



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 9

Nebezpečné vzdálenosti od vodíkových plamenů a hašení požáru

ÚROVEŇ IV

Důstojník specialista

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

Toto téma je k dispozici také na úrovních I–III.

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. Dokument se podrobně věnuje popisu tryskových požárů vodíku (nejtypičtějších pro skladování stlačeného plynu). Významná část přednášky je věnována posuzování délky plamene a separačních vzdáleností. Přednáška se zabývá i kritérii škodlivosti vodíkových technologií. Je zde probrán vliv různých faktorů na délku plamene vodíku. V přednášce jsou prezentovány sálavé tepelné toky a délky plamenů tryskových požárů vodíku, CNG a LPG. Je uveden přehled technik detekce a zmírňování následků vodíkových požárů. Tyto informace budou velmi užitečné nejen pro virtuální realitu a operační cvičení, ale i pro rozhodování na místě nehody s požárem.

Klíčová slova

Vodíkový požár, délka plamene, separační vzdálenost, sálavé tepelné toky, detekce, zmírnění, uhašení

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 a cíle.....	6
3. Hlavní terminologie	7
4. Typy vodíkových požárů a plamenů.....	9
4.1 Mikroplameny	10
4.1.1 Zhášení vodíkových plamenů	10
4.1.2 Netěsnost armatur	12
4.2 Tryskové požáry vodíku, délka plamene a nebezpečné vzdálenosti.....	13
4.2.1 Rozměrová korelace.....	17
4.2.2 Bezrozměrná korelace.....	21
4.2.3 Stanovení délky plamene	26
4.2.4 Umístění hrotu tryskového plamene	26
4.2.5 Nebezpečné vzdálenosti od tryskových vodíkových požárů	29
4.3 Délky plamene a separační vzdálenosti ovlivněné různými vlivy	32
4.3.1 Vliv připojení proudu na délku plamene	32
4.3.2 Vliv velikosti a tvaru trysky na délku plamene	33
4.3.3 Vliv vztaku na deterministické separační vzdálenosti.....	36
4.3.4 Vliv protipožárních konstrukcí	36
5. Potrubní aplikace.....	37
6. Sálavé tepelné toky z tryskových požárů a ohnivých koulí	41
6.1 Sálavé tepelné toky z tryskových požárů	41
6.2 Tryskové požáry vodíku v porovnání s tryskovými požáry obvyklých paliv	44
6.3 Vodíkové ohnivé koule	45
6.4 Vliv zpožděného zapálení na tlak tryskových požárů vodíku.....	46
6.5 Vliv různých parametrů na přetlak.....	47
6.5.1 Vliv průměru otvoru na přetlak.....	47
6.5.2 Vliv opoždění zapálení na přetlak.....	48
6.5.3 Vliv místa zdroje zapálení na přetlak.....	48



7. Požár vozidel s pohonem na palivové články	49
8. Detekce, zmírňování a hašení vodíkových požárů	56
8.1 Detekce vodíkových požárů	56
8.1.1 UV detektory	58
8.1.2 IR detektory	59
8.1.3 Tepelné detektory	59
8.1.4 Zobrazovací systémy	59
8.2 Zmírňování vodíkových požárů	60
8.2.1 Regulace směru proudění	60
8.2.2 Stínění nebo protipožární konstrukce	60
8.2.3 Zkrácení délky plamene	60
8.2.4 Zařízení proti zpětnému vzplanutí a protiplamenná zařízení	62
8.2.5 Použití tepelné izolace	63
8.3 Hašení vodíkových požárů	63
9. Výpočet délky plamene při požáru nedostatečně roztržitého proudu	64
10. Příslušné nástroje e-Laboratoře	66
10.1 Výpočet délky plamene	66
10.2 Roztržité a nedostatečně roztržité proudy	69
10.3 Výpočet nebezpečné vzdálenosti	70
Poděkování	71
Literatura a odkazy	71

1. Cílové publikum

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň Důstojník specialista a vyšší. 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 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, zhášení, 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 roztržštěný 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 [23].

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 mikroplamenů 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 roztržštěný. V situacích, kdy je možné selhání zásobníku s okamžitým únikem vodíku do okolní atmosféry, mohou vznikat i ohnivé koule velkých rozměrů (desítky metrů). Přítomnost protipožárních konstrukcí, 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.

4.1 Mikroplameny

Popis vodíkových mikroplamenů je uveden v části 3.13 přednášky 2. Mikroplameny se vyznačují nízkým hmotnostním průtokem vodíku v řádu 10^{-9} kg/s (1 μ g/s), pokud jde o podzvukové laminární proudění z trhliny v nádrži.

4.1.1 Zhášení vodíkových plamenů

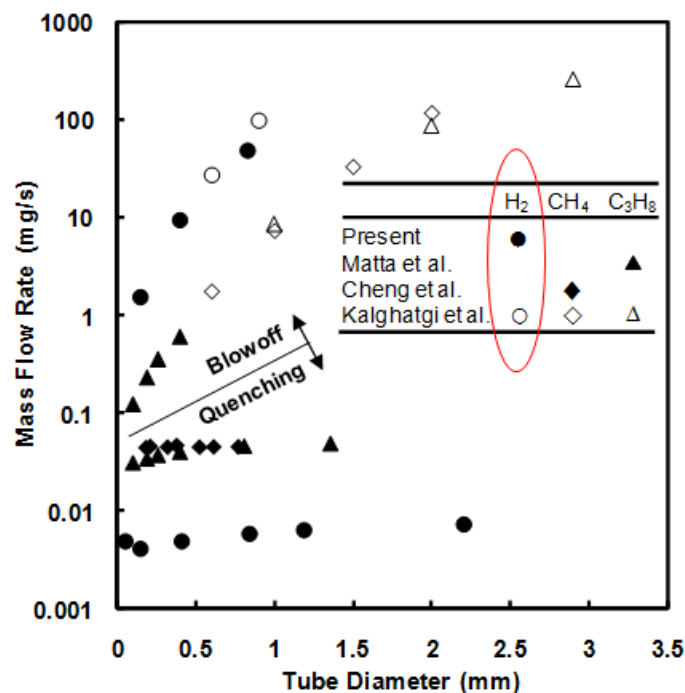
Obecně existuje omezený rozsah průtoků, při kterých lze na trysce hořáku vytvořit plamen. Průtok nižší, než je tento rozsah, se nazývá průtokem pod *mezi zhášení* [1]. K zhášení plamene dochází tehdy, když jsou tepelné ztráty plamene srovnatelné s teplem vzniklým v důsledku hoření, a chemické reakce se tak nemohou udržet. Hašení vodíkového plamene je obtížné. Například spalování premixu vodíku se vzduchem může být zhoršeno silným rozstříkem vody v důsledku vyvolané turbulence a schopnosti směsi hořet okolo kapek. Vodík má ve srovnání s ostatními hořlavými plyny nejmenší zhášecí vzdálenost.

Zhášecí vzdálenost je maximální vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými deskami, která uhasí plamen procházející mezi nimi. Zhášecí vzdálenost se zkracuje s rostoucím tlakem a teplotou. Záleží také na složení směsi [1]. Pojmem *zhášecí spára* se rozumí jiskřiště mezi dvěma rovnoběžnými plochými elektrodami, ve kterém je potlačeno vznícení hořlavé směsi paliva se vzduchem [1]. Pro premixované směsi vodíku se vzduchem se často používají dvě metody:

- kruhová trubice, pomocí které se měří průměr zhášení,
- Štěrbina, přes kterou se měří zhášecí vzdálenost dle šířky štěrby [10].

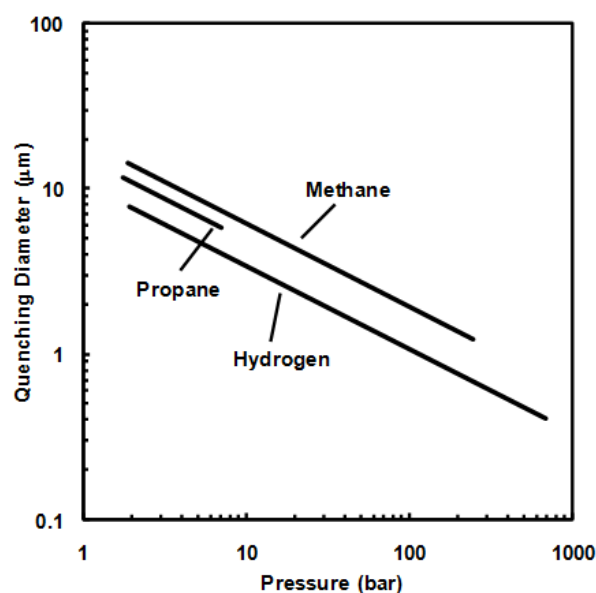
K označení zhášení vodíkových plamenů se používá ještě jeden pojem: a *mezí hodnota odfouknutí*, která odpovídá dosaženému průtoku, po jehož překročení dojde k *odfouknutí* plamene od trysky [1]. Limity zhášení a odfouknutí omezují průtok, který může podpořit spalování.

Kalghatgi [11], Matta a kol. [12] a Cheng a kol. [13] měřili limity zhášení a odfouknutí různých plynných paliv, například propanu, metanu a vodíku, na kruhových hořácích (obrázek 1). Jak vyplývá z obrázku 1, jsou meze zhášení takřka nezávislé na průměru. Vodík má nejnížší mez zhášení a nejvyšší mez odfouknutí.



Obrázek 1. Limity zhášení a odfouknutí různých paliv [1].

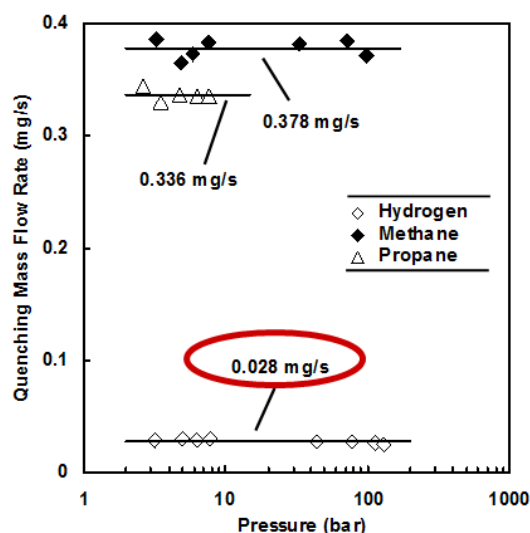
Tyto studie ukázaly, že meze hmotnostního průtoku pro odfouknutí vodíku jsou vyšší než limity metanu a propanu. Pro danou velikost netěsnosti existuje rozmezí hmotnostních průtoků, kdy je vodík schopen udržet stabilní plamen, ale plamen metanu a propanu by byl za takových podmínek odfouknut [1]. Butler a kol. [14] studovali meze zhášení difuzních mikroplamenů s dominující hybností. Zhášení v tak malém měřítku závisí spíše na hmotnostním průtoku než na průměru trysky. Experimentální údaje stanovily minimální hmotnostní průtok potřebný pro trvalé zapálení na 0,028 mg/s [14]. Pod touto hodnotou difuzní plamen zhasne. Obrázek 2 zobrazuje hmotnostní průtok potřebný k trvalému udržení plamene jako funkci průměru hořáku a tlaku před hořákem za předpokladu přiškráceného průtoku pro tři různá paliva v konkrétním rozsahu tlaků. Tento graf potvrzuje, že zhášení závisí také na tlaku. Každá čára na obrázku 2 začíná u minimálního tlaku proti proudu pro přiškrácený průtok a končí u maximálního tlaku předpokládaného ve vozidlech s vodíkovým pohonem. Tento graf předpovídá, že při daném skladovacím tlaku je vodík náchylný k úniku s plamenem při menších průměrech otvorů než metan nebo propan. Kromě toho se při skladovacím tlaku 69 MPa (690 bar) předpokládá, že plamen dokáže udržet i otvor s průměrem pouhých 0,4 μm [1].



Obrázek 2. Zhášecí průměr v závislosti na absolutním tlaku v horní části proudění [14].

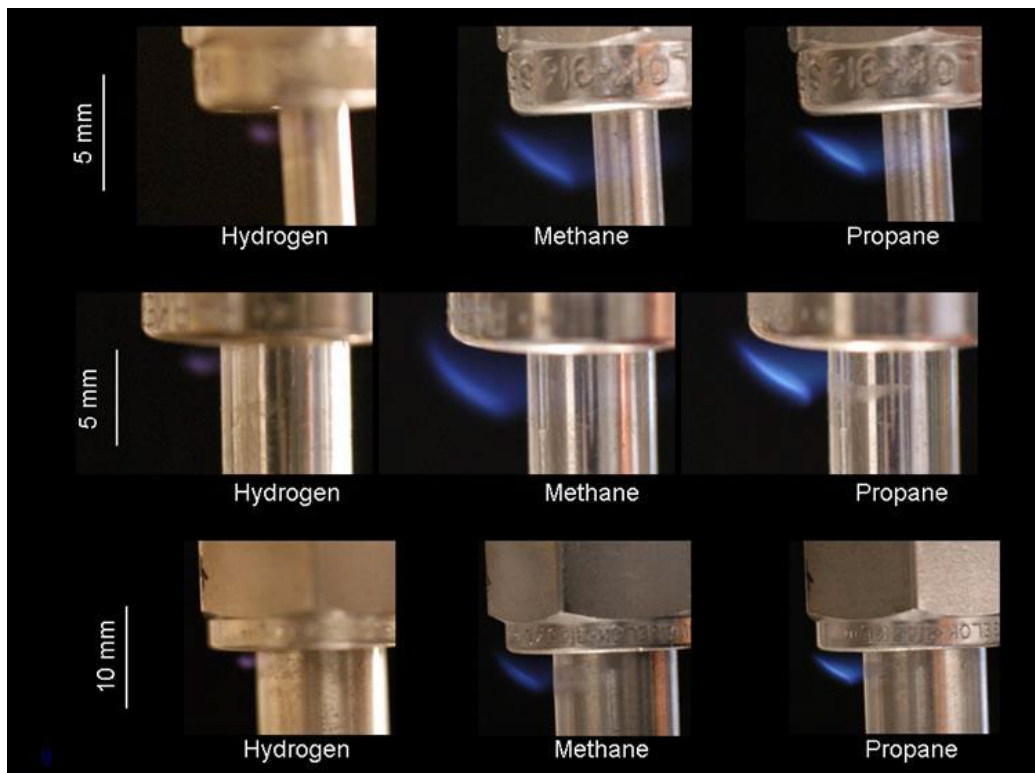
4.1.2 Netěsnost armatur

U plynů skladovaných pod vysokým tlakem se zpravidla používají lisované spoje. Obrázek 3 ukazuje naměřené průtoky hmotnostní vodíku, metanu a propanu u 6mm netěsnosti spoje ve svislé orientaci [14]. Minimální průtok nutný pro trvalé zapálení je vyneseno v závislosti na tlaku. U všech tří paliv jsou limity nezávislé na tlaku a vodík má nejnižší hodnoty meze zhášení. Přestože vodík má nejnižší hmotnostní průtok potřebný k udržení mikroplamenů z armatur, propan má nejnižší objemový průtok potřebný k udržení mikroplamenů z armatur [3]. Další podrobnosti o netěsnosti armatur naleznete v dokumentu [1].



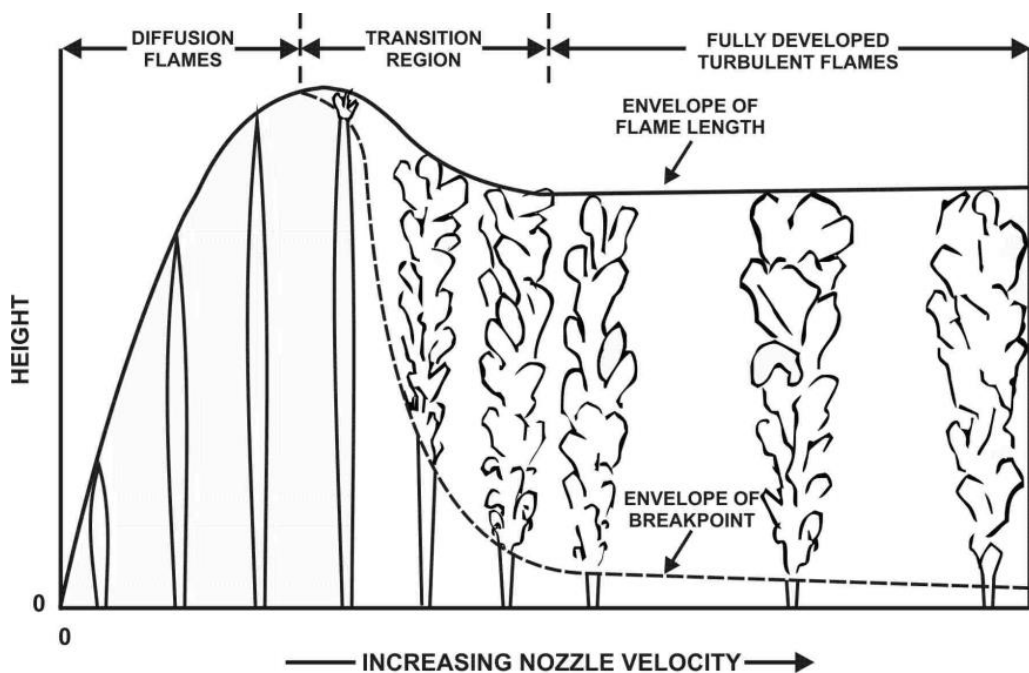
Obrázek 3. Mezní hodnoty zhášení (hmotnostní průtoky) v závislosti na tlaku v horní části proudění při vertikální orientaci armatur [14].

Obrázek 4 ukazuje snímky plamenů z netěsných armatur při zhášecích mezích vodíku, metanu a propanu [15]. Horní, prostřední a dolní sada obsahují potrubí s průměrem 3, 6 a 12 mm. Každé palivo proudilo minimálním průtokem potřebným k udržení plamene.



Obrázek 4. Snímky plamenů na zhášecí mezi vodíku, metanu a propanu [15].

4.2 Tryskové požáry vodíku, délka plamene a nebezpečné vzdálenosti



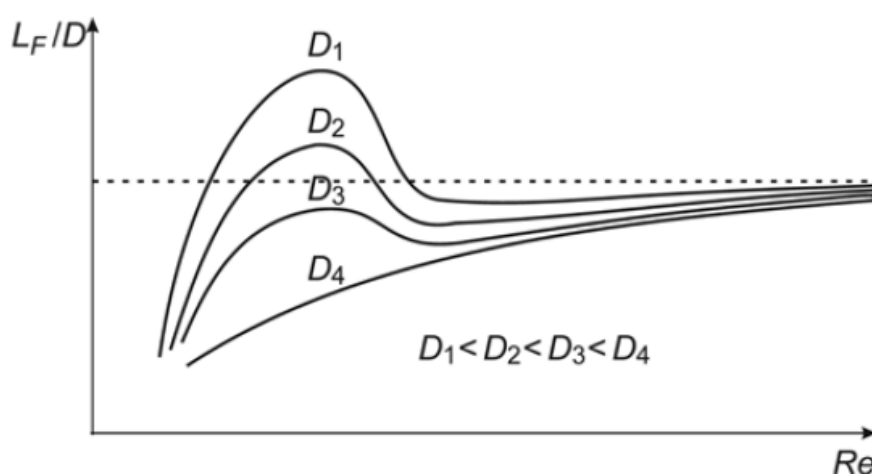
Obrázek 5. Přechod z laminární difúze k plně rozvinutému, turbulentnímu nepremixovanému plameni [17].

Hottel a Hawthorne a kol. [16, 17] ve své zásadní studii o roztržitých vodíkových plamenech dospěli k závěru, že délka plamene (L_F) je úměrná pouze průměru trysky (D). Bylo zjištěno, že průtok plynného paliva nemá žádný vliv na délku plamene, pokud je dostatečně vysoký, aby se vytvořil plně rozvinutý turbulentní plamen (obrázek 5).

Obrázek 5 ukazuje změnu výšky plamene s růstem rychlosti v trysce při přechodu z laminárního difuzního do plně rozvinutého turbulentního nepremixovaného plamene, jak ji pozorovali Hawthorne a kol. [16]. Na počátku vede u laminárních plamenů zvýšení rychlosti trysky k prodloužení délky plamene. Pak při určité rychlosti dosáhne laminární výška plamene maxima a začne klesat, protože plamen se stane turbulentním nejprve na svém hrotu. Co se týče uvolňování vodíku do klidného vzduchu, přechod od vertikálního laminárního difuzního plamene k turbulentnímu plameni začíná při Reynoldsově číslu přibližně $Re=2\,000$.

Není zřejmé, zda lze závěr Hawthorne a kol. [16] o požárech s roztržitým proudem týkající se nezávislosti délky plamene na rychlosti trysky u turbulentního proudění rozšířit na požáry s nedostatečně roztržitým proudem. Například je známo, že turbulence a fluktuace rychlostí v ose nedostatečně roztrženého proudu za Machovým diskem jsou v porovnání s podzvukovými proudy poměrně silné [1]. Tato vysoká úroveň turbulence v nedostatečně roztržitých prouděch byla nedávno potvrzena použitím techniky simulace velkých vírů (LES), kterou provedli Brennan a kol. [18] při zpracování experimentálních dat o rozsáhlých tryskových vodíkových požárech v laboratořích Sandia National Laboratories.

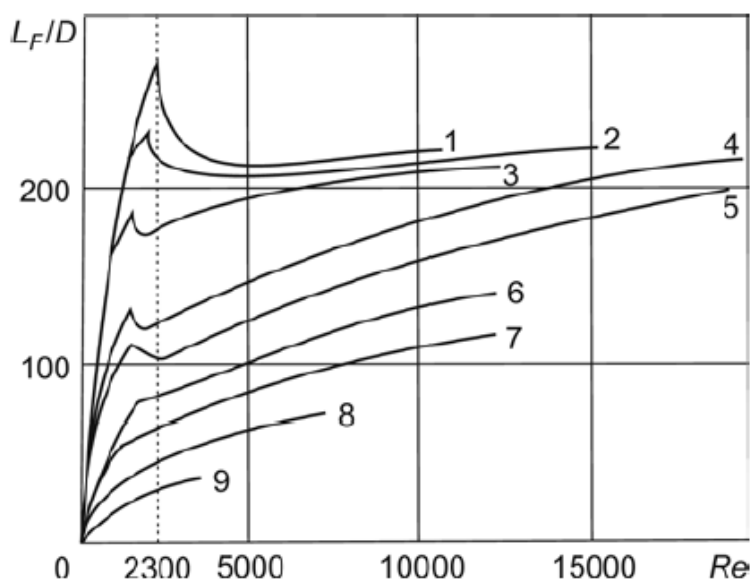
Baev a Yasakov [19] prokázali teoreticky, že v závislosti na průměru hořáku D se ve funkci $L_F/D = f(Re)$, o které se zmiňují Hottel a Hawthorne [17], vyskytne charakteristický pík, případně se u trysek větších průměrů žádný pík nevyskytne (obrázek 6).



Obrázek 6. Teoretický poměr délky a průměru plamene (L_F/D) v závislosti na Reynoldsově číslu (Re) pro různé průměry trysky D . Přerušovaná vodorovná čára odpovídá mezní délce turbulentního plamene L_t [19].

