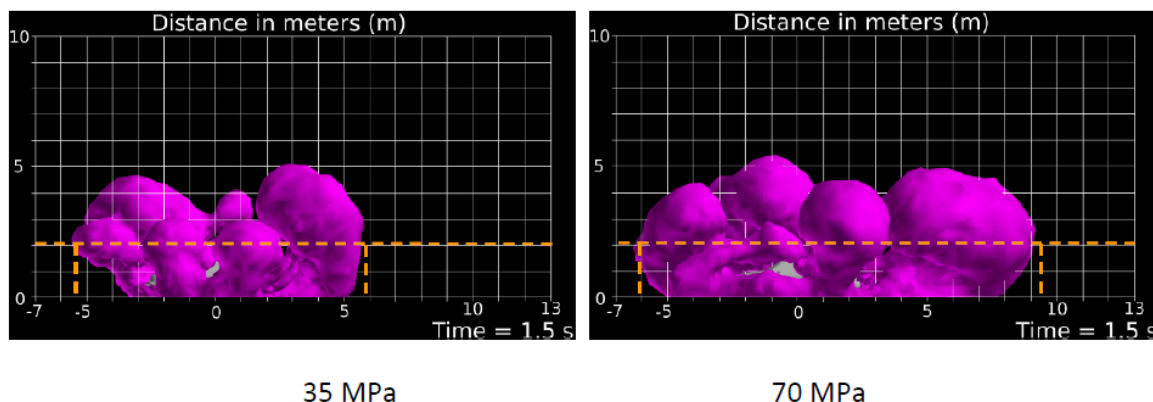
V reálných podmínkách neprobíhá uvolňování vodíku z vysokotlakého zásobníku jako stabilní proces, ale jako pokles tlaku, při kterém tlak v zásobníku pozvolna klesá, dokud se zásobník zcela nevyprázdní. K simulaci dynamiky tlaku v zásobníku vodíku při nedostatečně roztržitém proudu lze použít již dříve zmiňovaný model fiktivní trysky. Obrázek 8 ukazuje dynamiku tlaku a hmotnosti při postupném uvolňování ze dvou zásobníků vodíku: objem 171 l, skladovací tlak 35 MPa (obrázek 8 vlevo) a 101 l, skladovací tlak 70 MPa (obrázek 8 vpravo). Obě nádrže obsahují zpočátku stejné množství vodíku 4,05 kg a mají stejný průměr otvoru na zařízení TPRD 4,2 mm. Jak vyplývá z obrázku 8, celková doba poklesu tlaku z 35 MPa je kratší než 110 s a přechod z nedostatečně roztržitého proudu na roztržitý nastává za 85 s. Při uvolňování z nádrže 70 MPa je celková doba poklesu tlaku kratší než 75 s, přičemž přechod z nedostatečně roztržitého proudu na roztržitý nastává přibližně za 58 s [19].



Obrázek 9. Boční pohled na obálku největšího vodíkového plamene (izopovrch o teplotě $T=1300\text{ °C}$) [19].

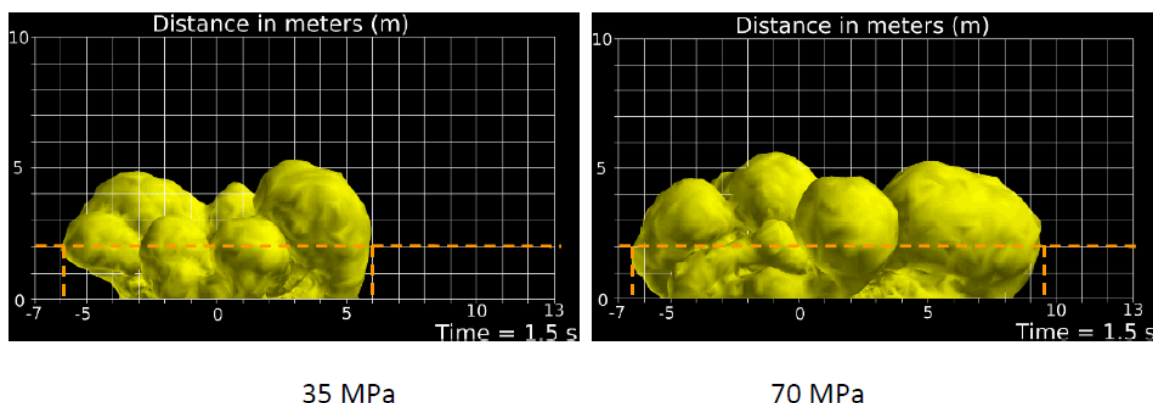
Obrázek 9 ukazuje snímek největšího plamene vznikajícího při uvolňování vodíku přes zařízení TPRD s otvorem o průměru 4,2 mm, které je umístěno pod vozidlem a směřuje dolů. Obálka plamene byla získána v simulacích CFD a vizualizována pomocí tepelné izoplochy $T=1300\text{ °C}$. Nejvzdálenější poloha hrotu plamene je přibližně 5,2 m a 8,4 m v případě uvolnění ze zásobníku s tlakem 35 MPa, resp. 70 MPa. Délka plamene při uvolnění tlaku ze 70 MPa se