Tyto teoretické předpovědi byly potvrzeny experimenty Ševjakova a Komova [20], které jsou uvedeny na obrázku 7. Experimentální závislost L_F/D na Re až do $Re=20\,000$ je uvedena pro devět trubkových hořáků z nerezové oceli o průměru 1,45–51,7 mm. Poměr délky hořáku k jeho průměru se měnil od 50 u hořáků s menším průměrem po 10 u největšího hořáku. Vizuální délka podzvukových plamenů byla měřena v zatemněné místnosti. Při zpracování údajů Ševjakova a Komova [20] v našich studiích byla předpokládána hustota vodíku $0,0899\text{ kg/m}^3$ a teplota 273 K na výstupu z trysky.

Experimentální závislost L_F/D na Re u hořáků s menším průměrem (pod 6 mm) má charakteristický pík, který teoreticky předpověděli Baev a Yasakov [19]. Výška tohoto píku se snižuje s rostoucím průměrem hořáku v oblasti přechodu z laminárního do turbulentního proudění ($Re < 2\,300$). Poté L_F/D opět roste s Re a při vysokých hodnotách Reynoldsova čísla se blíží hranici $L_F/D = 220\text{--}230$. Tato experimentální data jsou nad hranicí turbulentního tryskového plamene $L_F/D=190$, kterou naměřili Baev a Yasakov [19]. Je třeba poznamenat, že při stejném Reynoldsově čísle se L_F/D s rostoucím průměrem snižuje.

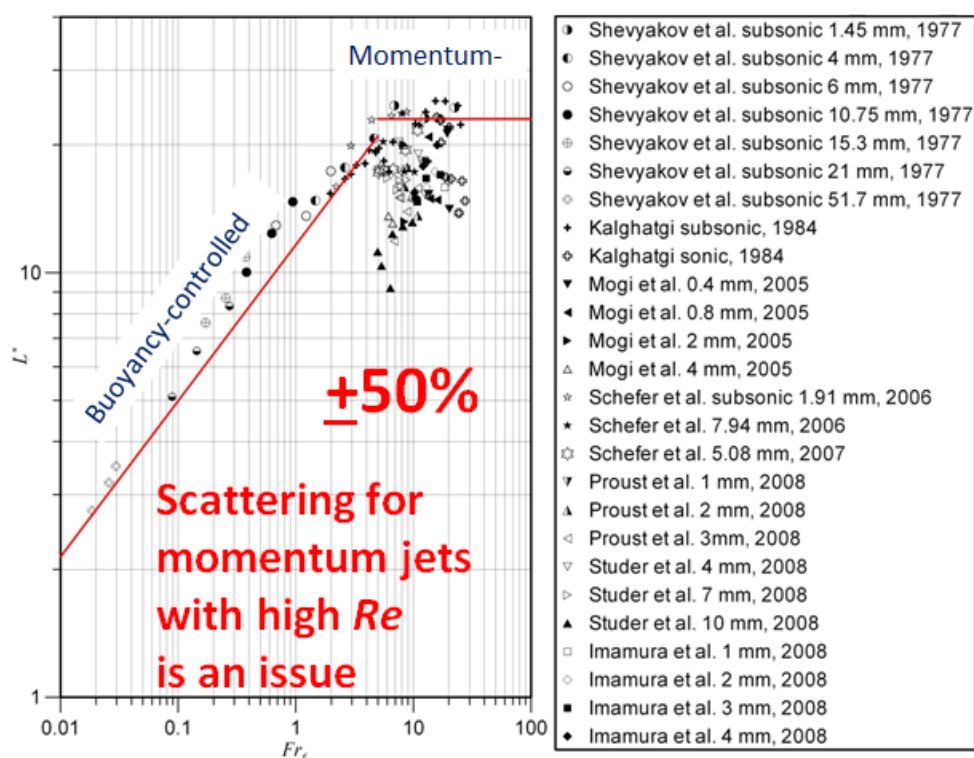


Obrázek 7. Experimentální poměr délky a průměru plamene (L_F/D) v závislosti na Reynoldsově čísle (Re) pro různé průměry trysek D v milimetrech: 1–1,45; 2–1,9; 3–2,9; 4–4,0; 5–6,0; 6–10,75; 7–15,5; 8–21; 9–51,7 [20].

Až donedávna se všechny studie vodíkových plamenů omezovaly na roztříštěné tryskové plameny nebo plameny s vysokým Reynoldsovým číslem, aby bylo možné vyvodit závěr o funkční závislosti délky tryskového plamene při Reynoldsových číslech charakteristických pro uvolňování při tlacích do 100 MPa. Zatímco studie Baeva s Yasakovem [19] a Shevyakova s Komovem [20] odpověděly na otázku existence píku délky plamene při přechodu z laminárního do turbulentního plamene, otázka stabilizace nebo dalšího růstu bezrozměrné délky plamene L_F/D s Reynoldsovým číslem dosud nebyla zodpovězena [21]. Chronologický a podrobný přehled výzkumu vodíkového tryskového plamene lze nalézt v Molkovovi [1].

Kalghatgi [22] publikoval experimentální údaje z více než 70 testů s průměry trysek v rozmezí 1,08–10,1 mm, a to jak s podzvukovými, tak se zvukovými vodíkovými tryskovými plameny. Z tohoto výzkumu lze vyvodit dva důležité závěry. Závěry platí pro podzvukové i zvukové proudění: 1) délka plamene roste při pevném průměru potrubí D (D -konstanta) společně s hmotnostním průtokem a 2) délka plamene roste při pevném hmotnostním průtoku $\dot{m}$ ($\dot{m}$ -konstanta) s průměrem. Tyto závěry zpochybňují obecnost tvrzení Hawthorna a kol. [16], které bylo učiněno pouze na základě analýzy roztržitých podzvukových proudění, a to že délka tryskového plamene je úměrná pouze průměru trysky a průtok vodíku není směrodatný.

Bezrozměrné korelace délky plamene navrhované různými autory jsou založeny pouze na použití Froudova čísla (Fr) v té či oné podobě. Nedávno byly korelace založené na Fr rozšířeny na vysokotlaké tryskové požáry (nedostatečně roztržitá proudění). Obecnou myšlenkou této techniky je korelace experimentálních dat s modifikovaným Fr číslem, které je postaveno na tzv. *fiktivním nebo účinném průměru trysky* namísto skutečného průměru trysky. Velikost fiktivního průměru trysky a rychlost ve fiktivní trysce však závisí na použité teorii včetně několika zjednodušujících předpokladů. Aby bylo možné do bezrozměrné korelace zahrnout požáry nedostatečně roztržitých proudů, nahradili Schefer a kol. [23] skutečný průměr trysky účinným (fiktivním) průměrem trysky. V následné studii Schefera a kol. [24] byl účinný průměr přijat ve tvaru $D_{eff} = D(\rho N U_N / \rho_{eff} U_{eff})^{0.5}$ (kde „ N “ označuje parametry výstupu ze skutečné trysky a „ eff “ parametr účinné (fiktivní) trysky), a je zde přijat pro sestavení korelace uvedené na obrázku 8.



Obrázek 8. Korelace délky plamene na základě Fr , kterou použili Schefer a kol. [24], s rozšířeným rozsahem experimentálních dat o požárech nedostatečně roztržitých proudění.

Obrázek 8 ukazuje, že údaje o délce plamene jsou nepříjemně rozptýlené v oblasti korelace s prouděním s dominující hybností a velkými Froudeovými čísly, která jsou typická pro úniky z vysokotlakých vodíkových zařízení. Je zřejmé, že zjednodušení korelací délky plamene pouze na funkční závislost na Froudeově čísle, tj. s ignorováním teoreticky predikované a experimentálně pozorované závislosti na Reynoldsově a Machově čísle, neumožňuje jejich dobré fungování při zahrnutí nedostatečně roztržštěných proudění [1].

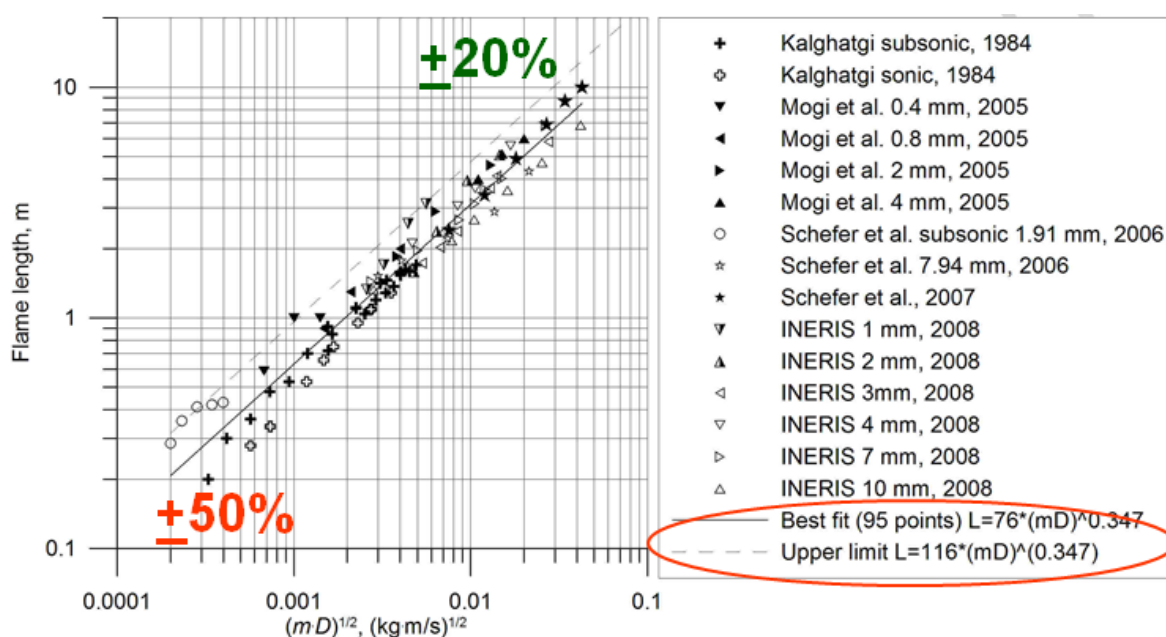
4.2.1 Rozměrová korelace

Obrázek 9 ukazuje, že použití nové skupiny podobnosti $(\dot{m} \cdot D)^{1/2}$ podstatně zlepšilo konvergenci údajů o délce plamene dle Kalghatgiho [22] a údajů publikovaných jinými výzkumníky u podzvukových i zvukových proudění. Obrázek 9 shrnuje v souřadnicích Délka plamene L_F v m versus $(\dot{m} \cdot D)^{1/2}$ v $(\text{kg} \cdot \text{m/s})^{1/2}$ devadesát pět experimentálních údajů o délce vodíkového tryskového plamene v širokém rozsahu tlaků do 90 MPa a průměrů trysek 0,4–10,1 mm [1].

Experimentální data získaná různými výzkumnými skupinami jsou shrnuta do jediné křivky, přičemž nejlépe odpovídající přímka na obrázku 9 je popsána následující rozměrovou rovnicí:

$$L_F = 76 \cdot (\dot{m} \cdot D)^{0.347} \quad (1)$$

kde D je skutečný průměr trysky m ; a $\dot{m}$ je hmotnostní průtok v kg/s . Tato rovnice vyžaduje pouze znalost skutečného průměru netěsnosti a hmotnostního průtoku. Hmotnostní průtok lze vypočítat pomocí libovolné validované teorie nedostatečně roztržštěného proudu. Výhodou této metodiky je, že nevyžaduje nahrazení skutečného průměru trysky pomyslným průměrem trysky. Tím je vyloučena dodatečná nejistota při určování parametrů na výstupu z fiktivní trysky, která souvisí s konkrétními předpoklady použité teorie nedostatečně roztržštěného proudu. Korelace je ověřena na plamenech v podzvukových, zvukových a nadzvukových vodíkových proudění [1].



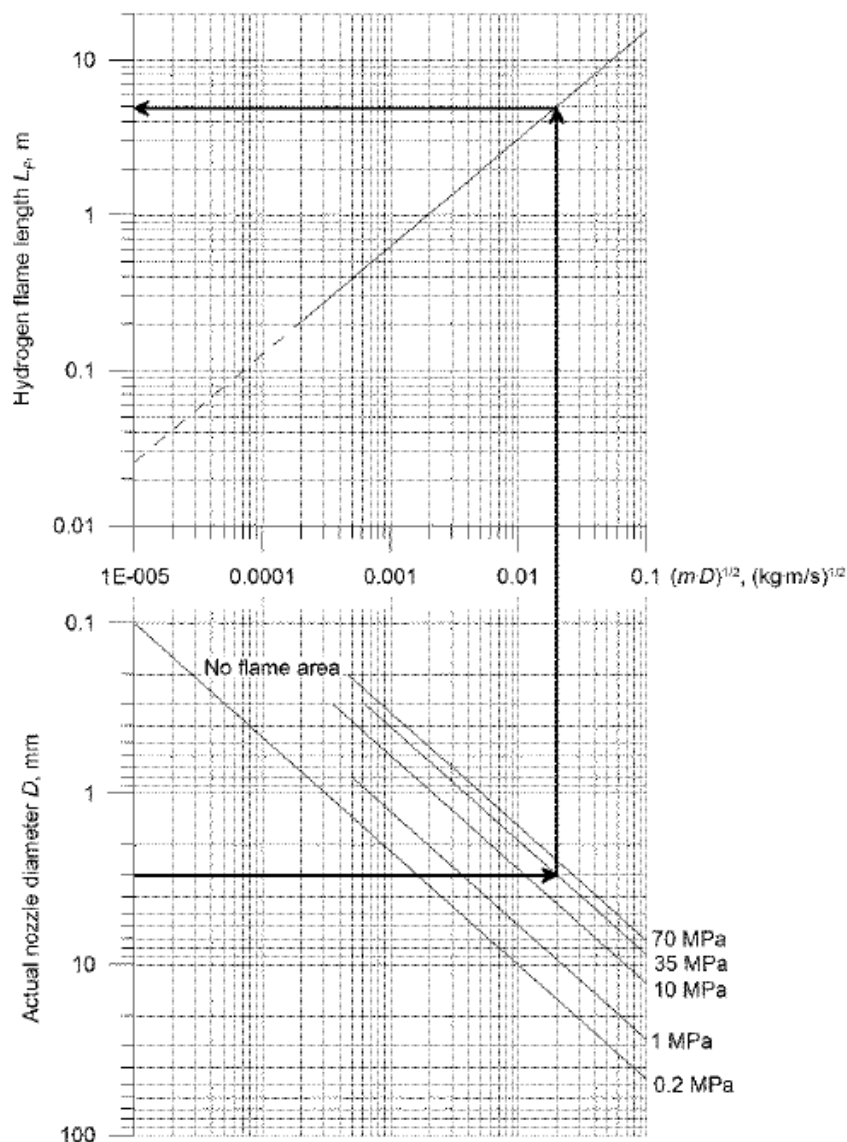
Obrázek 9. Rozměrová korelace délky vodíkového tryskového plamene [1].

Křivka horní meze pro experimentální délky plamenů na obrázku 9 (konzervativní odhad) je vyjádřena následující rovnicí:

$$L_F = 116 \cdot (\dot{m} \cdot D)^{0.347} \quad (2)$$

Ta poskytuje o 50 % větší délku plamene v porovnání s přímkou ideálního stavu, kterou popisuje rovnice (1). Hmotnostní průtok je z definice $\dot{m} \propto D^2$, a proto korelace (1) a (2) dávají prakticky lineární závislost délky plamene na průměru trysky, $L_F \sim D$. Naproti tomu korelace ukazuje slabší závislost délky plamene na hustotě a rychlosti v trysce, $L_F \sim (\rho_N \cdot U_N)^{1/3}$.

Predikční schopnost rozměrové korelace na obrázku 9 je poměrně dobrá pro tryskové požáry s vysokým průtokem paliva (20 %), a přesto je pouze asi 50 % pro menší požáry, kde charakteristický vrchol v závislosti $L_F/D = f(Re)$ pro malé průměry je jedním z možných důvodů většího rozptylu experimentálních dat. Ačkoli je korelace vhodným a spolehlivým nástrojem pro technology vodíkové bezpečnosti při únicích s velkým hmotnostním průtokem, nevrhá světlo na fyziku, která je základem korelace, a při menších únicích má pouze velmi omezenou vypovídací schopnost [1].



Obrázek 10. Nomogram délky vodíkového tryskového plamene [1].

Obrázek 10 představuje nomogram navržený pro zjednodušení použití rozměrové korelace (1). Grafický odhad délky tryskového plamene pomocí nomogramu vyžaduje pouze dva parametry úniku, např. tlak v zásobníku a skutečný průměr úniku, které jsou obvykle k dispozici a nevyžadují žádné výpočty [1].

Nomogram na obrázku 10 je odvozen od přímky ideálního stavu rozměrové korelace délky plamene uvedené na obrázku 9. Upozorňujeme, že konzervativní odhad délky plamene je o 50 % delší, a proto je třeba hodnotu získanou z tohoto nomogramu vynásobit koeficientem 1,5. Použití nomogramu pro výpočet délky plamene je znázorněno na obrázku 10 tlustými čarami se šipkami. Nejprve se zvolí skutečný průměr netěsnosti, v tomto příkladu např. $D=3$ mm, a skladovací tlak, např. 35 MPa. Za druhé se z osy průměru v bodě 3 mm vede vodorovná přímka doprava, dokud se neprotne s tlakovou přímkou označenou jako 35 MPa. Zatřetí se od průsečíku směrem nahoru až k druhému průsečíku s jedinou dostupnou přímkou v souřadnicích

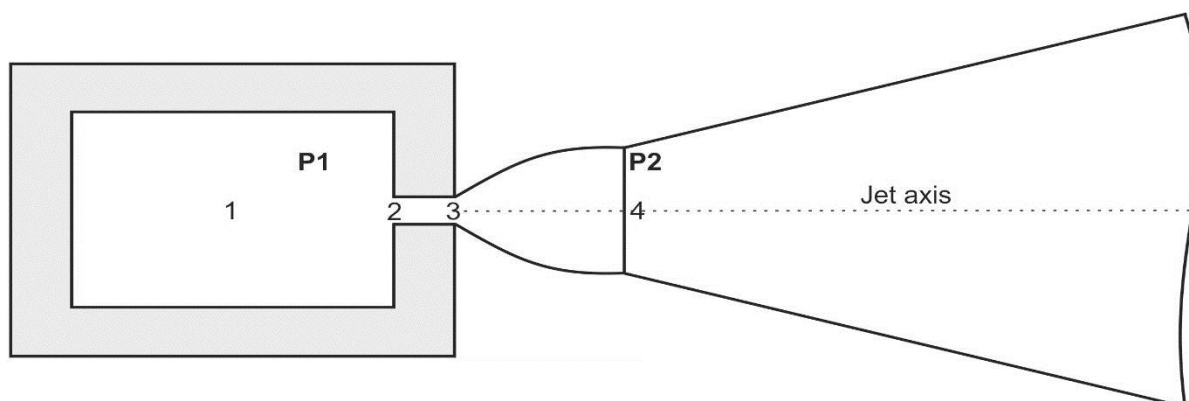


$(L_F - (\dot{m} \cdot D)^{1/2})$. Nakonec se pro získání délky plamene vynese vodorovná čára od druhého průsečíku doleva až do konečného průsečíku s osou označenou „Hydrogen flame length L_F , m“ (Délka vodíkového plamene). V uvažovaném příkladu bude únik vodíku s tlakem 35 MPa otvorem o průměru 3 mm mít za následek délku plamene 5 m. Konzervativní odhad délky plamene, jak je uvedeno výše, je o 50 % větší, tj. 7,5 m [1].

Zvláštností tohoto nomogramu je oblast „No flame“ (Bez plamene), která je pozorována u průměrů trysek 0,1–0,2 mm, kdy byl plamen odfouknut, ačkoli tlak výronu vodíku činil až 40 MPa. Je třeba poznamenat, že nomogram nezohledňuje podmínky, za kterých dochází ke ztrátám průtoku v dráze úniku a které nelze ignorovat. V takových případech dává přímé použití nomogramu konzervativní výsledek. Přesnější předpověď délky plamene v zařízeních s esenciálním třením a malými ztrátami lze získat za předpokladu, je-li k dispozici metoda umožňující výpočet hustoty na výstupu z trysky ovlivněné ztrátami. Nomogram lze použít pro rychlý odhad délky vodíkového tryskového plamene. Pro přesnější výpočet délky plamene se však doporučuje použít novou bezrozměrnou korelaci plamene.

Většina dříve popsáných a Molkovem [1] recenzovaných studií vodíkových tryskových požárů byla provedena s prodlouženými tryskami, s výjimkou nedávných studií, jejichž cílem bylo podpořit bezpečné zavedení vodíku coby nového nosiče energie. Většina úniků z vysokotlakého vodíkového zařízení bude mít podobu nedostatečně roztržitého proudu (tj. proudu, jehož tlak je na výstupu z trysky vyšší než atmosférický tlak). To znamená, že pro přesnou předpověď parametrů úniků vodíku při skladovacím tlaku vyšším než 10 MPa je třeba vzít v úvahu neideální chování vodíku.

Jak již bylo zmíněno, dřívější model fiktivní trysky vyvinuli Schefer a kol. [24]. Molkov a Saffers [25] použili alternativní teorii nedostatečně roztržitého proudu, jejíž koncepční schéma je znázorněno na obrázku 11. Parametry s dolním indexem 1 odpovídají vysokotlakému skladování, kde se předpokládá nulová rychlost proudění. Parametry průtoku na vstupu do kanálu úniku (tj. vstupu do trysky) jsou označeny dolním indexem 2 a na výstupu z trysky dolním indexem 3. Předpokládá se, že proudění je na výstupu z trysky/kanálu přiškrcené, a proto je výstupní rychlost rovna rychlosti zvuku. Výstup z fiktivní trysky, kde parametry odpovídají plně roztržitému proudu (tlak je roven okolnímu), je označen dolním indexem 4. Předpokládá se, že ve fiktivní trysce je rychlost proudění rovnoměrná a lokálně zvuková. Předpokládá se také, že nedochází k žádnému vnikání vzduchu do proudu přes hranici fiktivní trysky (mezi 3 a 4) [25].



Obrázek 11. Schéma nedostatečně roztržštěného proudu [1].

- 1 – Vysokotlaká nádoba
- 2 – Vstup do trysky
- 3 – Výstup z trysky (= vstup do fiktivní trysky)
- 4 – Výstup z fiktivní (efektivní) trysky (3–4: bez unášení).

Tlaky jsou následující:

P1 – Skladovací tlak

P2 – Atmosférický tlak (po roztržštění proudu).

V některých případech nelze přehlédnout důležité menší a třecí ztráty v dráze proudění 2–3, např. případě velmi úzké trhliny.

4.2.2 Bezrozměrná korelace

Prakticky všechny dřívější korelace délky plamene vycházejí z Fr a jsou založeny na experimentálních datech pro požáry podzvukovým vztlakovým proudem/tryskáním s omezeným počtem tryskových požárů s dominující hybností při nižším tlaku. „Korelace“ založená na Fr postrádá fyzikální obecnost, pokud se zahrne velké množství experimentálních dat o nedostatečně roztržštěných tryskových požárech (všechny v režimu s dominující hybností) [1].

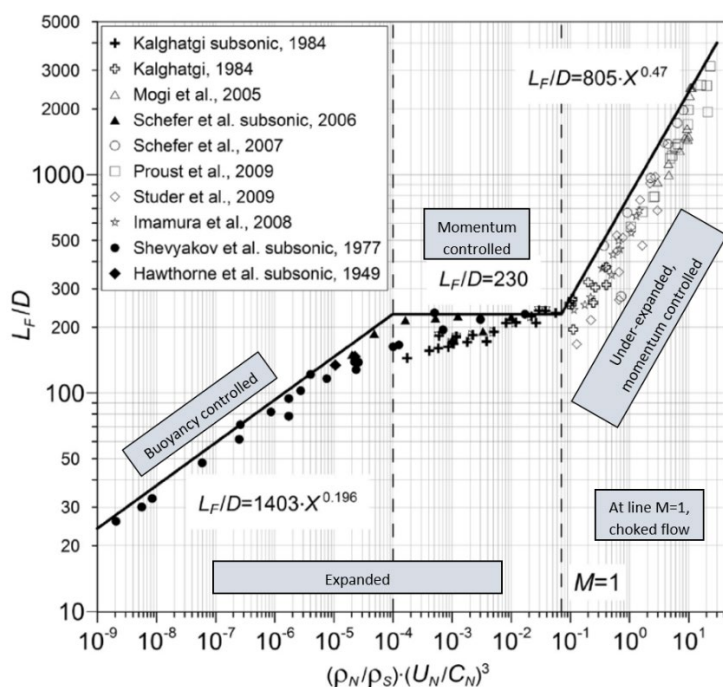
Teoretické a experimentální výsledky ukazují, že délka plamene musí být funkcí nejen Froudeho čísla (Fr), ale také Reynoldsova (Re) a Machova čísla (M) [1]. Rozměrové korelace podobné těm, které jsou znázorněny na obrázku 9, představují vhodný technologický nástroj, avšak nerozlišují mezi různými režimy tryskových požárů. Cílem této části přednášky je prohloubit znalosti o chování vodíkového tryskového plamene. Níže se budeme zabývat bezrozměrnou korelací pro nepremixované plameny, která umožní rozlišit mezi tradičními tryskovými plameny s dominujícím vztlakem a s dominující hybností, jakož i mezi roztržštěnými a nedostatečně roztržštěnými tryskovými plameny.

Rozměrovou korelaci (1) lze aproximovat jako $L_F \propto (\dot{m} \cdot D)^{1/3}$. Hmotnostní průtok je podle definice $\dot{m} \propto D^2$. Po dosazení $\dot{m} \propto D^2$ do výše uvedeného vztahu pro L_F lze tedy dojít k závěru, že bezrozměrná délka plamene L_F/D nezávisí explicitně na průměru D . To je základní hypotéza,

na jejímž základě byla vyvinuta nová bezrozměrná korelace pro délku tryskového plamene, která je podpořena analýzou experimentálních dat. Jediná závislost bezrozměrné délky plamene, L_F/D , je pak na „zbytkových“ parametrech hmotnostního průtoku (tj. hustotě ρ_N a rychlosti U_N na výstupu z trysky), které jsou pro jednoduchost považovány za rovnoměrné [25].

Hustotu a rychlost lze normalizovat jako ρ_N/ρ_S a U_N/C_N , kde C_N je rychlost zvuku za podmínek plynu v trysce a ρ_S je hustota okolního plynu (vzduchu). Za předpokladu, že tok kinetické energie na výstupu z trysky je zachovaným skalárem procesu, lze navrhnout vztah mezi hustotou a rychlostí v rozměrové skupině takto: $(\rho_N/\rho_S)(U_N/C_N)^3$.

Obrázek 12 představuje novou bezrozměrnou korelaci délky vodíkového plamene. V této korelaci jsou experimentální údaje o délce plamene normalizovány podle skutečného (nikoli fiktivního) průměru trysky a jsou korelovány se součinem bezrozměrného poměru hustoty ρ_N/ρ_S a Machova čísla (poměr rychlosti proudění k rychlosti zvuku na skutečném výstupu z trysky) na třetí $M^3 = (U_N/C_N)^3$.



Obrázek 12. Bezrozměrná korelace pro vodíkové tryskové plameny (ve vzorcích „X“ označuje skupinu podobnosti $(\rho_N/\rho_S) \cdot (U_N/C_N)^3$).

Jednou z výhod této korelace je absence parametrů na pomyslném výstupu z trysky. 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 z trysky. Nejistota při výpočtu parametrů proudění na výstupu ze skutečné trysky je menší než nejistota na fiktivní trysce. Je známo, že za Machovým diskem dochází k výrazné nerovnoměrnosti rychlosti, která se odchyluje od předpokladu rovnoměrné rychlosti na výstupu z fiktivní trysky, který je společný pro všechny teorie nedostatečně roztržštěných



proudů. Vyvinutá metodika díky tomu vylučuje z úvahy spornou otázku použití parametrů proudění na pomyslném výstupu z trysky [1].

Korelace pokrývá celé spektrum úniků reagujících s vodíkem, včetně laminárních a turbulentních plamenů, požárů s dominujícím vztlakem i s dominující hybností, roztržštěných (podzvukových a zvukových) i nedostatečně roztržštěných (zvukových a nadzvukových) tryskových plamenů v rozsahu tlaků zdroje úniku od 0,1 do 90 MPa a průměrů úniku od 0,4 do 51,7 mm.

Bezrozměrnou skupinu odvozenou pro korelaci bezrozměrné délky plamene lze přepsat v podobě čísel Re a Fr takto:

$$\frac{\rho_N}{\rho_S} \left(\frac{U_N}{C_S} \right)^3 = \frac{g}{\rho_S} \frac{\mu_N}{C_N^3} \cdot Re \cdot Fr \quad (3)$$

kde viskozita byla vypočtena jako $\mu_N = \mu_{293} \cdot [(293 + K_{Suth}) / (T_N + K_{Suth})] \cdot (T_N / 293)^{3/2}$ (Sutherlandova konstanta pro vodík byla vzata jako $K_{Suth} = 72$ K a dynamická viskozita jako $\mu_{293} = 8,76 \times 10^{-6}$ Pa·s), a Re a Fr jsou určeny parametry proudění vodíku na skutečném výstupu z trysky z následujících rovnic:

$$Re = \frac{\rho_N \cdot d_N \cdot U_N}{\mu_N} \quad (4)$$

$$Fr = \frac{U_N^2}{d_N \cdot g} \quad (5)$$

Z tvaru bezrozměrné skupiny na levé straně rovnice (3) vyplývá, že pro podzvukové proudění, kdy Machovo číslo $M < 1$ a poměr hustoty ρ_N / ρ_S je pro roztržštěné proudy konstantní (za předpokladu konstantní teploty v trysce), závisí bezrozměrná délka plamene pouze na Machově čísle trysky. Pro přiskrcené proudění na výstupu z trysky ($M=1$) závisí bezrozměrná délka plamene pouze na hustotě vodíku na výstupu z trysky ρ_N . Hustota se zvyšuje s rostoucím skladovacím tlakem a klesající teplotou vodíku.

Z tvaru pravé strany rovnice (3) vyplývá, že při konstantní teplotě vodíku na výstupu z trysky (která zajišťuje stálost rychlosti zvuku C_N) závisí bezrozměrná délka plamene na číslech Fr i Re . To je v rozporu s dřívějšími korelacemi postavenými pouze na čísle Fr .

V nové bezrozměrné korelaci na obrázku 12 jsou tři odlišné části (zleva doprava): tradiční s dominujícím vztlakem, tradiční „plošina“ s dominující hybností (roztržštěné proudy) a nový „sklon“ požáru s nedostatečně roztržštěným proudem a s dominancí momentu hybnosti. Tyto tři části lze aproximovat následujícími rovnicemi (konzervativními křivkami):

$$L_F/D = 1403 \cdot X^{0.196}, \text{ pro } X = \frac{\rho_N}{\rho_S} \left(\frac{U_N}{C_N} \right)^3 < 0.0001 \quad (6a)$$

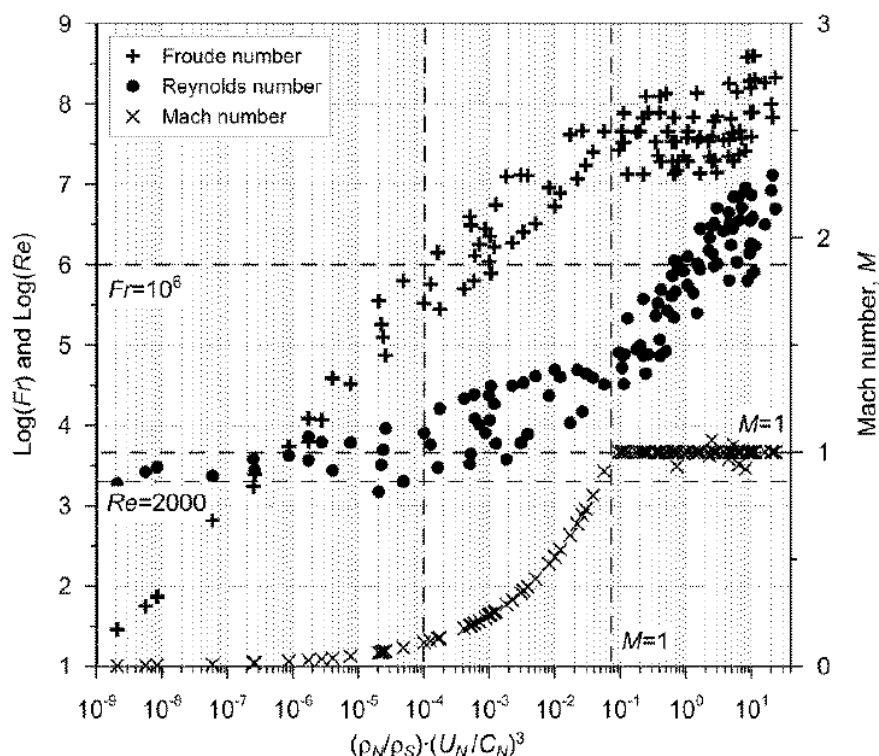
$$L_F/D = 230, \text{ pro } 0.0001 < X = \frac{\rho_N}{\rho_S} \left(\frac{U_N}{C_N} \right)^3 < 0.07 \quad (6b)$$

$$L_F/D = 805 \cdot X^{0.47}, \text{ pro } X = \frac{\rho_N}{\rho_S} \left(\frac{U_N}{C_N} \right)^3 > 0.07 \quad (6c)$$

U požárů s roztržštěným proudem dochází k nasycení L_F/D , protože rychlost proudění na skutečném výstupu z trysky se blíží rychlosti zvuku. Hodnota této meze nasycení $L_F/D=230$ reprodukuje výsledky řady předchozích studií s roztržštěnými proudy, ovšem v nových souřadnicích. U přiškrcených neroztržštěných tryskových plamenů však nedochází k nasycení bezrozměrné délky plamene. V nedávných experimentech s nedostatečně roztržštěným tryskovým požárem Proust a kol. [26] uvádějí hodnoty až do $L_F/D=3\,000$, které jsou výrazně vyšší ve srovnání s limitem $L_F/D=230$ pro roztržštěné proudy.

Tvar korelace na obrázku 12 má fyzikální význam založený na znalostech chování tryskového plamene. Například bezrozměrná délka plamene L_F/D roste u laminárních a přechodových plamenů (obvykle identifikovaných jako režim „s dominujícím vztlakem“, nízké Re), pak je prakticky konstantní u přechodových a plně rozvinutých roztržštěných plamenů (tradičně označovaných jako režim „s dominující hybností“, středně vysoké Re) a opět roste u nedostatečně roztržštěných proudů (režim nedostatečně roztržštěných proudů s dominující hybností, vysoké Re). Růst bezrozměrné délky plamene v režimu nedostatečně roztržštěného proudu je způsoben tím, že bezrozměrná délka plamene je definována prostřednictvím skutečného průměru výstupu z trysky, který je konstantní, zatímco ve skutečnosti nedostatečně roztržštěný proud expanduje na atmosférický tlak na pomyslném výstupu z trysky, délka plamene roste společně s rostoucí hustotou v trysce [1].

Obrázek 13 ukazuje změny bezrozměrných čísel Re , Fr , M pro experimenty použité k vývoji bezrozměrné korelace v závislosti na skupině podobnosti $(\rho_N/\rho_S)(U_N/C_N)^3$. Analýza funkční závislosti Re , Fr , M na skupině podobnosti ukazuje, že u nedostatečně roztržštěných proudů závisí bezrozměrný růst délky plamene prakticky pouze na hodnotě Re . Proudění tryskou je totiž u nedostatečně roztržštěných proudů přiškrcené (tj. lokální $M=1$) a číslo Fr trysky je také prakticky konstantní (rozptyl Fr je způsoben rozdílem průměrů trysek přibližně o jeden řád).



Obrázek 13. Bezrozměrná čísla Re , Fr , M jako funkce skupiny podobnosti $(\rho_N/\rho_S)(U_N/C_N)^3$ v experimentech použitých k vytvoření bezrozměrné korelace.

Na obrázku 13 je pět čárkovaných čar. Čára $Re=2\,000$ označuje počátek přechodu od laminárního k turbulentnímu proudění v trysce. V blízkosti této čáry (nebo bezprostředně nad ní) se nacházejí experimentální body představující laminární tryskové plameny a tryskové plameny v přechodovém režimu. Vodorovná čára $M=1$ označuje mez škrceného průtoku. Podzvukové roztržštěné trysky mají $M<1$, zatímco zvukové a nadzvukové (poslední je relevantní pouze pro proudění ve fiktivních tryskách), nedostatečně roztržštěné trysky mají na výstupu z trysky $M=1$. V okolí $M=1$ dochází k určitému rozptylu dat v důsledku chyb měření a zpracování dat. Vodorovná čára $Fr=10^6$ je přibližné rozdělení mezi prouděním s dominujícím vztlakem ($Fr<10^6$) a prouděním s dominující hybností ($Fr>10^6$), které bylo dříve stanoveno pro roztržštěné trysky. Svislá čára na hodnotě skupiny podobnosti $(\rho_N/\rho_S)(U_N/C_N)^3=10^{-4}$ podmíněně odděluje tryskové požáry s dominujícím vztlakem a tryskové požáry s dominující hybností (vpravo od čáry). A konečně svislá čára označená $M=1$ odděluje podzvukové (vlevo) a zvukové neboli škrcené proudění na výstupu z trysky (vpravo) [1].

V logaritmických souřadnicích na obrázku 13 roste číslo Fr lineárně se skupinou podobnosti $(\rho_N/\rho_S)(U_N/C_N)^3$ u roztržštěných tryskových požárů. V tomto novém systému souřadnic nedochází prakticky k žádné změně Fr u nedostatečně roztržštěných proudů (rozptyl je způsoben především rozdílem ve velikosti trysek). U proudů s dominujícím vztlakem dochází k mírnému růstu čísla Re se skupinou podobnosti, k mírnému růstu v tradiční oblasti s



dominující hybností a k poměrně strmému růstu čísla Re v oblasti nedostatečně roztržštěných tryskových požárů, které jsou všechny s dominující hybností [1].

4.2.3 Stanovení délky plamene

Níže uvedené informace poskytnou návod, jak vyhodnotit délku plamene na základě bezrozměrné korelace. Na obrázku 12 osa Y odpovídá poměru L_F/D , kde L_F (m) je délka plamene, D (m) je průměr trysky, osa X odpovídá $(\rho_N/\rho_S)(U_N/C_N)^3$, kde ρ_N (kg/m³) je hustota vodíku na výstupu z trysky, kterou lze zjistit stejným způsobem jako u zákona podobnosti u nezapálených proudů (viz přednáška 7 – Úniky nezapáleného vodíku ve venkovním prostředí a jejich zmírňování). Pro podzvukové a roztržštěné zvukové proudy se rovná 0,0838 kg/m³ při NTP. Pokud je proud nedostatečně roztržštěný, pak se hustota vypočítá podle *teorie nedostatečně roztržštěného proudu*, kterou vyvinula Ulsterská univerzita. ρ_S je hustota okolí (vzduchu), která se rovná 1,205 kg/m³. C_N je rychlost zvuku ve vodíku na výstupu z trysky, kterou lze vypočítat pomocí rovnice (7):

$$C_N = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}} \quad (7)$$

kde γ je poměr měrných tepel při konstantním tlaku a konstantním objemu, M je molekulová hmotnost a U_N je rychlost vodíku na výstupu z trysky. $U_N = C_N$ pro zvukové a nadzvukové proudy, u podzvukových proudů se rychlost vypočítá jako:

$$U_N = \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (8)$$

4.2.4 Umístění hrotu tryskového plamene

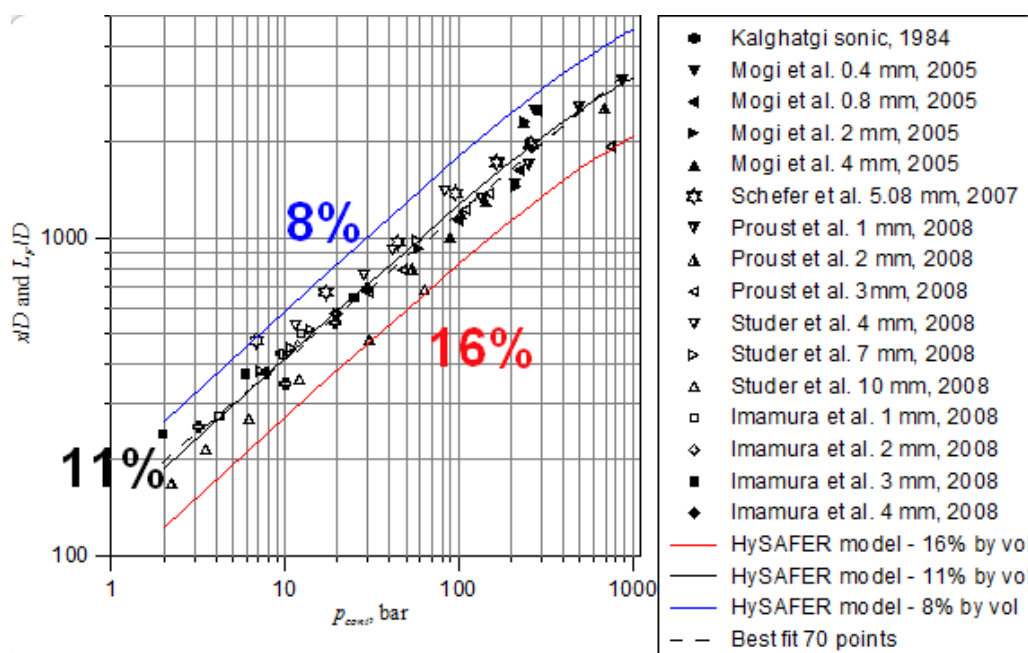
Experimentální data ukázala, že nejdelší, a tedy nejnebezpečnější plameny jsou spojeny s nedostatečně roztržštěným prouděním [1]. Je důležité zdůraznit, že všechna experimentální data o požárech nedostatečně roztržštěných proudění jsou v režimu s dominující hybností (vysoká hodnota Froudeho čísla Fr). To je způsobeno vysokou rychlostí škrceného proudění a relativně malými průměry potrubí u zařízení pracujících při tlaku až 100 MPa. Zákon podobnosti pro axiální rozpad koncentrace v kruhových, nezapálených, roztržštěných a nedostatečně roztržštěných proudech s dominující hybností, o kterém bylo pojednáno v přednášce 7 – Úniky nezapáleného vodíku ve venkovním prostředí a jejich zmírňování, je uveden v rovnici (9):

$$C_{ax}^m = 5.4 \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_S}} \frac{D}{x} \quad (9)$$

kde C_{ax}^m je axiální hmotnostní podíl vodíku v proudění ve vzdálenosti x od trysky, ρ_s je hustota okolního plynu, tj. vzduchu ($1,205 \text{ kg/m}^3$ za NTP), D je skutečný výstupní průměr trysky, ρ_N je hustota vodíku na výstupu z trysky.

Zákon podobnosti umožňuje odvodit funkční závislost $x/D = f(p)$ mezi bezrozměrnou vzdáleností od zdroje úniku x/D a skladovacím tlakem p (který jednoznačně souvisí s hustotou na výstupu z trysky, ρ_N) pro libovolný konkrétní hmotnostní zlomek vodíku na ose trysky, C_{ax} [1].

Na obrázku 14 je znázorněna korelace mezi polohou hrotu plamene vodíkového proudu (tj. délkou plamene) a polohou koncentrace vodíku v nezapáleném proudu pocházejícím ze stejného zdroje netěsnosti a skladovacího tlaku, p . Body na obrázku 14 představují bezrozměrnou experimentální délku plamene, L_F/D . Diagonální křivky v grafu odpovídají bezrozměrné vzdálenosti x/D k místu konkrétní axiální koncentrace vodíku, C_{ax} , v závislosti na hustotě na výstupu z trysky, ρ_N , (přepočtené na skladovací tlak, p v atmosféře, na obrázku 14) a vypočtené pomocí zákona podobnosti (9).

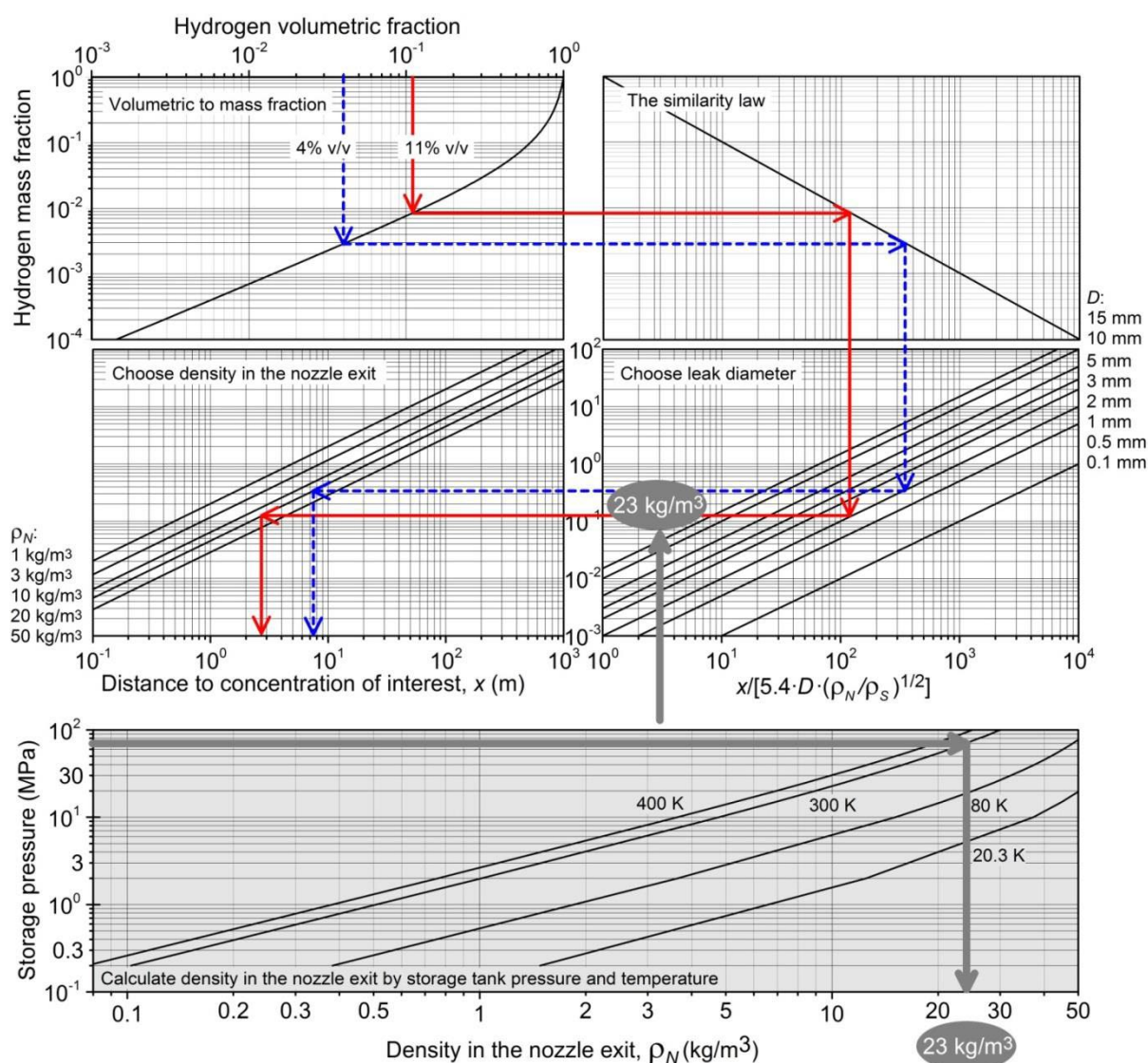


Obrázek 14. Korelace mezi bezrozměrnou délkou plamene, L_F/D , a vzdáleností k určité koncentraci v nereagujícím proudu, x/D , od stejného zdroje úniku při různých hodnotách tlaku v zásobníku, p .