v porovnání s uvolněním tlaku z 35 MPa prodlouží o více než 60 %. V obou případech se největší rozměry obálek vodíkového plamene vytvořily v blízkosti podlahy v čase cca 1,3 s po otevření zařízení TPRD. Následně se plamen zmenší a separační vzdálenosti se zkrátí. Na obrázku 9 je také znázorněno šíření nejdelšího plamene u volných tryskových požárů bez překážek vypočtené pomocí analytické korelace. Realistické uvolnění ze zařízení TPRD pod vozidlem vede k výraznému zmenšení obálky plamene o více než 50 % a takřka 40 % při uvolnění ze zásobníku s tlakem 35 MPa, resp. 70 MPa [19].



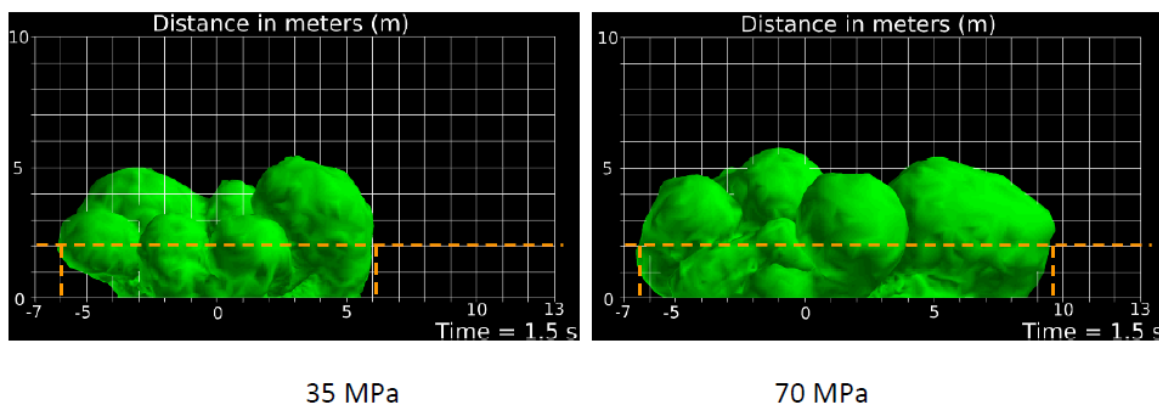
Obrázek 10. Boční pohled na největší obálku při bezpečné práci členů zásahových jednotek v ochranném oděvu (izopovrch o teplotě $T=260\text{ °C}$) zakončenou ve výšce 2 m [19].

Obrázek 10 ukazuje tepelný izopovrch $T=260\text{ °C}$, který odpovídá bezpečnostnímu prahu pro práci členů zásahových jednotek v tepelném ochranném oděvu. Největší nebezpečná vzdálenost činí přibližně 5,8 m a 9,2 m v případě úniků ze zásobníků s tlakem 35 MPa, resp. 70 MPa. Nebezpečná vzdálenost při uvolnění tlaku ze 70 MPa se v porovnání s uvolněním tlaku 35 MPa prodlouží o více než 58 %. V obou případech se nejvyšší teplota hořlavé obálky 260 °C teplota vytvoří v blízkosti podlahy v čase cca 1,5 s po otevření zařízení TPRD. Následně se obálky zmenší a separační vzdálenosti zkrátí [19].



Obrázek 11. Boční pohled na největší obálku při bezpečné práci členů zásahových jednotek bez ochranného oděvu (izopovrch o teplotě $T=115\text{ °C}$) zakončenou ve výšce 2 m [19].

Teplota izopovrchu $T=115\text{ °C}$ odpovídající prahové hodnotě pro činnost členů zásahové jednotky bez ochranného oděvu je znázorněna na obrázku 11. Největší nebezpečná vzdálenost v tomto případě činí přibližně 6 m v případě úniků z 35MPa tlakových zásobníků a 9,4 m v případě úniků ze 70MPa tlakových zásobníků. Nebezpečná vzdálenost při uvolnění tlaku ze 70 MPa se v porovnání s uvolněním tlaku 35 MPa prodlouží takřka o 57 %. V obou případech se největší obálky odpovídající teplotě $T=115\text{ °C}$ a v blízkosti země objevují přibližně 1,5 s po otevření TPRD. Následně se obálky zmenší a separační vzdálenosti zkrátí [19].



Obrázek 12. Boční pohled na největší obálku pro bezpečnost veřejnosti (izopovrch o teplotě $T=70\text{ °C}$) zakončenou ve výšce 2 m [19].

Z obrázku 12 je patrné, že pro širokou veřejnost činí největší separační vzdálenost 6 m a 9,5 m při úniku ze zásobníků s tlakem 35 MPa, resp. 70 MPa. Separací vzdálenost při uvolnění tlaku ze 70 MPa se v porovnání s uvolněním tlaku z 35 MPa prodlouží o více než 58 %. V obou případech se nejvyšší teplota hořlavé obálky 70 °C teplota vytvoří v blízkosti podlahy v čase cca 1,5 sekundy po otevření zařízení TPRD. Následně se obálky zmenší a nebezpečné vzdálenosti zkrátí [19].