Z obrázku 14 lze vyvodit závěr, že u požárů kruhového proudu s dominující hybností se hrot plamene nachází tam, kde se axiální koncentrace vodíku v nezapáleném proudu ze stejného zdroje úniku pohybuje v rozmezí 8 až 16 % obj. v závislosti na experimentálních podmínkách. Ideální přímka ze 70 experimentálních bodů pro délku vodíkového plamene u požárů s dominující hybností se blíží 11 % obj. vodíku ve vzduchu v nezapáleném proudu. Tyto koncentrace (8 % až 16 %) se nacházejí hluboko pod stechiometrickou koncentrací 29,5 % obj.

vodíku ve vzduchu. Vzdálenosti těchto koncentrací od trysky jsou 2,2krát (16 %) až 4,7krát (8 %) delší než vzdálenost k axiální koncentraci 29,5 % (stechiometrická směs vodíku a vzduchu). To by samozřejmě mohlo mít závažné bezpečnostní a ekonomické důsledky [1].

Nomogram původně vyvinutý pro nezapálené úniky, např. nebezpečná vzdálenost od koncentrace v nezapáleném proudu 4 % obj., lze nyní použít pro grafické vyhodnocení délky plamene (obrázek 15). To je dáno poznatkem, že umístění hrotu plamene se nachází v místě, kde se koncentrace v nezapáleném proudu ze stejného zdroje rozpadá na 8–16 % obj. vodíku, přičemž průměrná délka plamene se nachází v místě, kde se koncentrace nezapáleného úniku rozpadá na 11 % obj. [21].



Obrázek 15. Nomogram pro grafické vyhodnocení délky plamene dle rozpadu koncentrace v nezapáleném proudu ze shodného zdroje do 11 % obj.

Příklad s 11 obj. % vodíku (červené přímky se šipkami na obrázku 15) ukazuje, že průměrná délka plamene při úniku s průměrem 1 mm ze skladovacího tlaku 70 MPa a s teplotou 300 K by dávala délku plamene přibližně 2,7 m [21].

4.2.5 Nebezpečné vzdálenosti od tryskových vodíkových požárů

Znalost délky plamene je důležitá pro posouzení nebezpečí a bezpečných vzdáleností.

Dle návrhu normy ISO TC197 se *nebezpečnou* vzdáleností rozumí 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.

Separační vzdálenost (SD), známá také jako bezpečnostní vzdálenost nebo odstupová vzdálenost, je předmětem mezinárodních diskusí.

Dle definice, kterou uvedl LaChance (2009) je bezpečnou minimální vzdálenost, která odděluje „konkrétní cíle (např. osoby, stavby nebo zařízení) od následků možných havárií souvisejících s provozem vodíkového zařízení“ [27].

Evropské sdružení technických plynů [28] definuje separační vzdálenost jakožto „minimální vzdálenost mezi zdrojem nebezpečí a objektem (člověkem, zařízením nebo prostředím), která zmírní účinek pravděpodobného předvídatelného incidentu a zabrání tomu, aby menší incident přerostl v incident většího rozsahu“.

SD ovlivňují následující faktory:

- povaha nebezpečí,
- provozní podmínky a konstrukce analyzovaného zařízení/objektu,
- typ cíle/objektu (lidé, konstrukce, vybavení),
- prostředí mezi ním a zdrojem nebezpečí. Tímto způsobem lze vyhodnotit potenciál poškození člověka nebo konstrukcí a porovnat jej s kritérii poškození.

Pro výpočet délky vodíkového tryskového plamene byly vyvinuty a popsány různé technické nástroje. Zahrnují rozměrové a bezrozměrové korelace pro délku tryskového plamene a metodiku výpočtu rozpadu axiální koncentrace vodíku na 11 % obj. v nezapáleném proudu pro vyhodnocení umístění hrotu plamene (délky plamene). Otázka separačních vzdáleností od zdroje úniku na základě srovnávací analýzy nebezpečí od nezapáleného proudu a tryskového požáru však dosud není uzavřena [1].

Před výpočtem nebezpečné vzdálenosti je nezbytné vymezit, před čím je třeba chránit. V případě otevřeného požáru by to byly teplota a tepelný tok (v případě požárů v uzavřených prostorách mohou přicházet v úvahu rovněž udušení a přetlak). Obecně se předpokládá, že přímý styk s plamenem v důsledku tryskového požáru má u člověka za následek popáleniny třetího stupně. I osoby, které se nenacházejí přímo v plamenech, mohou být vystaveny silným tokům sálavého tepla.

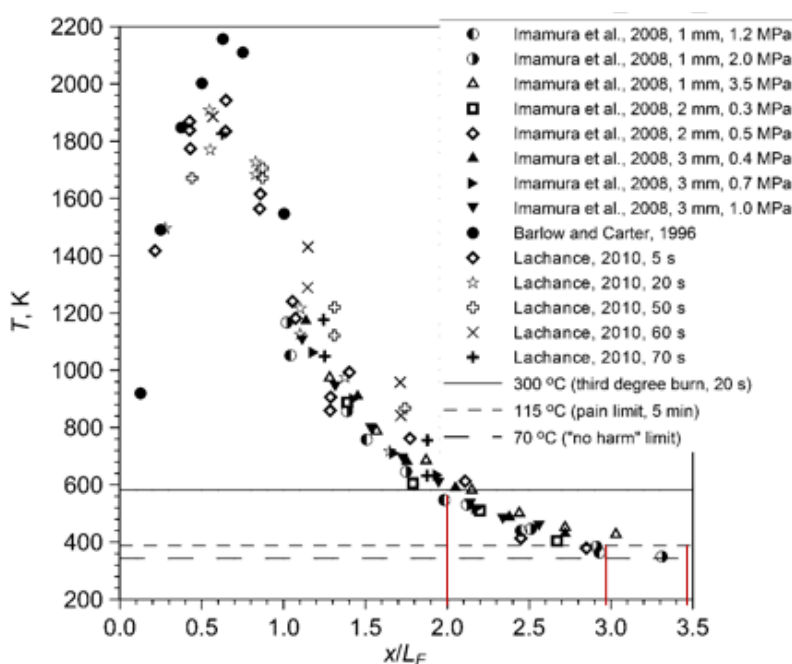
Kritéria újmy pro člověka lze vyjádřit v podobě zranění nebo smrti [27]. Lze použít kritérium „žádné poškození“, které omezuje úroveň přijatelných důsledků na dostatečně nízkou úroveň, aby nedošlo ke zranění. V této studii se za kritérium „žádné poškození“ považuje teplota 70 °C. Působení plamenů, horkého vzduchu nebo sálavého tepla může mít za následek popáleniny prvního, druhého nebo třetího stupně. Výsledná míra poškození zdraví závisí na několika faktorech: na rozsahu a místě postižené pokožky, věku osoby, době expozice, rychlosti a způsobu lékařského ošetření atd. [1].

Britská norma [29] doporučuje 115 °C jako práh bolesti ze zvýšené teploty vzduchu při expozici trvající déle než 5 minut. To je v souladu s dříve publikovanou klasifikací DNV [30] účinků zvýšené teploty na obyvatele: teplota nižší než 70 °C nepředstavuje v uzavřeném prostoru žádný fatální problém, kromě nepříjemné situace; mezi 70 °C a 150 °C převažuje vliv ztíženého dýchání; nad 150 °C dochází k popálení kůže za méně než 5 minut a tato teplota je limitující pro případný únik [30]. Dobu do nástupu nezpůsobivosti v minutách v závislosti na teplotě vzduchu (°C) lze odhadnout podle následujících rovnic doporučených DNV [30], respektive BSI [31]:

$$t_{inc} = 5.33 \times 10^8 T_{air}^{-3.66} \quad (10)$$

$$t_{inc} = 5.0 \times 10^7 T_{air}^{-3.4} \quad (11)$$

Pro teplotu 115 °C udává rovnice (10) dobu do nástupu nezpůsobivosti 5 minut expozice a rovnice (11) 15 minut. Teplota 115 °C se zde předpokládá jako kritérium přijatelnosti pro mez bolesti v horkém vzduchu při úniku z proudu plynu s vysokou teplotou, který vzniká při vodíkovém tryskovém požáru. Podrobnější informace o fyziologické reakci člověka na vzduch s vysokou teplotou jsou uvedeny v přednášce 6 – Kritéria poškození zdraví osob a majetku.





Obrázek 16. Naměřená axiální teplota jako funkce vzdálenosti vyjádřená v kalibrech plamene a tři kritéria pro účinky tryskového požáru (vodorovné čáry).

Obrázek 16 ukazuje naměřenou axiální teplotu vodíkového plamene [27, 32, 33] jako funkci vzdálenosti od trysky x , normalizovanou délkou plamene L_F . Tři akceptovaná kritéria jsou znázorněna vodorovnými čarami:

- 70 °C – limit „bez poškození“,
- 115 °C – limit bolesti při expozici po dobu 5 min,
- 309 °C – popáleniny třetího stupně při expozici po dobu 20 s (limit „smrt“).

Srovnání axiálního teplotního profilu a jmenovaných kritérií poskytne rozměry nebezpečné vzdálenosti:

- $x = 3,5L_F$ pro separaci „bez poškození“ (70 °C),
- $x = 3L_F$ pro mez bolesti (115 °C, 5 min),
- $x = 2L_F$ pro popáleniny třetího stupně (309 °C, 20 s).

Bylo provedeno srovnání tří nebezpečných vzdáleností u tryskového požáru s dominující hybností a nebezpečné vzdálenosti pro nezapálený únik s dominující hybností (vzdálenost k dolní mezi hořlavosti, LFL, 4 % obj. vodíku ve vzduchu) pro stejný zdroj úniku. Výše bylo prokázáno, že statisticky průměrná délka plamene je rovna vzdálenosti od trysky k axiálnímu místu, kde koncentrace vodíku klesá na 11 % obj. v nezapáleném proudu (data jsou rozptýlena od 8 do 16 % obj.).

Zákon podobnosti (9) pro rozpad koncentrace v nezapálených proudech s dominující hybností vyžaduje použití hmotnostního zlomku vodíku, a nikoli objemového zlomku, jak se mylně uvádí v některých publikovaných pracích. Hmotnostní zlomek (C_M) lze vypočítat z objemového (molárního) zlomku (C_V) dle rovnice $1/C_M = 1 + (1/C_V - 1)M_S/M_N$, kde M_S a M_N jsou molekulární hmotnosti okolního plynu, respektive plynu v trysce. Při složení vzduchu 21 obj. % kyslíku a 79 obj. % dusíku odpovídá hmotnostní zlomek vodíku $C_{ax} = 0,002881$ 4 obj. % vodíku ve vzduchu, 0,008498 odpovídá 11 obj. % vodíku ($C_{ax} = 0,005994$ – až 8 obj. %, $C_{ax} = 0,013037$ – až 16 obj. %) a hmotnostní zlomek vodíku ve stechiometrické směsi (29,5 H₂ obj. %) je $C_{ax} = 0,0282$ [1].

Poměr vzdáleností od trysky k axiální koncentraci 11 obj. % H₂ (správné umístění hrotu plamene) a k 29,5 obj. % H₂ (nesprávné umístění hrotu plamene navrhované v některých studiích) lze odhadnout vydělením zákonů podobnosti (9) pro tyto dvě koncentrace navzájem (za předpokladu, že zákon podobnosti je použitelný až do koncentrace stechiometrické), tj. $x_{11\%}/x_{29,5\%} = C_{ax(29,5\%)} / C_{ax(11\%)} = 0,0282 / 0,008498 = 3,3$. Tím se vypočtená délka plamene zvýší o řád ve srovnání s délkou plamene založenou na předchozím nesprávném poznatku (závislost umístění hrotu plamene dle 29,5 % obj. H₂ v nezapáleném proudu ze shodného zdroje) [1].



Poměr vzdáleností k LFL 4 % obj. a k zprůměrovanému umístění hrotu plamene 11 % obj. (je třeba zdůraznit, že délka plamene není rovna nebezpečné vzdálenosti od zdroje plamene) činí: $x_4 \% / x_{11} \% = 0,008498 / 0,002881 = 2,95$ (poměr vzdálenosti LFL k největší délce plamene činí $x_4 \% / x_8 \% = 2,08$ a poměr LFL k nejkratší délce plamene činí $x_4 \% / x_{16} \% = 4,53$). Poměry nebezpečné vzdálenosti k LFL (nezapálený proud) ke třem nebezpečným vzdálenostem na základě volby kritérií škodlivosti od reagujícího vodíkového proudu jsou tedy (pro průměrné umístění hrotu plamene při koncentraci v nezapáleném proudu 11 % obj.):

- $x_4 \% / x_{T=70\text{ °C}} = x_4 \% / (3,5 \cdot x_{11} \%) = 2,95 / 3,5 = 0,84,$
- $x_4 \% / x_{T=115\text{ °C}} = 2,95 / 3 = 0,98,$
- $x_4 \% / x_{T=309\text{ °C}} = 2,95 / 2 = 1,48.$

V konzervativním případě umístění hrotu plamene při koncentraci 8 % obj. H₂ v nezapáleném proudu se však tyto tři poměry změní na následující hodnoty:

- $x_4 \% / x_{T=70\text{ °C}} = x_4 \% / (3,5 \cdot x_8 \%) = 0,005994 / 0,002881 / 3,5 = 2,08 / 3,5 = 0,59,$
- $x_4 \% / x_{T=115\text{ °C}} = 2,08 / 3 = 0,69,$
- $x_4 \% / x_{T=309\text{ °C}} = 2,08 / 2 = 1,04.$

V důsledku toho lze z provedené analýzy vyvodit „neočekávaný“ závěr, že v konzervativním případě jsou všechny tři nebezpečné vzdálenosti pro reagující únik (tryskový požár) buď delší, nebo rovny nebezpečné vzdálenosti založené na LFL (nezapálený únik). Zejména nebezpečná vzdálenost od zdroje úniku vodíku k místu s osovou koncentrací rovnou LFL, např. pro prevenci vniknutí hořlavé směsi do ventilačního systému budovy, se prakticky rovná „smrtné“ separační vzdálenosti pro reagující únik (expozice 309 °C po dobu 20 s). Dvě další nebezpečné vzdálenosti pro tryskové požáry (limity „bez poškození“ a „bolest“) jsou delší než nebezpečná vzdálenost pro LFL (nezapálený únik) [1].

Zjištěná „nejdelší“ poloha hrotu plamene vodíkového proudu v axiální vzdálenosti od trysky odpovídající 8 % obj. vodíku v nezapáleném proudu představuje fyzikálně podložený výsledek. Tato hodnota je skutečně v rámci měření a teoretických předpokladů chybou LFL pro dolů směřující a sféricky se šířící premixované plameny směsi vodíku se vzduchem 8,5–9,5 % obj. Jakékoli hoření mimo tuto vzdálenost (při menších koncentracích) je tedy „odděleno“ od oblasti „souvislého“ vertikálního plamene [1].

Radiální vzdálenost od požáru vodíkového proudu vyžaduje spíše analýzu přenosu sálavého tepla než teploty proudění. Související informace lze nalézt i v dalších dokumentech [24].

4.3 Délky plamene a separační vzdálenosti ovlivněné různými vlivy

4.3.1 Vliv připojení proudu na délku plamene

Tabulka 1. Vliv připojení proudu k podlaze na délku plamene.

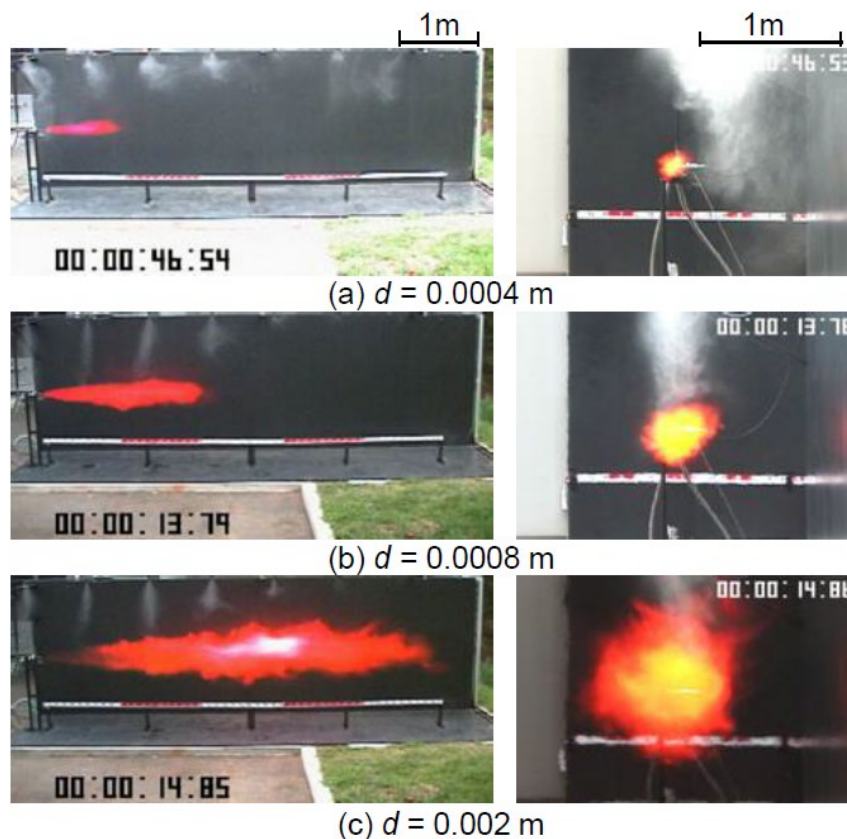
Průměr ústí, mm	Délka plamene, m		Prodloužení délky plamene, faktor krát
	Připojené proudy (tryska 0,11 m nad podlahou)	Nepřipojené proudy (tryska 1,2 m nad podlahou)	
1,5	5,5	3	× 1,83
3,2	9	6	× 1,50
6,4	11	9	× 1,22
9,5	13	11	× 1,18

Z požární bezpečnosti je známo, že délka plamene požáru se zvětšuje, pokud je zdroj ohně připojen ke stěně. Účinek je ještě silnější, je-li stejný oheň umístěn v rohu. Tento jev se vysvětluje změnou rychlosti sání vzduchu. Royle a Willoughby [34] měřili nárůst délky plamene v důsledku přiložení trysky k podlaze. Délka plamene volného nepřipojeného horizontálního proudu ze zásobníku při tlaku 20,5 MPa tryskou umístěnou 1,2 m nad podlahou závisí na průměru trysky (tabulka 1).

Pro připojený proud z trysky umístěné pouze 0,11 m nad podlahou se plamen prodlužuje takto: 1,83 při průměru trysky 1,5 mm, 1,50 – průměr trysky 3,2 mm, 1,22 – průměr trysky 6,4 mm a 1,18 průměr trysky 9,5 mm. Vliv umístění trysky nad podlahou na její délkový růst se s rostoucím průměrem trysky snižuje.

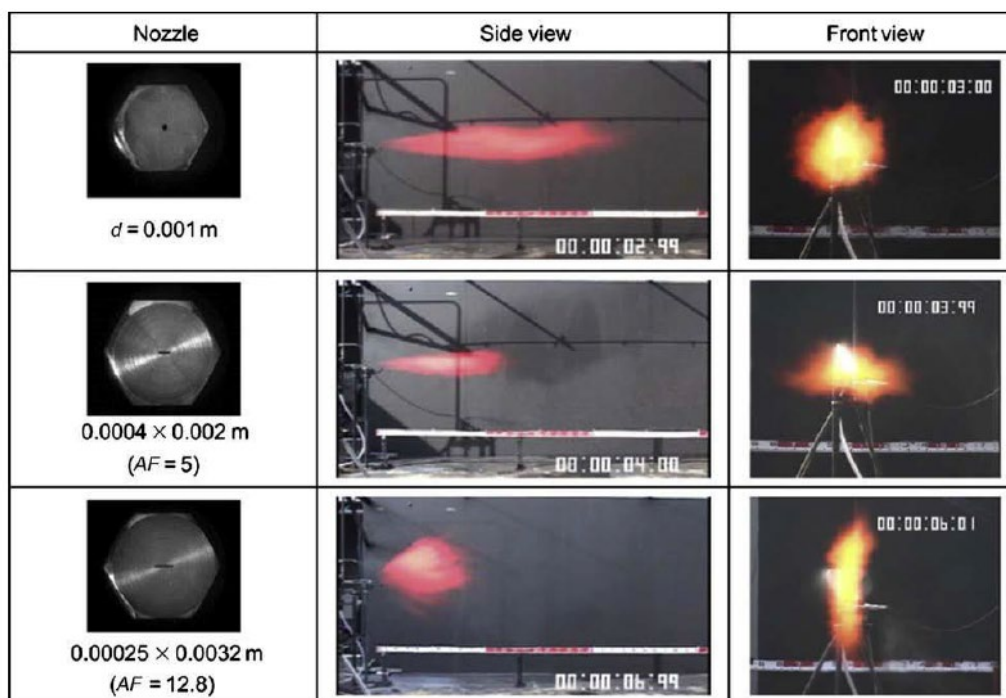
4.3.2 Vliv velikosti a tvaru trysky na délku plamene

Mogi a Horiguchi [35] studovali vodíkové tryskové plameny při výtakovém tlaku 35 MPa a různých průměrech trysek, jak je znázorněno na obrázku 17. Pětinásobné zvětšení průměru trysky z 0,4 mm na 2,0 mm vedlo k pětinásobnému prodloužení plamene – z 1 m na 5 m. To je v souladu s dříve prokázanou bezrozměrnou závislostí (6) graficky znázorněnou na obrázku 12: pro jakýkoli daný bezrozměrný poměr L_F/D vede zvětšení průměru trysky D k úměrnému prodloužení plamene L_F .

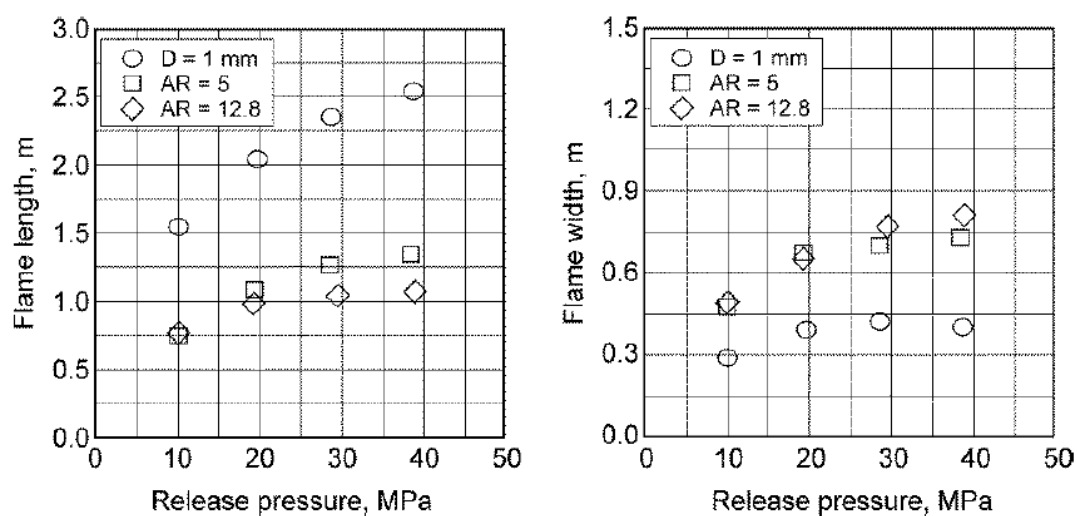


Obrázek 17. Vliv průměru trysky na délku plamene (tlak 35 MPa) [35].

Mogi a Horiguchi [35] rovněž provedli sérii experimentů při uvolňovacím tlaku 40 MPa, v níž zkoumali vliv tvaru trysky na délku a šířku vodíkového plamene. Byly testovány tři trysky se stejným průřezem: kruhová tryska s průměrem 1 mm, rovinná tryska o velikosti $D \times \delta = 2 \times 0,4 \text{ mm}$ (poměr stran (AR) = 5), rovinná tryska o velikosti $D \times \delta = 3,2 \times 0,25 \text{ mm}$ (AR = 12,8). Všechny tři trysky měly shodnou plochu průřezu. Obrázek 18 ukazuje snímky trysek (vlevo), obrázky bočního pohledu na vodíkový plamen z každé ze tří trysek (uprostřed) a čelní pohled na tyto tryskové plameny (vpravo). Tvar plamene kruhové trysky je osově symetrický jako v mnoha jiných experimentech. Reagující proudění je v režimu s dominující hybností, protože vliv vztlaku je nevýrazný. Plameny z rovinných trysek se však ve směru kolmém na hlavní osu zplošťují v důsledku tzv. jevu „změny osy“, což je proces, kdy se vystupující proud v okolí trysky rozpíná pouze ve směru vedlejší osy trysky, zatímco ve směru hlavní osy se smršťuje [36].



Obrázek 18. Fotografie tvarů tří trysek (vlevo), boční pohled na vodíkový plamen (uprostřed) a čelní pohled na vodíkový plamen (vpravo) při uvolňovacím tlaku 40 MPa a různých tvarech trysek [35].



Obrázek 19. Délka plamene (vlevo) a šířka plamene (vpravo) u tří různých trysek se shodnou plochou průřezu: kruhová tryska s průměrem 1 mm, rovinná tryska s poměrem stran $AR = 5$, rovinná tryska s $AR = 12,8$ [35].

Naměřené délky a šířky plamene jsou uvedeny na obrázku 19 [35]. V testovaném rozsahu tlaků a velikostí trysek se délka plamene zkracovala s rostoucím poměrem stran: při $AR = 5$ je plamen přibližně dvakrát kratší v porovnání s plamenem z kruhové trysky a při $AR = 12,8$ je plamen přibližně 2,5krát kratší. Současně byla maximální šířka plamene u rovinných trysek přibližně dvojnásobná oproti kruhové trysce.

4.3.3 Vliv vztlaku na deterministické separační vzdálenosti

Je rovněž důležité vědět, zda se primárně jedná o únik s dominující hybností nebo vztlakem, nebo při jaké axiální koncentraci se režim proudění mění z proudění s dominující hybností na proudění s dominujícím vztlakem. Ve shodné trysce jsou vztlakové proudy (nižší rychlosti) jsou vždy kratší než proudy s dominující hybností (vysoké rychlosti). Jednoduchá technika používaná k rozlišení mezi prouděním s dominující hybností a s dominujícím vztlakem vychází z práce Shevyakova a kol. [38], která je podrobně popsána v přednášce 7 – Úniky nezapáleného vodíku ve venkovním prostředí a jejich zmírňování.

4.3.4 Vliv protipožárních konstrukcí

V souvislosti se zkrácením vodíkového plamene se často coby o zmírňujícím opatření uvažuje o použití protipožárních konstrukcí. Zkrácení plamene pomocí protipožárních konstrukcí je však spojeno s výdaji. Například v případě vertikální 90° bariéry se deflagrační přetlaková špička po zpožděném zapálení (0,8 s) turbulentního proudu z 9,5mm trysky při skladovacím tlaku 20,5 MPa zvýší z 16,5 kPa u volného proudění na 42 kPa [34, 38]. Zvýšení tlaku bylo zaznamenáno u stěny, kde se nachází potrubí pro uvolňování vodíku, a na druhé straně může být přetlak za protipožární konstrukcí tlumen.



Obrázek 20. Opožděné (0,8 s) zapálení vodíkového proudu (skladovací tlak 20,5 MPa, tryska s průměrem 9,5 mm) narážejícího na 90° konstrukci: fáze deflagrace (horní a prostřední snímek), fáze ustáleného tryskového požáru (spodní snímek), zkouška HSL [38].

Obrázek 20 ukazuje sekvenci snímků (shora dolů) po opožděném zapálení vodíkového proudu narážejícího na 90° konstrukci. Než tryskový plamen dosáhne takřka ustáleného stavu (spodní snímek), dochází k deflagračnímu hoření nestejnorodé směsi v uzavřeném prostoru mezi protipožární konstrukcí a podlahou (viz horní a prostřední snímek). Konstrukce se sklonem

60 ° dále zvyšuje přetlak na 57 kPa. Obrázek 21 ukazuje dva snímky po opožděném zapálení vodíkového proudu narážejícího na 60° konstrukci.



Obrázek 21. Opožděné (0,8 s) zapálení vodíkového proudu (skladovací tlak 20,5 MPa, tryska s průměrem 9,5 mm) narážejícího na 60° konstrukci: fáze deflagrace (horní snímek), fáze ustáleného tryskového požáru (spodní snímek), zkouška HSL [38].

5. Potrubní aplikace

Plynovody představují důležitou tepnu pro vnitrostátní i globální přepravu energie, protože je z hlediska počtu nehod a úmrtí bezpečnější než přeprava po silnici nebo železnici. Nedávná studie prokázala, že bezpečnost dopravních plynovodů je vyšší než bezpečnost jiných druhů dopravy [60]. Srovnávací studie [61] využívající údaje o nehodách shromážděné v letech 2005 až 2009 ve Spojených státech zjistila, že průměrná nehodovost při přepravě zemního plynu činí $0,12 \times 10^{-4}$ na km ročně, zatímco nehodovost v silniční přepravě nebezpečných materiálů činí $0,14 \times 10^{-4}$ na km ročně a v železniční přepravě nebezpečných materiálů $1,5 \times 10^{-4}$ na km ročně. Z hlediska počtu smrtelných a vážných zranění jsou plynovody výrazně bezpečnější.

Kromě zemního plynu se vysokotlakým potrubím přepravují i další plyny, například vodík a ethylen. Potrubní doprava se nyní jeví jako nákladově nejefektivnější řešení pro rozsáhlou distribuci vodíku jako nosiče energie, a to buď přidáním většího či menšího podílu vodíku do stávajících potrubních sítí zemního plynu, nebo použitím samostatných sítí určených pro vodík. Využití stávající potrubní sítě k dopravě vodíku tímto způsobem by umožnilo zavést výrobu vodíku a aplikace na vodíkové palivo ještě před vytvořením specializované soustavy pro přepravu vodíku, jejíž výstavba by vyžadovala značné kapitálové investice a čas [62]. V Evropě se plánuje vybudování propojené evropské sítě olefinových potrubí, která umožní, aby se tato infrastruktura stala skutečnou alternativou k ostatním druhům dopravy (tj. silniční a železniční). Na druhou stranu rozvoj této infrastruktury představuje otázku vymezení nebezpečné oblasti okolo potrubí, aby bylo možné buď stanovit dostatečně velkou vzdálenost

potrubí od obytné oblasti, s ohledem na prevenci případných škod na zdraví osob a stavu budov, nebo výstavby budov s danou úrovní bezpečnosti proti případnému poškození.

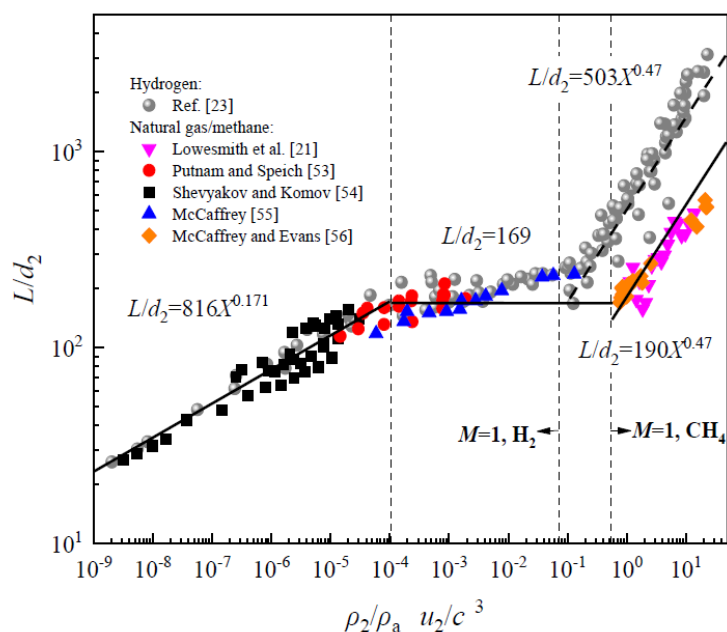
Během přepravy plynovodem jsou hlavními příčinami úniku plynu prasknutí potrubí vlivem vnitřních nebo vnějších faktorů, jako jsou koroze, stárnutí materiálu, nedostatečná kvalita a podobně [63]. Nekontrolované uvolnění a zapálení hořlavého plynu může způsobit požár nebo výbuch, což jsou mimořádně nebezpečné jevy pro člověka i okolí. U konkrétního potrubí závisí typ nebezpečí, které vznikne, a s ním spojený potenciál poranění osob nebo poškození majetku na způsobu poruchy potrubí (tj. únik vs. prasknutí), na uvolnění plynu (tj. vertikální vs. šikmý proud) a na době do zapálení (tj. okamžité vs. opožděné). U plynů (např. CH_4 , H_2) s molekulovou hmotností výrazně nižší než vzduch je možnost vzniku významného požáru v důsledku opožděného dálkového zapálení velmi nízká, protože nízká specifická hmotnost obvykle vylučuje vznik dlouhodobého oblaku hořlavých par na úrovni podlahy. Nejběžnějším typem požáru v důsledku úniku plynů pod vysokým tlakem je tryskový požár. Pokud se uniklý plyn pod vysokým tlakem, který uniká v podobě proudu z trhliny nebo při prasknutí celého potrubí, zapálí v místě prasknutí, vznikne tryskový požár. V těchto případech dochází k silnému tepelnému vyzařování dlouhým, stálým plamenem s možným poškozením zdraví osob a technického stavu nemovitostí v okolí [64,65]. Takové nehody jsou uváděny jako opakovaný problém v důsledku složitosti potrubních systémů a neschopnosti člověka účinněji se poučit z předchozích zkušeností [66]. Evropské sdružení technických plynů (EIGA) poskytlo údaje o četnosti poruch průmyslových plynovodů podle typů a velikosti úniku z potrubí. Vezměme si jako příklad potrubí s průměrem 100 mm: četnost poruch u takového potrubí (na metr) v podobě malé netěsnosti, velké netěsnosti a úplného přerušení činí 6×10^{-6} , 3×10^{-7} , respektive 3×10^{-8} [67]. Statistika o vzniku tryskových požárů (zahrnující celkem 84 tryskových požárů mezi roky 1961 a 2008) zveřejněná v práci Gomez-Mares a kol. [68] uvádí, že potrubí představuje při přepravě a skladování příčinu 11,9 % všech nehod. Jakmile k takové nehodě dojde, mohou vzniknout značné ztráty a škody [69] na okolních potrubích, nadzemních vedeních, a především na zdraví osob. Některé typické nehody jsou uvedeny v tabulce 2.

Únik vodíku z vysokotlakých potrubí lze numericky studovat shodnými přístupy, které byly použity u vysokotlakých skladovacích zásobníků. Jednotlivé teorie najdete v části 3 této přednášky. Podobně jako korelace délky plamene a průměru trysky (F_L/D), kterou vyvinul Molkov [1], vyvinuli Wang a kol. [70] novou korelaci a jejich vyjádření ukázalo kvalitní shodu s publikovanými experimentálními údaji, jak ukazuje obrázek 22.

Tabulka 2 Typické nehody s tryskovým požárem vyvolaným únikem vysokotlakého plynu [70].

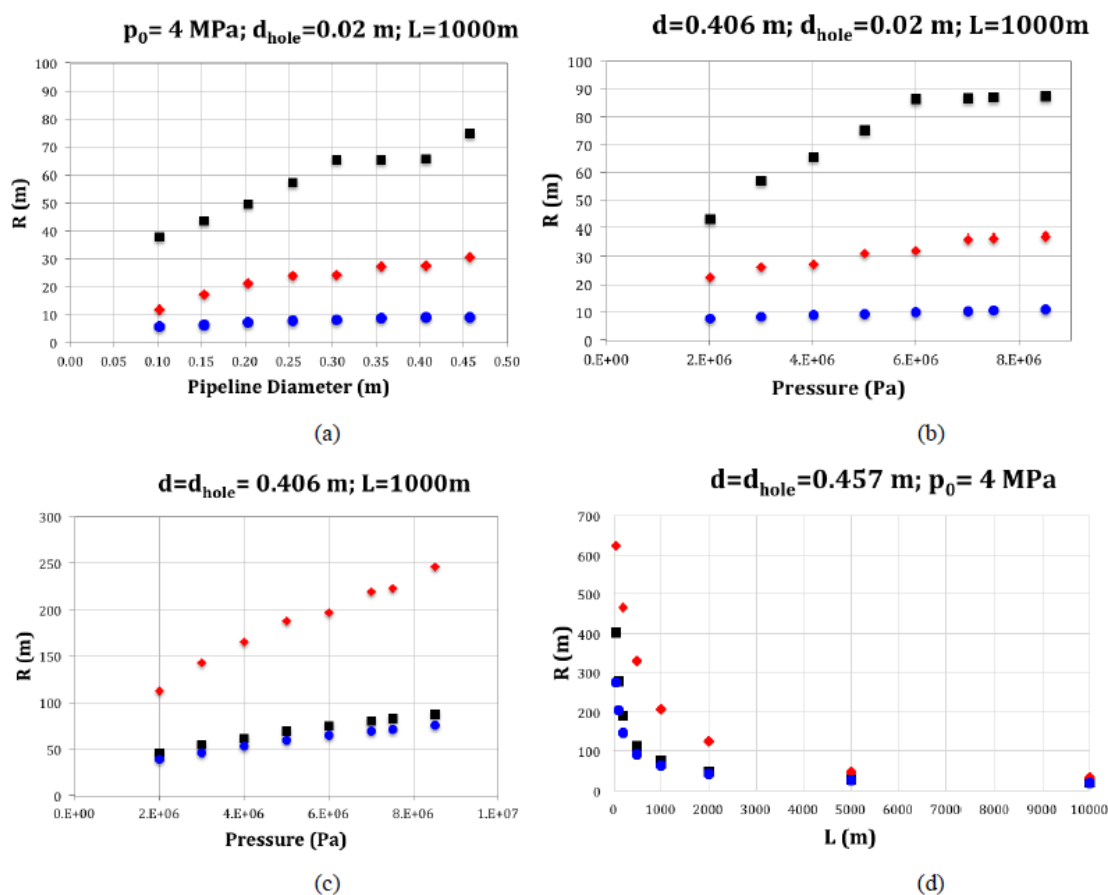
No.	Date	Location	Pipe diameter (m)	OP/MAP (MPa)	Gas type	Description	Deaths, injuries, and property damage
1	30/07/2004	Ghislenghien, Belgium	1.00	7.00/8.00	Natural gas	The rupture caused tens of vehicles catching fire and liquefying the roof coverings of commercial property within the radius of 150–200 m.	24 deaths, over 120 injuries, and approximately \$112 million
2	07/06/2010	Cleburne, Texas, United States	0.91	6.55/7.25	Natural gas	The fire was induced by digging a hole to build a new transmission line. The flame height of more than 250 m was observed.	1 death, 6 injuries, and \$1.029 million (for damage and clean-up costs)
3	11/12/2012	Sissonville, West Virginia, United States	0.51	6.41/6.89	Natural gas	The rupture occurred in a sparsely populated area. The total burned area was estimated to be 335 m long by 250 m wide. 3 houses were destroyed and several other houses were damaged.	No fatalities or serious injuries, and \$8.685 million (for pipeline repair, system upgrade and gas loss)
4	10/01/2014	Enka, North Carolina, United States	0.30	NA/NA	Natural gas	Overhead transmission lines ignited the leaking gas. The flame more than 30 m high was observed, and the fire lasted about 1.5 h, damaged several cars, houses and commercial buildings.	No one was hurt, and the total loss amounted to \$836,720
5	31/07/2014	Kaohsiung, Taiwan, China	0.10	4.25/NA	Propylene	Gas explosions sent flames about 15 stories high in a densely populated area. Over 6 km of roads were destroyed, 3,259 buildings were damaged, and a power grid blackout was initiated, leading to cut power supplies to 12,000 households.	32 deaths, 321 injuries, and an initial loss of \$62 million (for rebuilding the damaged roads and drainage system)
6	29/04/2016	Salem Township, Pennsylvania, United States	0.76	7.16/7.24	Natural gas	The fire scorched about 162,000 m ² .	1 injury and unknown property loss

Note: OP, operating pressure; MAP, maximum allowable pressure.



Obrázek 22. Nejvhodnější rovnice Molkovovy korelace aplikovaná na délky plamene vodíkového (čárkovaná čára) a metanového (plná čára) tryskového plamene [70]. (L je délka plamene a d_2 je průměr otvoru, Odkazy v tomto obrázku jsou uvedeny v dokumentu [70]).

V práci, kterou publikovali Coccorullo a Russo [71], byl vyvinut jednoduchý a spolehlivý přístup k určení velikosti podlahové plochy potenciálně zasažené poruchou vysokotlakého potrubí. Nebezpečná vzdálenost požáru v důsledku prasknutí vysokotlakého potrubí, kterým se přepravuje zemní plyn, vodík a ethylen, byla vyhodnocena na základě změny provozního tlaku, průměru a délky potrubí a velikosti otvoru. Obrázek 23 ukazuje vliv provozních parametrů potrubí na nebezpečnou vzdálenost (R) od potrubí. Výsledky R pro tři plyny jsou uvedeny jako funkce průměru potrubí (obrázek 23a), provozního tlaku v případě malého úniku (obrázek 23b) nebo prasknutí potrubí v plném rozsahu (obrázek 23c) a délky potrubí od kompresní stanice plynu k místu úniku (obrázek 23d). Je patrné, že s rostoucím průměrem potrubí roste nebezpečná vzdálenost, protože se zvyšuje rychlost úniku. S rostoucím tlakem plynu uvnitř potrubí roste i nebezpečná vzdálenost. To lze vysvětlit takto: zvýšení tlaku uvnitř potrubí zvyšuje hustotu plynu a výstupní rychlost. V důsledku toho se zvětšuje objem trysky a výsledné tepelné vyzařování. Zvětšování průměru otvoru zvětšuje i nebezpečnou vzdálenost, a to především kvůli úměrnému zvýšení rychlosti úniku při porovnání obrázku 23b s obrázkem 23c. Naopak s rostoucí délkou plynovodu od kompresní stanice k místu úniku se nebezpečná vzdálenost zkracuje. S délkou potrubí nad 3 000 m však zůstává nebezpečná vzdálenost přibližně konstantní.



Obrázek 23. Nebezpečná vzdálenost v závislosti na (a) průměru potrubí, (b) provozním tlaku pro malý únik, (c) provozním tlaku při čtyřnásobném protržení, (d) vzdálenosti od kompresní stanice. černý symbol – zemní plyn, červený symbol – etylen, modrý symbol – vodík [77].

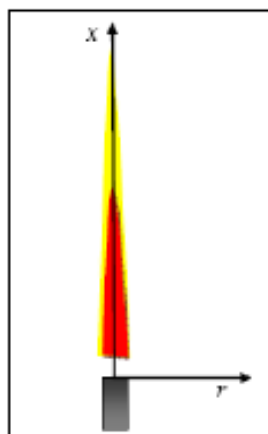
6. Sálavé tepelné toky z tryskových požárů a ohnivých koulí

6.1 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 [39]. Konvekční a radiační tepelné toky jsou však i nadále důležitými parametry a musí být posuzovány z hlediska ochrany života, majetku a životního prostředí.

Molina a kol. [40] a Schefer a kol. [23] vyvinuli model pro předpověď tepelných toků v libovolné radiální (r) a axiální (x) poloze při požárech nedostatečně roztříštěných proudů (viz obrázek 24) [40].



Obrázek 24. Souřadnicový systém turbulentního tryskového plamene [40].

Použití jmenovitých hodnot nicméně podhodnocuje experimentální sálavý tepelný tok. Pro stanovení sálavého tepelného toku je třeba provést následující kroky. Nejprve je nutné vypočítat hustotu plamene (vzduch + spaliny) v plameni pomocí následující rovnice:

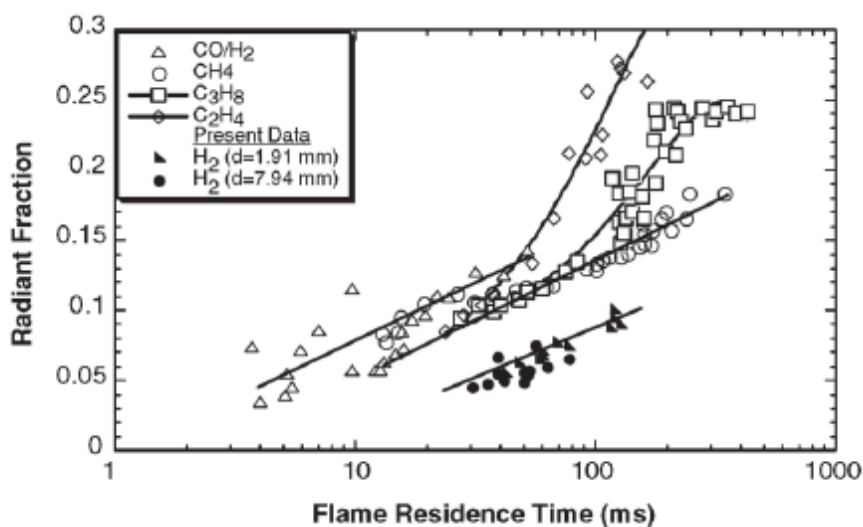
$$\rho_f = \frac{P_{amb} M_{sto}}{RT_{ad}} \quad (12)$$

kde ρ_f je hustota plamene (kg/m³), P_{amb} je okolní tlak, M_{sto} je střední molekulová hmotnost stechiometrických produktů spalování vodíku ve vzduchu (24,54 kg/kmol), R je univerzální plynová konstanta (8 314,47 kJ/kmol·K) a T_{ad} je adiabatická teplota plamene vodíku ve vzduchu. Délka, šířka a hustota plamene se pak použijí v rovnici (13) k určení doby setrvání plamene:

$$\tau_F = \frac{\rho_F W_F^2 L_F f_s}{3 \rho_{nozz} d_{nozz}^2 U_{nozz}} \quad (13)$$

kde τ_F je doba setrvání (s), W_F je šířka plamene (předpokládaný poměr k délce je 0,17), L_F je délka plamene, f_s je hmotnostní podíl paliva za stechiometrických podmínek (0,0283), ρ_{nozz} je hustota proudění v trysce, d_{nozz} je průměr výtoku proudění a U_{nozz} je rychlost proudění v trysce.