Kromě toho je třeba vzít v úvahu i hladinu hluku související s únikem vodíku a výbuchem.

Poděkování

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

Literatura a odkazy

1. 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.

2. Cheng, TS, Chiou, CR (1998). Experimental investigation of the characteristics of turbulent hydrogen jet flames (Experimentální zkoumání vlastností turbulentních vodíkových tryskových plamenů). Odborný časopis Věda a technologie spalování. Col. 136, s. 81–84.
3. Dorofeev, SB (2009). Evaluation of hydrogen explosion hazards: phenomenology and potential flame acceleration and DDT (Posouzení nebezpečí výbuchu vodíku: fenomenologie a potenciální urychlení plamene a přechodu od deflagrace k detonaci). 4. evropská letní škola bezpečnosti vodíku.
4. Birch, AD, Brown, MG, Dodson, MG, Swaffield, F (1984). The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas (Struktura a rozpad koncentrace vysokotlakých proudů zemního plynu). Odborný časopis Věda a technologie spalování. Svazek 36, s. 249–261.
5. NFPA®52. předpis pro palivové systémy vozidel na zemní plyn, vydání z roku 2019.
6. LaChance, J, Tchouvelev, A a Engebo, A (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure (Vývoj jednotných kritérií škodlivosti pro použití v kvantitativní analýze rizik vodíkové infrastruktury). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 36 s. 2381–2388.
7. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering (Zásady vodíkového bezpečnostního inženýrství). Disertační práce. Ulsterská univerzita.
8. Projekt HyFacts. Kapitola F. Vodíkové požáry. K dispozici na adrese: <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/> [přístup k datu 25.11.2020].
9. Schefer, RW, Houf, TC, Bourne, B a Colton, J (2006). Spatial and radiative properties of an open-flame hydrogen plume (Prostorové a radiační vlastnosti vodíkového plamene s otevřeným ohněm). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 31, s. 1332–1340.
10. Houf, WG a Schefer, RW (2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen (Předpovídání vyzařovaných tepelných toků a hořlavých obálek při neúmyslném uvolňování vodíku). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 32, s. 136–151.
11. Case for safety. Relative frequency of failure modes (Případ pro bezpečnost. Relativní četnost způsobů selhání). K dispozici na adrese: http://h2safe.net/case_safety.html [přístup k datu 25.11.2020].
12. 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.

13. Statistiky požárů, Velká Británie, 2011–2012. Ministerstvo obcí a místní samosprávy.
14. Gambone, LR a Wong, JY (2007). Strategie protipožární ochrany pro vozidla s pohonem na stlačený vodík. 2. mezinárodní konference o bezpečnosti vodíku, San Sebastian, Španělsko, 11.–13. září 2007.
15. Swain, MR (2001). Fuel leak simulation (Simulace úniku paliva). Sborník příspěvků z konference DOE 2001 Hydrogen. K dispozici na adrese:
<https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/30535be.pdf> [přístup k datu 25.11.2020].
16. Tamura, Y, Takabayashi, M, Takeuchi, M a Mitsuishi, H (2011). The spread of fire from adjoining vehicles to a hydrogen fuel cell vehicle (Šíření požáru ze sousedních vozidel na vozidlo s vodíkovými palivovými články). Uvedeno v: Sborník příspěvků ze 4. mezinárodní konference o bezpečnosti vodíku, 12.–14. září 2011, San Francisco, USA.
17. Stephenson, RR (2005) Fire safety of hydrogen-fuelled vehicles: system-level bonfire test (Požární bezpečnost vozidel s vodíkovým palivem: ohňový test na úrovni systému). Sborník z 1. mezinárodní konference o vodíkové bezpečnosti, Pisa, Itálie, 2005. K dispozici na adrese: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005>. [Přístup k datu 25.11.2020].
18. Watanabe, S, Tamura, Y, Suzuki, J (2007). The new facility for hydrogen and fuel cell vehicle safety evaluation (Nové zařízení pro posuzování bezpečnosti vozidel na vodík a palivové články). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 32 (13), s. 2154–2161.
19. Li, Z, Makarov, D, Keenan, J, Molkov, V (2015). CFD studie uvolňování nezapáleného a zapáleného vodíku z TPRD pod vozidly s palivovými články. 6. mezinárodní konference o vodíkové bezpečnosti, 19.–21. října 2015, Jokohama, Japonsko.
20. NFPA 1971, Norma pro ochranné prostředky k hašení požárů v budovách a v blízkosti ohně, vydání z roku 2007. Národní asociace požární prevence, 2007, Boston, Massachusetts.
21. Molkov VV, Cirrone DMC, Shentsov VV, Dery W, Kim W, Makarov DV. Dynamics of blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire in the open atmosphere (Dynamika tlakové vlny a ohnivé koule po protržení vodíkové nádrže při požáru v otevřené atmosféře). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46: 4644–4665.