Jakmile je známa doba setrvání plamene, je možné získat sálavý podíl X_{rad} z údaje, který uvádí Schefer a kol. [23] a který je uveden na obrázku 25, kde X_{rad} je podíl celkového uvolněného chemického tepla, který je vyzářen do okolí. Je třeba poznamenat, že pro malý plamen nelze přístup navržený Scheferem a kol. [23] použít, protože L je malé a sálavý podíl je poté záporný.



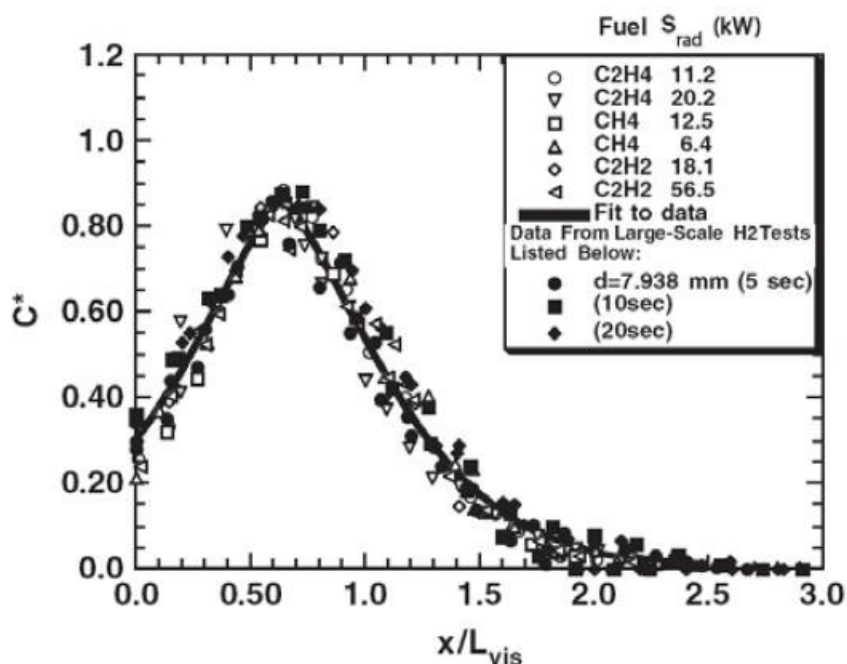
Obrázek 25. Sálavý podíl v závislosti na době setrvání plamene [23].

Následným dosazením sálavého podílu do rovnice (14) se získá hodnota S_{rad} , tj. celkový vyzářený sálavý výkon:

$$S_{rad} = X_{rad} \dot{m}_{nozz} \Delta H_c \quad (14)$$

kde S_{rad} je celkový vyzářený sálavý výkon (W), $\dot{m}_{nozz}$ je hmotnostní průtok v trysce a ΔH_c je spalné teplo vodíku. Souřadnice x a r lze zvolit dvěma způsoby:

- Možnost 1: Souřadnice lze zvolit. V takovém případě mohou souřadnice odpovídat umístění možných cílů tryskového požáru: osoby, budova, únikové cesty, jiné zdroje potenciálního nebezpečí, jako jsou sklady hořlavých nebo toxických látek atd. Po výběru souřadnic je prvním krokem výpočet L_F . Pak je snadné vypočítat bezrozměrný sálavý výkon C^* pomocí požadované hodnoty x (m), tj. umístění na ose proudu od trysky. To lze provést pomocí obrázku 26. Nakonec se nastavením hodnoty r vypočítá $q_{rad}(x, r)$ podle rovnice (15).



Obrázek 26. Axiální změna normalizovaného sálavého tepelného toku [23].

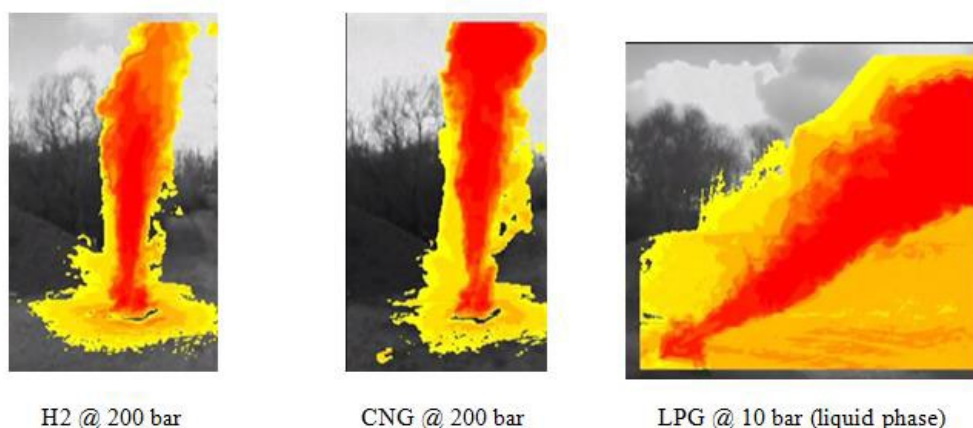
- Možnost 2: Souřadnice lze pro zvolenou hodnotu sálavého tepelného toku vypočítat. To znamená, že vypočtené souřadnice tvoří obrys okolo tryskového požáru odpovídající určité izohodnotě sálavého tepelného toku. Hodnotu sálavého tepelného toku lze definovat např. jako akceptační kritérium. Je třeba vypočítat délku plamene, šířku plamene, dobu setrvání plamene, sálavý podíl a celkový vyzářený sálavý výkon. Poté lze pro každou hodnotu x v požadovaném rozsahu vypočítat pomocí příslušné rovnice hodnotu bezrozměrného sálavého výkonu. Nakonec lze r vypočítat pro každou osovou polohu dosazením odpovídající hodnoty C^* a zvoleného sálavého tepelného toku do rovnice (15):

$$q_{rad}(x, y) = \frac{C^* S_{rad}}{4\pi r^2} \quad (15)$$

kde $q_{rad}(x, r)$ je sálavý tepelný tok v místě (x, r) (W/m^2), C^* je bezrozměrný sálavý výkon z obrázku 26 a r je radiální poloha od osy trysky (m).

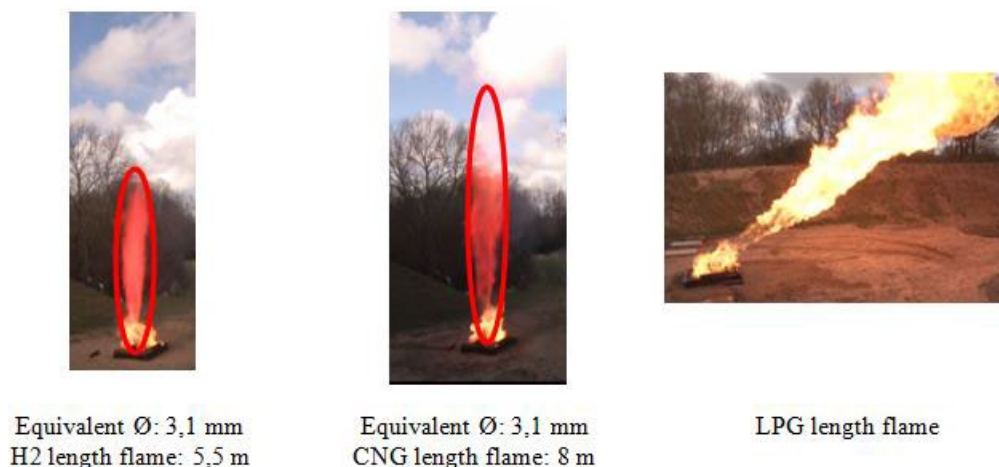
Je třeba poznamenat, že výše uvedená analýza je založena na vertikálním směru plamene. Zatím není jasné, jaké účinky bude mít vodorovný plamen. Vztlak může plamen ovlivnit, a proto je v této fázi těžké odhadnout, jak se budou chovat horké proudy ve směru proudění. Výše popsany přístup tak může být v případě vodorovného plamene poněkud konzervativní. Vlivem sálavého tepelného toku na osoby, životní prostředí a konstrukce se podrobně zabývá přednáška 6 – Kritéria poškození zdraví osob a majetku.

6.2 Tryskové požáry vodíku v porovnání s tryskovými požáry obvyklých paliv



Obrázek 27. 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 27](#), v důsledku neúplného spalování CNG a LPG vznikají CO_2 , 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 27](#) 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 28. Srovnání délky plamene tryskového požáru vodíku (průměr otvoru 3,1 mm), CNG (průměr otvoru 3,1 mm) a LPG.

Jak ukazuje obrázek 28, při stejném průtoku je v důsledku spotřeby kyslíku, která je u CNG čtyřikrát a u LPG pětikrát 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 28.

6.3 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) [41] 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 [42]. 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 [42].

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 [42].

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 Molkov a kol. [72]. 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.

6.4 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].

Britská laboratoř Health and Safety Laboratory (HSL) při úřadu Health and Safety Executive provedla sérii více než 40 experimentů s uvolňováním vysokotlakého vodíku v rámci projektu HYPER [38], které posléze publikovali Royle a Willoughby [34]. Byl stanoven vliv změny průměru výstupu z trysky, opoždění zapálení a polohy na přetlak.

Vodík byl skladován ve dvou 50litrových lahvích při tlaku 20,5 MPa. Mezi zásobníkem a výstupem z trysky byla nerezová trubka s vnitřním průměrem 11,9 mm a řada kulových ventilů s vnitřním průměrem 9,5 mm. V trysce byly použity omezovače o stejné délce 2 mm a různém průměru 1,5, 3,2 a 6,4 mm, aby se měnil výstupní průměr proudění. Bod uvolnění se nacházel 1,2 m nad podlahou. Tryska byla zapálena zápalkou s malým množstvím pyrotechnického materiálu ve výšce 1,2 m nad podlahou. Umístění bodu zapálení se pohybovalo v rozmezí 2–10 m od místa uvolnění. Piezorezistivní snímače směřovaly nahoru, s výjimkou snímačů namontovaných na stěnu. Tři snímače byly umístěny kolmo k ose ve vzdálenosti 1,5 m, 2,6 m a 3,7 m, ve výšce 0,5 m [34]; osová vzdálenost všech snímačů od trysky činila 2,8 m, výška byla 0,5 m.

K úplnému otevření ventilu bylo zapotřebí času 260 ms, k dosažení 2 m vodíku pak času 140 ms. 400 ms je tedy nejkratší možné opoždění zapálení nestabilního proudu. Proudění ze zásobníku vodíku při tlaku 20,5 MPa bylo převážně v režimu s dominující hybností, tj. proudění bylo poměrně nevztlačkové až do dolní meze hořlavosti [34].

6.5 Vliv různých parametrů na přetlak

6.5.1 Vliv průměru otvoru na přetlak

V tabulce 3 jsou uvedena experimentální měření nestacionárního deflagračního přetlaku vodíkového proudu pro dvě opožděná zapálení (minimální možné 400 ms a 800 ms) a průměry trysek od minimálního 1,5 mm do maximálního 9,5 mm. Průměr trysky má zásadní vliv na maximální přetlak vytvořený zapáleným proudem.

Při uvolňování tryskou s průměrem 1,5 mm nebyl zaznamenán žádný přetlak. Přetlak při zapálení s opožděním 400 ms, kdy proud právě dosáhl bodu zapálení umístěného 2 m za tryskou, je vždy nižší než přetlak při zapálení s opožděním 800 ms, což odpovídá většímu turbulentnímu oblaku hořlavého vodíku se vzduchem, který se vytvoří. Za zmínku stojí, že v experimentech se za tryskou nachází stěna. Maximální zaregistrovaný přetlak volného vodíkového proudu činil 16,5 kPa.

Z této série experimentů vyplývá důležitý závěr: průměr úniku musí být pro danou technologii FCH snížen na co nejmenší možnou míru (ALARP). Zařazení omezovačů průtoku do přírodních vodíkových potrubí zkracuje pozorované délky plamene, a tím i potřebné bezpečnostní vzdálenosti. Předpokládá se, že je to způsobeno snížením hmotnostního průtoku a tlakových ztrát na omezovači, a tedy nižším tlakem na výstupu proudu z potrubí.

Tabulka 3. Vliv průměru otvoru a opožděného zapálení na maximální přetlak generovaný deflagračním proudem [34].

Průměr ústí, mm	Opoždění zapálení, ms	Maximální přetlak, kPa
1,5	800	Nelze zaznamenat
1,5	400	Nelze zaznamenat
3,2	800	3,5
3,2	400	2,1
6,4	800	15,2
6,4	400	2,7–3,7
9,5	800	16,5
9,5	400	3,3–5,4

Bylo zjištěno, že turbulence a velikost proudu mají větší vliv na deflagrační tlak než celkové množství uniklého vodíku. Celkové množství uniklého vodíku není vždy důležité, zejména v otevřené atmosféře, protože vztlak nadále způsobuje ředění vodíku vzduchem, dokud nedosáhne LFL 4 % obj. a méně. Proto části vodíku uvolněné na začátku v mnoha praktických scénářích nepřispívají k hoření, protože tvoří část mraku, který se nachází pod dolní mezí hořlavosti [34].

Na základě předložených výsledků lze předpokládat, že samovolné vznícení při náhlém uvolnění vodíku difuzním mechanismem by mohlo snížit přetlak samovolně vzníceného úniku

ve srovnání s opožděným zapálením (doba opožděného zapálení je v tomto případě zkrácena na minimum). Je třeba pamatovat, že samovolné vznícení bylo pozorováno při náhlém uvolnění v případě roztržení průtržného disku a scénáře samovolného vznícení proudu difuzním mechanismem, kdy byly k iniciaci úniku vysokotlakého vodíku použity ventily, nejsou zahrnuty [1].

6.5.2 Vliv opoždění zapálení na přetlak

Vliv opoždění zapálení byl zkoumán u průměru trysky 6,4 mm a s umístěním zapalovacího bodu ve vzdálenosti 2 m od trysky (jak ukazuje tabulka 4). Lze konstatovat, že zapálení v oblasti blízké mezím hořlavosti proudového mraku (opoždění zapálení 400 ms) vede k relativně pomalému hoření, a tedy k malému přetlaku. Maximální přetlak 19,4 kPa je pozorován při opoždění zapálení 600 ms. Maximální přetlaky byly pozorovány při zapálení proudu v okamžiku, který se shodoval s oblastí maximální turbulence v přední části proudu, která dosáhla bodu zapálení.

Tabulka 4. Vliv opoždění zapálení na maximální přetlak generovaný deflagračním proudem [34].

Opoždění zapálení, ms	Maximální přetlak, kPa
400	3,7
500	18,4
600	19,4
800	15,2
1000	11,7
1200	12,5
2000	9,5

6.5.3 Vliv místa zdroje zapálení na přetlak

Byla zvolena jediná tryska s průměrem 6,4 mm se stálým uvolňovacím tlakem 20,5 MPa a pevným opožděním zapálení 800 ms. Bod zapálení se pohyboval od 2 do 10 m. Maximální přetlaky byly zaznamenány snímačem č. 1 umístěným 2,8 m od trysky a 1,5 od osy proudění (tabulka 5). Deflagrační přetlak výrazně klesá s rostoucí délkou umístění bodu zapálení od zdroje proudu. Při umístění zdroje zapálení ve vzdálenosti 10 m od trysky nedošlo k žádnému zapálení proudu.

Tabulka 5. Vliv polohy zápalného zdroje na maximální přetlak generovaný deflagračním proudem [34].

Bod zapálení, m	Maximální přetlak, kPa
3	5,0
4	2,1
5	2,1
6	Nelze zaznamenat
8	Nelze zaznamenat
10	Žádné zapálení

7. Požár vozidel s pohonem na palivové články

Vozidla s palivovými články (FCV) jsou jednou z hlavních aplikací technologií FCH, které zažívají nebývalý 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 [43] 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 [43]. 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 [43].

V letech 2000 až 2006 bylo zdokumentováno 20 katastrofických poruch nádrží na CNG, z nichž 11 bylo způsobeno požárem vozidla [44]. 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.“ [44]. To znamená, že při posuzování rizik nelze vyloučit jejich katastrofické selhání [41].

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 [45]. Obrázek 29 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 29. Tryskový požár vodíku a požár benzínu: 3 s (vlevo) a 60 s (vpravo) po iniciaci požáru vozidla [45].

Scénář s vozidlem na vodíkový pohon uvedený na obrázku 29 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 29.



Obrázek 30. Zkouška požáru FCV od benzinové kaluže: vlevo – požár benzinu těsně před aktivací zařízení TPRD, vpravo – 1 sekundu po aktivaci zařízení TPRD [46].

Obrázky 30 a 31 ukazují výsledky studie požáru vozidel s vodíkovým pohonem provedené v Japonsku [46]. Vozidlo s FC bylo vybaveno tepelným zařízením pro uvolnění přetlaku (TPRD) s vnitřním průměrem ventilačního potrubí 4,2 mm. Při zkoušce znázorněné na obrázku 30 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 30, vpravo).

V dalším testu, který provedli Tamura a kol. [46], byla dvě vozidla zaparkována přibližně 0,85 m od sebe a bylo zkoumáno šíření požáru z vozidla s FC na benzinové vozidlo. Obrázek 31 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 31. HFCV s aktivovaným zařízením TPRD (vlevo) a benzinové vozidlo (vpravo) [46].

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 Tamura a kol., byla použita malá zásobní nádrž s objemem pouhých 36 litrů a s kratší dobou uvolňování vodíku [46] 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 [46] 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 [46].

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 [47] 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 32). 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 [21].



Obrázek 32. Vodíkový tryskový požár ze zařízení PRD orientovaného vzhůru ve vozidle s palivovými články [48]. (POZNÁMKA: současná zařízení TPRD mívají zpravidla šikmý vývod)

Požár uvedený na obrázku 32 vznikl na popelníku přístrojové desky [48]. 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).

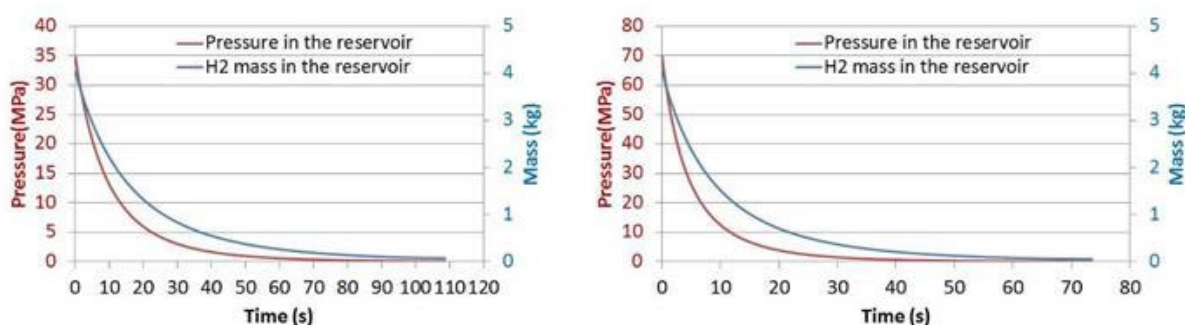
Scénář s únikem vodíku přes zařízení PRD směrem dolů je znázorněn na obrázku 33. V tomto případě bylo zařízení PRD aktivováno v čase 16 min 16 s po vzniku požáru [48].



Obrázek 33. Vodíkový tryskový požár ze zařízení PRD nasměrovaného dolů ve vozidle s FC (vlevo – pohled zezadu vozidla; vpravo – pohled z boku vozidla) [48].

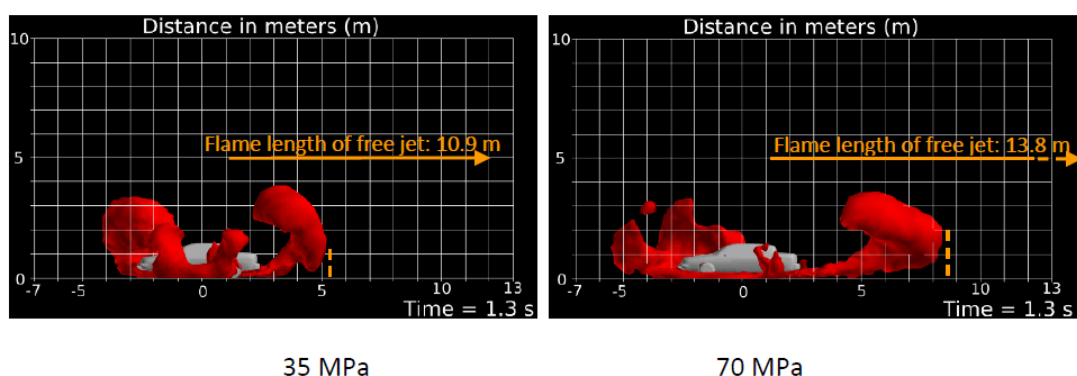
Obrázky 32 a 33 ukazují, že současná konstrukce zařízení TPRD v případě úniku vodíku a tryskového požáru neumožňuje evakuaci řidiče a cestujících, znemožňuje zásah záchranářů a ohrožuje veřejnost. Únik vodíku přes zařízení TPRD lze považovat za typický scénář nehody. Když teplota překročí 110 °C, aktivuje se zařízení TPRD a vodík se uvolní. Zařízení TPRD jsou běžně umístěna na skladovacích nádržích, pod vozidlem s palivovými články. Uvolnění je směřováno 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 [50].



Obrázek 34. 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) [49].

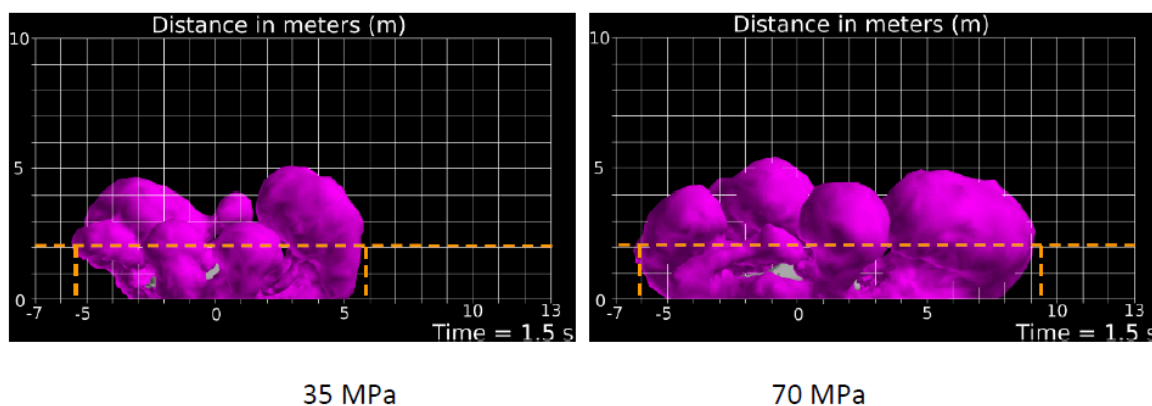
V reálných podmínkách neprobíhá uvolňování vodíku z vysokotlakého zásobníku jako stabilní proces, ale jako pokles tlaku, při kterém tlak v zásobníku pozvolna klesá, dokud se zásobník zcela nevyprázdní. K simulaci dynamiky tlaku v zásobníku vodíku při nedostatečně roztržitém proudu lze použít již dříve zmiňovaný model fiktivní trysky. Obrázek 34 ukazuje dynamiku tlaku a hmotnosti při postupném uvolňování ze dvou zásobníků vodíku: objem 171 l, skladovací tlak 35 MPa (obrázek 34 vlevo) a 101 l, skladovací tlak 70 MPa (obrázek 34 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 34, 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 [49].



Obrázek 35. Boční pohled na obálku největšího vodíkového plamene (izopovrch o teplotě $T = 1\,300\,^{\circ}\text{C}$) [49].

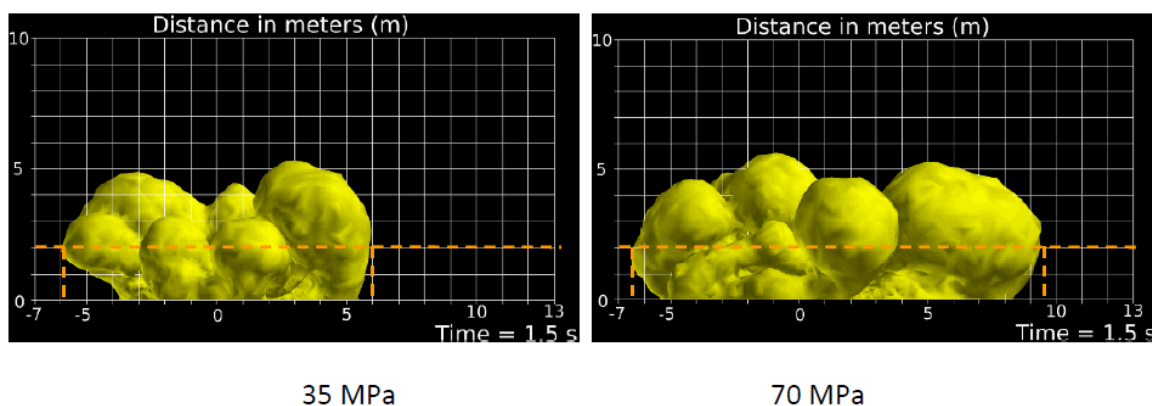
Obrázek 35 ukazuje snímek největšího plamene vznikajícího při uvolňování vodíku přes zařízení TPRD s otvorem o průměru 4,2 mm, které je umístěno pod vozidlem a směřuje dolů. Obálka plamene byla získána v simulacích CFD a vizualizována pomocí tepelné izoplochy $T=1\,300\,^{\circ}\text{C}$. Nejvzdálenější 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 35 je také znázorněno šíření nejdelšího plamene u volných tryskových požárů bez protipožárních konstrukcí vypočtené pomocí analytické korelace (6) (viz též obrázek 12). 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 [49].



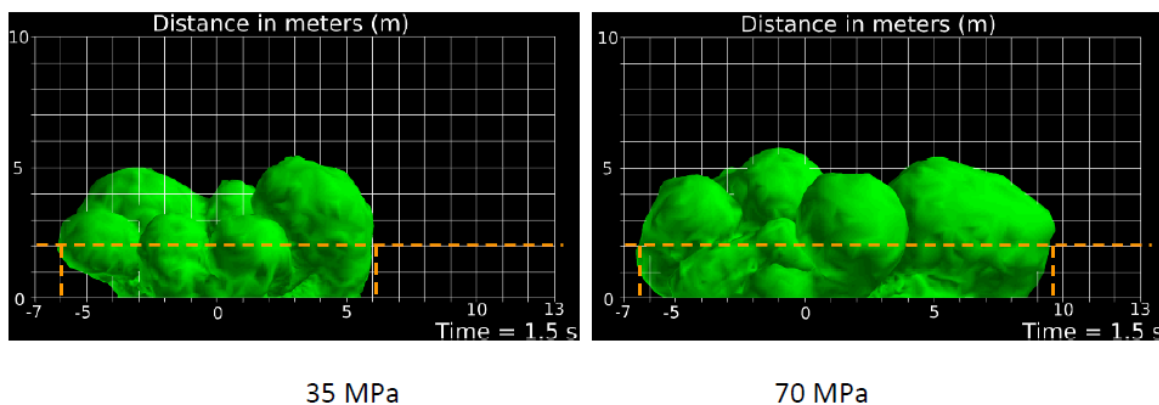
Obrázek 36. Boční pohled na největší obálku při bezpečné práci členů zásahových jednotek v ochranném oděvu (izopovrch o teplotě $T=260\text{ °C}$) zakončenou ve výšce 2 m [49].

Obrázek 36 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 obálka zmenší a separační vzdálenosti zkrátí [49].



Obrázek 37. 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 [49].

Teplota izopovrchu $T=115\text{ °C}$ odpovídající prahové hodnotě pro činnost členů zásahové jednotky bez ochranného oděvu je znázorněna na obrázku 37. 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 [49].



Obrázek 38. Boční pohled na největší obálku pro bezpečnost veřejnosti (izopovrch o teplotě $T=70\text{ °C}$) zakončenou ve výšce 2 m [49].

Z obrázku 38 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 [49].

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

8. Detekce, zmírňování a hašení vodíkových požárů

8.1 Detekce vodíkových požárů

Systém detekce požáru je obvykle nastaven tak, aby vyvolal zvukový/optický poplach nebo aktivoval systém protipožární systém. Existují různé přístupy k detekci požáru, a to na základě:

- detekce tepla,
- sprinklerové hlavice,
- tavných zátek,
- detektorů tepla s kompenzací rychlosti,
- lineární detekce tepla (kabely vedené přes úseky s rizikem požáru),



- ionizační detekce kouře,
- optická detekce kouře (zakrytí/průhlednost),
- detekce plynných produktů spalování, např. CO, těkavé organické sloučeniny,
- optická detekce plamene (IR a UV a kombinovaná IR-UV),
- vysokorychlostní a vysoce citlivá detekce kouře,
- systémy založené na uzavřeném televizním okruhu (CCTV) [21].

Jak již bylo uvedeno, vodík hoří bleděmodrým plamenem (v čistém prostředí) a ve dne nevyzařuje viditelné světlo (sluneční záření může zastínit světlo vodíkového plamene) ani kouř, pokud není přidán např. sodík nebo nejsou spolu s hořlavou směsí do plamenů vneseny a spáleny prachové částice. V porovnání se spalováním uhlovodíků vyzařují vodíkové plameny podstatně méně tepla, takže člověk toto teplo fyzicky vnímá až při přímém styku s plamenem. Vodíkový požár může proto zůstat nezjištěn a šířit se navzdory přímému monitorování v oblastech, kde může vodík unikát, rozlévat se nebo hromadit, a tak vytvářet potenciálně hořlavé směsi. Hlásiče vodíkového požáru mohou v těchto situacích pomoci přijmout okamžitá opatření. Hlásiče vodíkového požáru mohou být buď pevné pro nepřetržité monitorování vzdálených provozů, nebo přenosné k použití v terénu.

Některé nejběžnější typy detektorů vodíku jsou shrnuty v tabulce 6 a podrobně popsány v následujících částech.

Tabulka 6. Typy požárních hlásičů vhodných pro vodíkové plameny.

Typ	Výhody	Nevýhody
UV/IR	Středně vysoká rychlost Středně vysoká citlivost Nízká míra falešných poplachů Není rušen výboji protipožární ochrany CO ₂ Samočinná autokontrola	Možnost falešných poplachů v případě kombinace IR a UV zdrojů Bývá osleповán hustým kouřem a výpary Cena
Trojité IR	Velmi vysoká citlivost Velmi vysoká rychlost	Cena
IR/vis zobrazování	Zobrazuje plamen Používá NASA	Cena

Pro efektivní a spolehlivé použití by měl hlásič vodíkového požáru splňovat následující kritéria:

- zachytit každý skutečný poplach,
- předcházet falešným poplachům,



- být specifický a zachytit signály vodíkového požáru mezi jinými signály, které se při zvýšení citlivosti detektoru ještě více rozšíří,
- omezenou dobu odezvy, zejména pokud spouští bezpečnostní akci.

Vodíkové požáry mají tendenci vyzařovat záření v širokém spektru vlnových délek a nevyznačují se extrémními píky na určitých frekvencích. Hlásiče vodíkového požáru se mohou spoléhat také na detekci světla v UV a IR spektru. Kromě samotného záření mohou být vodíkové plameny nepřímě viditelné díky svému silnému tepelnému účinku a turbulencím, tzv. „mihotání teplého vzduchu“ v okolní atmosféře. Optické detektory plamene detekují specifické spektrální záření emitované během hoření různými chemickými látkami (ionty, radikály, molekulami), které jsou buď meziprodukty, nebo konečnými produkty spalování. Chemické látky emitují záření o vlnových délkách charakteristických pro danou látku.

Hlavními emitujícími látkami při spalování vodíku jsou hydroxylový radikál (OH) a voda (H₂O). Tyto chemické látky emitují záření ve specifických spektrálních pásmech podle své elektronové struktury a typické energie (translace, vibrace, rotace) procesu.

- OH (jako aktivní meziprodukt s volným elektronem) silně emituje v UV spektrálním pásmu s píkem na frekvenci 0,306 a 0,282 μm a dalšími slabšími píky na frekvencích 0,180–0,240 μm . Vyzařuje také infračervenou energii v pásmu blízkém infračerveném spektru (vibrace a rotace molekuly) s několika píky ve spektrálním pásmu 1–3 μm .
- H₂O emituje především v pásmu blízkém infračerveném spektru (vibrace a rotace) se silnými píky v pásmech 2,7, 1,9 a 1,4 μm , a to od nejvyšší po nejnižší intenzitu.

Tyto detekční techniky předpokládají, že mezi plamenem a UV/IR detektorem se nenachází žádný rušivý štít. Ačkoli jsou k dispozici optické techniky pro zachycení těchto různých vlnových délek, hlavní problém spočívá v rozlišení signálů emitovaných vodíkovým plamenem od jiných potenciálních zdrojů, které emitují signály na podobné frekvenci a s podobnou intenzitou.

8.1.1 UV detektory

UV systémy se upřednostňují před infračervenými, protože jsou extrémně citlivé. Pravděpodobnost výskytu rušivého signálu je navíc nižší, pokud jsou UV detektory odstíněny proti slunečnímu světlu. Jejich nevýhodou je cena a nižší účinnost při použití u plamenů kapalného vodíku, protože mlha blokuje UV záření. To ostatně platí vždy, když je přítomna mlha. Falešné poplachy mohou být způsobeny náhodnými zdroji UV záření, jako jsou blesk nebo světlo z obloukového svařování. Hlavním problémem je schopnost detektoru rozlišit UV záření vyvolané slunečním světlem od vodíkových plamenů, aby se předešlo falešným poplachům. Lze použít různé techniky:

- Použití filtru k oddělení všech vlnových délek nad 0,29 μm , aby tyto vlnové délky zůstaly pouze pro případ nehody s vodíkovým požárem. I za slunečního dne totiž atmosféra filtruje vlnové délky slunečního záření pod navrhovanou prahovou hodnotou 0,29 μm .



Nevýhodou tohoto řešení je také skutečnost, že zkracuje takřka 2/3 UV pásma, a tím snižuje přesnost detektoru.

- Použití dvou souběžných buněk, které sledují stejnou zónu. Jedna z nich analyzuje především viditelné spektrum, kde převažuje signál slunečního světla ve srovnání se signálem emitovaným vodíkovým plamenem, zatímco druhá se zaměřuje na UV pásmo. UV signál z UV buňky se bere v úvahu pouze tehdy, pokud se liší od signálu ze souběžné buňky.
- V úvahu připadá také chování plamene v podobě blikání. V takovém případě by se zkoumala modulovaná část UV signálu. Tato technika však nemusí být slučitelná s potřebou rychlé reakce.
- A konečně, pokud je známo, že parazitní signály jsou zanedbatelné, lze předpokládat pozitivní signál vždy, když je dosaženo dané prahové hodnoty.

8.1.2 IR detektory

Bylo zmíněno, že mlha může bránit přenosu UV záření do buňky senzoru. IR detektory nejsou na tyto problémy citlivé. Kromě toho vodíkové plameny vyzařují významné množství infračerveného záření, takže je lze použít k detekci vodíkových plamenů. Hlavním úkolem zůstává stejně jako dříve rozlišit infračervené záření související s vodíkovým požárem od slunečního záření, jakýchkoli světelných zdrojů nebo jakýchkoli horkých materiálů. Zdroje infračerveného záření napájené alternativními elektrickými proudy lze filtrovat díky vlastnímu 100Hz modulovanému signálu. Horká tělesa ani sluneční světlo však nevykazují modulovaný signál, který by bylo možné zachytit a filtrovat.

Řešení spočívá v zaměření na vlnovou délku 1,7 μm , která odpovídá vrcholu emise páry.

8.1.3 Tepelné detektory

Tepelné detektory, např. teplotní čidla, detekují teplo plamene. Tepelné detektory pracují jako zařízení pro detekci rychlosti nárůstu teploty nebo přehřátí a zachycují sálavé, konvekční nebo vodivé teplo. Tyto spolehlivé hlásiče různých typů jsou vhodnými prostředky pro detekci vodíkového požáru, pokud jsou umístěny v těsné blízkosti místa vypuknutí požáru. Tyto hlásiče musí být umístěny v těsné blízkosti nebo přímo v místě vypuknutí požáru a nejsou specifické pro vodíkové plameny.

8.1.4 Zobrazovací systémy

Zobrazovací systémy jsou k dispozici především v tepelné infračervené oblasti a neposkytují nepřetržité monitorování s možností aktivace poplachu. K interpretaci toho, zda se na obrazu nachází plamen, je zapotřebí vyškolené obsluhy. UV zobrazovací systémy vyžadují speciální optiku a jsou velmi nákladné.

Jiné běžné typy požárních hlásičů, jako jsou hlásiče s ionizačními články, nejsou vhodné pro detekci vodíkového požáru.

8.2 Zmírňování vodíkových požárů

8.2.1 Regulace směru proudění

Směr vodíkového proudění musí být orientován tak, aby nedosáhl na osoby nebo zařízení. Například příruby (tj. součásti, u nichž je pravděpodobný únik vodíku) by měly být umístěny a směřovány tak, aby případný únik nezpůsobil dominový efekt.

8.2.2 Stínění nebo protipožární konstrukce

Jejich hlavním účelem je snížit rychlost přenosu tepla na potenciální cíle v blízkosti vodíkového tryskového požáru. O vlivu protipožárních konstrukcí a stěn jsme hovořili již v předchozí části této přednášky. Protipožární štíty jsou speciálně zkonstruovány tak, aby snižovaly dopadající sálavý tepelný tok tím, že zabráňují přímému dopadu plamene na zařízení, konstrukce a životní prostředí. Velmi důležitý je výběr materiálů, tloušťky, tlaku a tepelných účinků protipožárních štítů.

8.2.3 Zkrácení délky plamene

Přístupy ke zkrácení délky plamene jsou následující:

- Minimalizace průměru potrubí. Z analýzy tryskových požárů je zřejmé, že délka plamene a rozsah proudění závisí na průměru úniku. Jestliže zmenšení průměru potrubí není prakticky proveditelné, zvažte použití omezovačů průtoku (viz níže).
- Minimalizace tlaku, tj. jestliže systém funguje správně při tlaku 0,2 bar, podávejte vodík při této minimální hodnotě.
- Minimalizace zásob vodíku v systému.
- Jako zmírňující opatření lze použít protipožární stěny.
- Vyvarujte se umístění skladovacích prostor / zařízení PRD / potenciálních míst úniku v blízkosti podlahy nebo stěny, protože mohou vést k připojení proudění a k zesílení hořlavého proudění nebo tryskového požáru.

Použití omezovačů průtoku:

Pro zkrácení délky plamene, a tím i nebezpečné vzdálenosti v případě neplánovaného zapáleného úniku vodíku (požáru) je nutné použít omezovače průtoku v přívodním potrubí vodíku. Tlak v přívodním potrubí, průměr potrubí a ústí omezovače by měly konstrukčně omezovat hmotnostní průtok vodíku na technologickou úroveň, která je nutná pro fungování vodíkového systému. Minimalizace průměru potrubí by zkrátila délku plamene pro případ prasknutí celého potrubí v kterémkoli místě vedení od vysokotlakého zásobníku.

Omezovač průtoku se běžně umísťuje do potrubí bezprostředně za vysokotlaký zásobník [51]. Tabulka 7 ukazuje vliv omezovače na délku plamene z potrubí za předpokladu, že omezovač je v určité vzdálenosti od výstupu z protrženého potrubí (protržení v nezúženém průchodu).

Plamen by byl ještě kratší, kdyby se potrubí roztrhlo hned za omezovačem (v tomto případě je zkrácení délky plamene úměrné zmenšení průměru, tj. poměru průměrů potrubí a omezovače).

Obecné pravidlo pro výběr omezovače průtoku je následující:

$$\frac{L_F^{no\ restriction}}{L_F^{restrictor}} = \left(\frac{D_F^{no\ restriction}}{D_F^{restrictor}} \right)^{2/3} \quad (17)$$

Tabulka 7. Vliv omezovače průtoku na délku plamene [51].

Storage pressure (bar)	Diameter (mm)	Restrictor diameter (mm)	Mass flow rate (kg/s)	Lf (m)
200	5	none	0.2282599	7.2398781
200	5	1	0.0091304	2.3694419
250	25	none	7.0009354	41.511453
250	25	1	0.0112015	4.4462877
350	5	none	0.3780851	8.6254101
350	5	1	0.0151234	2.822894
350	5	2	0.0604936	4.5667726
450	8	none	1.2018387	15.166747
450	8	1	0.0187787	3.5821849
450	10	none	1.877873	19.132678
450	10	1	0.0187787	3.8705775
450	10	2	0.0751149	6.2616759
450	15	none	4.2252142	29.180099
450	15	1	0.0187787	4.4553255
700	10	none	2.6929877	21.682279
700	10	1	0.0269299	4.3863665
700	10	2	0.1077195	7.0961002
700	25	none	16.831172	56.280825
700	25	1	0.0269299	6.0282339

Teplotou ovládaná zařízení pro uvolnění přetlaku (TPRD):

Velmi účinným opatřením pro zkrácení délky plamene může být také nová generace zařízení TPRD nebo pojistných ventilů. Na univerzitě v irském Ulsteru probíhají práce na zkvalitnění stávající konstrukce zařízení TPRD coby zmírňujícího zařízení. Inovativní zařízení PRD výrazně zkrátí délku plamene vodíkového proudu ze současných 10 m a více přibližně na 1 až 2 m.

Yamazaki a Tamura [52] nedávno vyvinuli jednoduchou metodu ověřování aktivace zařízení TPRD na vyhaslých požářištích. Ověřovací technika je založena na měření koncentrace vodíku na výstupním otvoru plynu zařízení TPRD pomocí vodíkového hustoměru. Bylo zjištěno, že pomocí kontaktního hustoměru hořícího vodíku lze koncentrace vodíku přesahující 3 000 ppm měřit nepřetržitě po dobu přibližně jednoho měsíce u nádrží typu III a po dobu přibližně 24 hodin u lahví typu IV, a to i za nepříznivých zkušebních podmínek požáru vozidla [52].

8.2.4 Zařízení proti zpětnému vzplanutí a protiplamenná zařízení

Zařízení proti zpětnému vzplanutí je bezpečnostní prvek, který v případě zpětného vzplanutí uzavře průtok plynu. Zpětné vzplanutí je hoření směsi plamenem, ke kterému může dojít v systému řízení plynu. Ten se může vrátit zpět přes potrubí systému řízení plynu ke zdroji plynu, pokud není v potrubí umístěno zařízení proti zpětnému vzplanutí. Zařízení proti zpětnému vzplanutí uzavře průtok plynu a uhasí plamen dříve, než se dostane ke zdroji plynu. Protiplamenná zařízení jsou bezpečnostní prvky, které umožňují proudění hořlavých plynů a současně předcházejí jejich zapálení. Protiplamenná zařízení zabraňují přenosu plamene do jiné části zařízení tím, že ochlazuje nebo tlumí čelo plamene, případně tlumí vlnu spalování. Jsou navržena tak, aby pohlcovala a odváděla teplo plamene za specifických provozních a průtokových podmínek.

Protiplamenná zařízení neboli pohlcovače plamenů jsou zařízení, která slouží k prevenci šíření plamene potrubím nebo kanálem. Protiplamenným zařízením se obecně rozumí soustava úzkých průchodů, kterými může proudit plyn nebo pára, ale které jsou příliš malé na to, aby umožnily průchod plamene. Protiplamenná zařízení se obecně rozlišují na potrubní koncová nebo potrubní vestavná [8].

Existují tři typy protiplamenných zařízení [8]:

- Typ 1 – zařízení obsahující několik malých kanálků (rovinný vlnitý plech, vlnitá páska, drátěná gáza, perforovaná deska, perforovaný blok, slinutý kov, paralelní deska, drátěný svitek, plněné lože),
- Typ 2 – hydraulická zařízení,
- Typ 3 – rychlostní protiplamenná zařízení.

Fungování protiplamenných zařízení typu 1 se obecně řeší z hlediska mechanismu zhášení a tepelných ztrát. Žádoucími vlastnostmi protiplamenných zařízení jsou velká volná plocha průřezu, která je k dispozici pro proudění, nízký odpor proudění a absence překážek, vysoká schopnost absorbovat teplo z plamene a schopnost odolávat mechanickým nárazům, včetně výbuchu. Konstrukce protiplamenného zařízení závisí na vlastnostech hořlavé směsi a na jeho funkci a umístění [8].

Velikost otvoru v protiplamenném zařízení je určena vzdáleností zhášení hořlavé směsi. Průměr otvoru protiplamenném zařízení by měl být menší než zhášecí průměr nejméně o 50 %. Výkon protiplamenného zařízení je ovlivněn teplotou. Zhášecí vzdálenost se prodlužuje s rostoucí teplotou. Je přibližně nepřímou úměrná druhé odmocnině absolutní teploty. Hydraulická neboli kapalinová protiplamenná zařízení obsahují kapalinu, zpravidla vodu, která slouží k rozbití proudu plynu na bubliny a zabraňuje tak průchodu plamene [8].

Rychlostní protiplamenná zařízení se používají v aplikacích na konci potrubí. Jejich úkolem je zabránit přechodu plamene ze strany po proudu na stranu proti proudu. Princip jejich fungování



spočívá v tom, že rychlost plynu procházejícího protiplamenným zařízením je dostatečně vysoká na to, aby se předešlo šíření plamene zařízením ze strany za ním [8].

8.2.5 Použití tepelné izolace

Základním účelem tepelné izolace je snížit rychlost přenosu tepla na potenciální cíle, např. vodíkové nádrže, v blízkosti vodíkového tryskového požáru. Tepelné izolace se dosahuje obklopením zařízení materiály, které disponují pokud možno zejména těmito vlastnostmi:

- relativně nízká tepelná vodivost,
- nehořlavost a další vlastnost, že při vyšších teplotách neprodukuje kouř ani toxické plyny,
- spolehlivost výrobku, která zaručuje konzistentní jednotné ochranné vlastnosti,
- dostupnost ve formě, která umožňuje účinné a jednotné použití,
- dostatečná pevnost a trvanlivost přilnutí,
- odolnost vůči povětrnostním vlivům nebo erozi způsobené atmosférickými podmínkami.

Součástí strategie protipožární ochrany nádob se stlačeným plyným vodíkem mohou být protipožární nátěry (intumescentní nátěry) zajišťující tepelnou izolaci [21].

8.3 Hašení vodíkových požárů

Níže uvádíme doporučení z Národního školení o reakci na mimořádné události souvisejícími s vodíkem a palivovými články v USA z roku 2014.

Členové zásahových jednotek by měli:

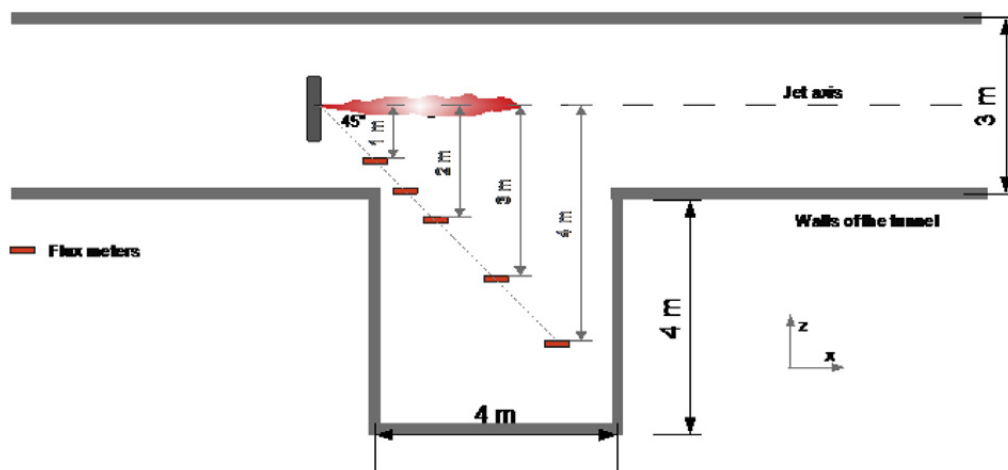
- poslouchat, zda nedochází k úniku plynu, a sledovat tepelné vlny, které by signalizovaly vodíkové plameny,
- pokud je nehody účastno pouze jedno FC vozidlo, přibližujte se pod úhlem 45° dle standardních postupů, s kopce a proti větru,
- je-li přítomen vodíkový požár:
 - pokud je to bezpečné, nechte zdroj vodíku vyhořet a chraňte sousední předměty; poté se přiblížte a oheň uhaste,
 - pokud je přítomen také požár uhlovodíků, zaútočte na požár přímým proudem vody z větší vzdálenosti, ale nesměřujte proud vody do odvětrávacího potrubí vodíkové nádrže. Kontrola šíření požáru a ochlazování nechráněných objektů;
 - je-li to možné, odvádějte nehořící vodík od zdrojů zapálení a v případě potřeby jej rozptylujte mlhou z proudnice,
 - na únik benzínu nebo motorové nafty v blízkosti FC vozidla použijte pěnu [53].

9. Výpočet délky plamene při požáru nedostatečně roztržštěného proudu

Tepelné nebezpečí požáru nedostatečně roztržštěného vodíkového proudu uvolněného z poškozeného tlakového zásobníku nebo z otevření zařízení TPRD numericky studovali Cirrone a kol. [54] na univerzitě v Ulsteru. Výsledky simulace byly porovnány s délkou plamene a sálavým tepelným tokem naměřenými při experimentu s horizontálním tryskovým požárem, který byl proveden ve francouzském institutu INERIS. Model je založen na Reynoldsově průměrované Navier-Stokesově rovnici (RANS) zachování hmoty, hybnosti, energie a látek. Pro modelování turbulence byl použit realizovatelný $k-\varepsilon$ model, protože lépe předpovídá rychlost šíření osově symetrických proudů [55].

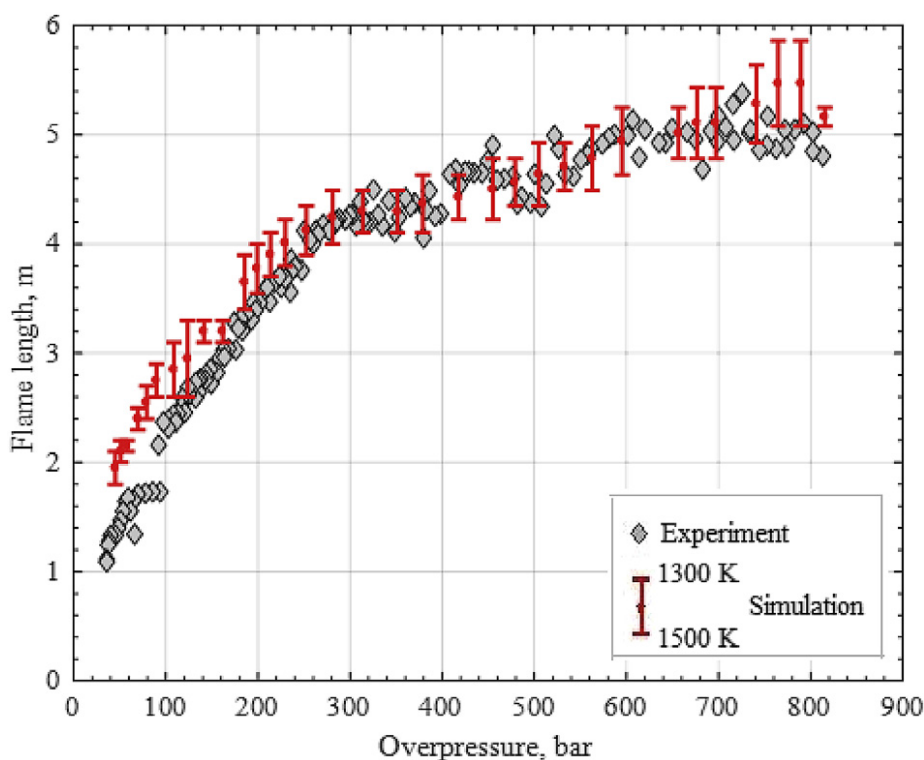
Výsledkem úniku vodíku ze zásobníku pod vysokým tlakem (930 bar) je nedostatečně roztržštěné proudění. Oblast, kde proudění expanduje na okolní tlak, je charakteristická přítomností rázových vln a nadzvukových rychlostí, což znemožňuje použití nestlačitelných kódů a vyžaduje vysoce přesné numerické sítě. Proto byl zdroj úniku modelován pomocí metody fiktivní trysky, kterou představila univerzita v Ulsteru [1]. Model je založen na rovnicích zachování hmoty a energie, zohledňuje neideální chování vodíku při extrémně vysokém tlaku pomocí Noble-Abelovy stavové rovnice a popisuje proces expanze jako izentropický. Proudění je charakterizováno rovnoměrnou zvukovou rychlostí a okolním tlakem ve fiktivní trysce, což výrazně zjednodušuje problém tím, že umožňuje vynechat simulaci rázových struktur a považovat proudění v pomyslné trysce za zcela roztržštěné. Úplný popis přístupu a použitých rovnic je k dispozici v dokumentu [1].

Na obrázku 39 je znázorněn detail prostoru výklenku a umístění pěti čidel měřících sálavý tepelný tok z plamene. Radiometry byly rozmístěny na přímce svírající s osou trysky úhel 45° . Délka plamene byla měřena pomocí videokamery umístěné ve vzdálenosti 5 m od plamene. Teplota a tlak v nádrži byly zaznamenávány po celou dobu úniku.



Obrázek 39. Podrobnosti o oblasti výklenku a poloze senzoru [54].

Simulovaná délka plamene byla vypočtena jako oblast plamene charakterizovaná rozsahem teplot 1 300–1 500 K podle experimentálních pozorování délky viditelného plamene provedených, jak je uvedeno v dokumentu [56]. Výsledná délka plamene je znázorněna červenými sloupci na obrázku 40, kde jsou simulace porovnány s experimentálními měřeními provedenými pomocí videokamery. Délka plamene je dobře reprodukována pro široký rozsah poklesu tlaku v nádrži, zatímco v závěrečné fázi uvolňování ($p < 200$ bar) je předpovídána nadměrně.



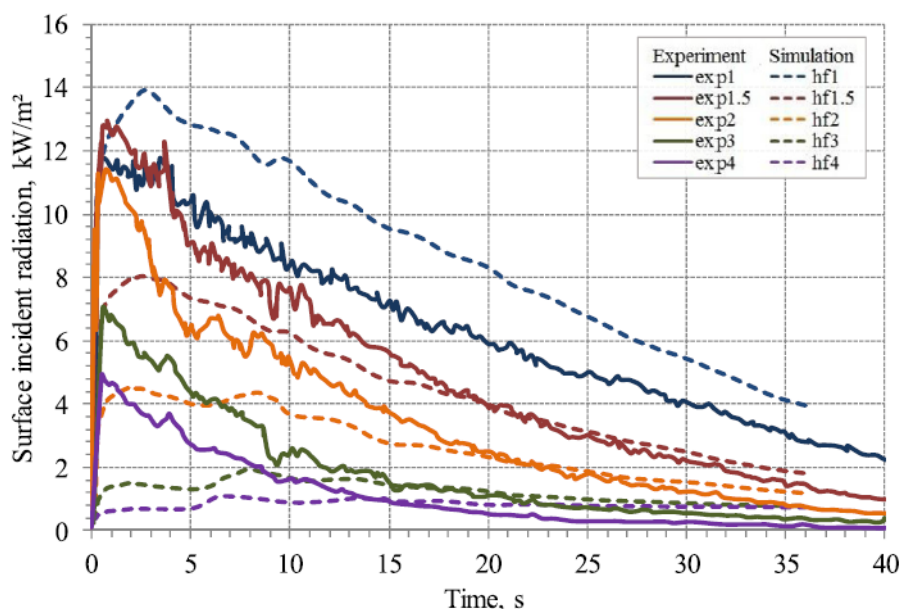
Obrázek 40. Délky plamene získané simulací a experimentem [54].

Obrázek 41 ukazuje srovnání experimentálních zářivých tepelných toků (plné čáry) se simulovanými (čárkované čáry). Číslování senzorů označuje vzdálenost od osy trysky. Během prvních 10 sekund a s výjimkou senzoru 1 simulace nesprávně odráží experimentální dynamiku radiačního tepelného toku, což vede k výraznému podhodnocení. Rozdílnost lze přičíst jak fyzikálním, tak numerickým faktorům.

- Především náhlé uvolnění a hoření vysokotlakého vodíku může způsobit pohyb a unášení prachových nebo jiných částic přítomných na povrchu, což by ovlivnilo objem záření a jeho intenzitu.
- Zadruhé, není známo přesné umístění výklenku, kde jsou senzory umístěny. Poloha stěn výklenku vzhledem k proudu ovlivňuje působení na senzory v celé délce plamene, což má vliv na zjištěný sálavý tepelný tok, zejména u senzorů 3 a 4.

- Experimentální pozorování vznícení vysokotlakých plynů navíc ukázala sférické rozšíření čela proudu během první fáze úniku (0–400 ms). Tato dynamika a fáze plamene nebyly při simulaci zjištěny.

Ačkoli v první fázi úniku (asi 10 sekund) došlo k nesrovnalostem v sálavém tepelném toku, ve druhé fázi se ukázala lepší shoda mezi experimentálními a simulovanými sálavými tepelnými toky. Navzdory vysoké míře shody mezi experimentální a simulovanou délkou plamene měla modelace sálavého tepelného toku dvojnásobně omezenou schopnost předpovědi v první fázi úniku vodíku ($t=0-10$ s) a poměrně dobrou shodu v pozdější fázi ($t=10-35$ s). To může naznačovat, že experimentální tepelný tok byl ovlivněn některými fyzikálními procesy, které nejsou v modelu CFD zohledněny, např. zachycení prachových částic v plameni trysky a jejich záření. První fáze uvolňování je však nejnebezpečnější, protože se vyznačuje největším tepelným vyzařováním a délkou plamene. Proto je prvořadé provést další numerická šetření, aby se dosáhlo vyšší reprodukovatelnosti experimentu.



Obrázek 41. Toky sálavého tepla získané simulací a experimentem [54].

10. Příslušné nástroje e-Laboratoře

10.1 Výpočet délky plamene

Tento model využívá bezrozměrnou korelaci délky plamene, jak ji popsali Molkov a Saffers [25] pro laminární a turbulentní plameny, požáry s dominujícím vztlakem a hybností, roztržité (podzvukové a zvukové) a nedostatečně roztržité (zvukové a nadzvukové) tryskové požáry, čímž pokrývá celé spektrum úniků s reakcí s vodíkem. Podrobný popis teorie byl uveden v části 3.3.2. Jediná závislost bezrozměrné délky plamene, L_F/D , je na parametrech na výstupu z trysky a na hustotě okolního vzduchu. Těmito parametry jsou

hustota, ρ_N , a rychlost, U_N , na výstupu z trysky. Hustotu a rychlost lze normalizovat jako ρ_N/ρ_S a U_N/C_N , v tomto pořadí. S využitím předpokladu, že tok kinetické energie na výstupu z trysky je zachovávaným skalárem procesu, je zaveden vztah mezi hustotou a rychlostí v rozměrové skupině jako $(\rho_N/\rho_S) \cdot (U_N/C_N)^3$, jak je uvedeno v rovnici (6). Tato bezrozměrná korelace délky plamene vodíku je znázorněna na obrázku 12.

Na základě této korelace lze vyvodit následující závěry:

- U podzvukového proudění (kde $M < 1$) závisí bezrozměrná délka plamene pouze na Machově čísle trysky, protože poměr hustoty ρ_N/ρ_S je pro roztržštěné proudy prakticky konstantní.
- U přiškrcených proudů (kde $M=1$) závisí bezrozměrná délka plamene pouze na hustotě vodíku na výstupu z trysky, ρ_N . Hustota se zvyšuje s růstem skladovacího tlaku a poklesem teploty.

Bezrozměrná korelace je ověřena v následujících limitech:

- v rozsahu tlaků pro skladování vodíku od takřka atmosférického až po 900 bar,
- při teplotách do 80 K,
- v rozsahu průměrů trysek od 0,4 do 51,7 mm.

Parametry proudění vodíku uvedené na obrázku 12 jsou buď převzaty přímo z experimentů (bezrozměrná délka plamene, L_F/D), nebo vypočteny pomocí teorie nedostatečně roztržštěného proudu (hustota, rychlost proudění a rychlost zvuku na výstupu z trysky) dle Molkova a kol. [57]. Podrobnosti o použitých experimentálních datech jsou popsány v publikaci Molkova a Safferse [58].

Při použití nástroje e-Laboratoř pro výpočet délky plamene (<https://elab-prod.iket.kit.edu/>) je třeba zvolit nástroj *Flame length correlation and three hazard distances for jet fires (Korelace délky plamene a tři nebezpečné vzdálenosti u tryskových požárů)*. Jak je znázorněno na obrázku 42, vstupní parametry zahrnují tlak vodíku v zásobníku p_1 , teplotu vodíku v zásobníku T_1 , průměr otvoru d_3 , tlak okolí p_4 a teplotu okolí T_{atm} .

Flame length correlation and three hazard distances for jet fires

H2 pressure in reservoir

p_1 20000000 Pa

H2 temperature in reservoir

T_1 293 K

Orifice diameter

d_3 0.003 m

Ambient pressure

p_4 101325 Pa

Ambient temperature

T_{atm} 293 K

Obrázek 42 Vstupní parametry nástroje Korelace délky plamene a tři nebezpečné vzdálenosti u tryskových požárů

Po výpočtu se získá délka plamene a tři různé nebezpečné vzdálenosti. Příklad výstupních parametrů je uveden na obrázku 43.

Flame length correlation and three hazard distances for jet fires

Name	Symbol	Value	Unit
H2 pressure in reservoir	p_1	2e+7	Pa
H2 temperature in reservoir	T_1	293	K
Orifice diameter	d_3	0.003	m
Ambient pressure	p_4	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Flame length	L_F	6.259	m

Obrázek 43 Výstupní parametry nástroje Korelace délky plamene a tři nebezpečné vzdálenosti u tryskových požárů.

Vypočtené délky plamene v závislosti na průměru zařízení TPRD v několika typických případech jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8 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

10.2 Roztříštěné a nedostatečně roztříštěné proudy

Teorie nedostatečně roztříštěného a roztříštěného proudu byla uvedena v přednášce 7 – Úniky nezapáleného vodíku ve venkovním prostředí a jejich zmírňování. V zásadě platí, že kritický tlakový poměr v netěsnosti, p^* , určuje, zda je proudění podzvukové nebo zvukové/nadzvukové.

$$p^* = \frac{p_1}{p_{atm}} = \left[\frac{(\gamma + 1)}{2} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (16)$$

Kritický tlakový poměr pro přechod ke zvukovému proudění vodíku je proto $\approx 1,9$. Je-li $p^* < 1,9$, proudění je podzvukové a roztříštěné, je-li větší než 1,9, výstupní rychlost zůstává lokálně zvuková a proud je nedostatečně roztříštěný. Výstupní tlak stoupá nad okolní tlak, což má za následek, že expanze až na okolní tlak, p_{atm} , probíhá mimo skutečnou trysku v místě za Machovým diskem, které se nazývá „fiktivní“ tryska nebo účinný průměr trysky.

Proto je třeba řešit různé sady rovnic v závislosti na tom, zda je proudění roztříštěné nebo neroztříštěné, přičemž sada rovnic pro neroztříštěné proudění je podrobně popsána v dokumentu [1].

Při použití nástroje e-Laboratoře pro výpočet roztříštěného a neroztříštěného proudění je třeba zvolit nástroj – *Similarity law for concentration decay in hydrogen expanded and under-expanded jets and unignited jet hazard distances* (Zákon podobnosti pro rozpad koncentrace v

roztržštěných a neroztržštěných vodíkových prouděch a nebezpečné vzdálenosti nezapáleného proudu). Vstupní parametry jsou stejné jako na obrázku 42. Po výpočtu se získá axiální vzdálenost od trysky s ohledem na různé koncentrace vodíku. Příklad výstupních parametrů je uveden na obrázku 44.

Similarity law for concentration decay in hydrogen expanded and under-expanded jets and unignited jet hazard distances

Name	Symbol	Value	Unit
H2 pressure in reservoir	p_1	3.5e+7	Pa
H2 temperature in reservoir	T_1	293	K
Orifice diameter	d_3	0.005	m
Ambient pressure	p_4	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Axial distance from nozzle to 4% by vol. H2	$X_{4\%,H_2}$	32.6212	m
Axial distance from nozzle to 8% by vol. H2	$X_{8\%,H_2}$	15.6793	m
Axial distance from nozzle to 11% by vol. H2	$X_{11\%,H_2}$	11.0593	m
Axial distance from nozzle to 16% by vol. H2	$X_{16\%,H_2}$	7.20885	m
Axial distance from nozzle to 29.5% by vol. H2	$X_{29.5\%,H_2}$	3.33269	m

Obrázek 44 Výstupní parametry nástroje Zákon podobnosti pro rozpad koncentrace v roztržštěných a neroztržštěných vodíkových prouděch a nebezpečné vzdálenosti nezapáleného proudu.

10.3 Výpočet nebezpečné vzdálenosti

Po uvolnění lze proudění rozdělit na tři typy: s plně dominující hybností, přechodové a s plně dominujícím vztlakem. Tato proudění byla podrobně popsána v přednášce 7 – Úniky nezapáleného vodíku ve venkovním prostředí a jejich zmírňování. Proudění s plně dominující hybností nejsou vztlakem ovlivněny, zatímco proudění s plně dominujícím vztlakem se rychle odklánějí z horizontálního do vertikálního směru proudění. Přechodové proudění jsou zpočátku v blízkosti trysky s dominující hybností a poté dále po proudu, jak klesá rychlost a zvětšuje se průměr proudění, se stávají proudění s dominujícím vztlakem. Při posuzování bezpečnostních vodíkových technologií je důležité vědět, kdy k tomuto přechodu dochází, protože okamžik přechodu má přímé důsledky na požadovanou separační vzdálenost pro zachování bezpečnosti.

Na základě provedených výpočtů délky plamene lze vypočítat požadovanou nebezpečnou vzdálenost při uvažování přímých plamenů s dominující hybností pro každé z níže uvedených kritérií.

Takzvaná „kritéria újmy“ pro člověka lze vyjádřit v podobě zranění nebo smrti [59].

Tato kritéria lze zapsat takto:

- limit „bez poškození“, 70 °C: $x = 3.5 \times L_F$,
- limit bolesti pro 5minutovou expozici, 115 °C: $x = 3.0 \times L_F$,
- popáleniny třetího stupně (20 s), 309 °C: $x = 2.0 \times L_F$.

Je třeba poznamenat, že autoři zvolili „kritéria újmy“, jak je definoval LaChance [59] coby základ pro výpočet separační vzdálenosti pouze pro demonstrační účely. Všeobecně přijímaný standard pro tento výpočet nebyl dosud na národní, evropské ani mezinárodní úrovni schválen.

Při použití nástroje e-Laboratoř pro výpočet tří nebezpečných vzdáleností u tryskových požárů je třeba zvolit nástroj – *Flame length correlation and three hazard distances for jet fires* (Korelace délky plamene a tři nebezpečné vzdálenosti u tryskových požárů). Vstupní parametry jsou stejné jako na obrázku 42. Po výpočtu se získá délka plamene a tři nebezpečné vzdálenosti („bez poškození“, „limit bolesti“ a „popáleniny třetího stupně“). Příklad výstupních parametrů je uveden na obrázku 45.

Flame length correlation and three hazard distances for jet fires

Name	Symbol	Value	Unit
H2 pressure in reservoir	p_1	2e+7	Pa
H2 temperature in reservoir	T_1	293	K
Orifice diameter	d_3	0.003	m
Ambient pressure	p_A	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Flame length	L_F	6.259	m
No harm (70°C) separation distance	X_{70}	21.9065	m
Pain limit (5 mins, 115°C) separation distance	X_{115}	18.777	m
Third degree burns (20 sec, 309°C) separation distance	X_{309}	12.518	m

Obrázek 45 Výstupní parametry nástroje Korelace délky plamene a tři nebezpečné vzdálenosti u tryskových požárů.

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. BRHS, Dvouletá zpráva o vodíkové bezpečnosti (2007). Síť excellence HySAFE. K dispozici na adrese: <http://www.hysafe.org/BRHS> [přístup k datu 25.11.2020].
9. Kanury, AM (1975). Úvod do spalovacích jevů: (pro požární, spalovací, znečišťující a energetické aplikace). New York; Londýn: Gordon a Breach.
10. Teodorczyk, A (2006). Fast deflagration, deflagration to detonation transition (DDT) and direct detonation of hydrogen-air mixtures. (Rychlá deflagrace, přechod od deflagrace k detonaci (DDT) a přímá detonace směsí vodíku se vzduchem). Výukové materiály Evropské letní školy o bezpečnosti vodíku, 2006.
11. Kalghatgi, GT (1981). Stabilita difuzních plamenů v proudu plynu při vyfouknutí. Část I: v klidném vzduchu. Odborný časopis Věda a technologie spalování. Svazek 26(5), s. 233–239.
12. Matta, LM, Neumeier, Y, Lemon, B a Zinn, BT (2002). Charakteristiky difúzních plamenů v mikroměřítku. Sborník příspěvků ze sympozia *Proceedings of the Combustion Institute*, svazek 29, s. 933–938.
13. Cheng, TS, Chen, CP, Chen, CS, Li, YH, Wu, CY a Chao, YC (2006). Charakteristiky difúzních plamenů metanu v mikrotryskách. Odborný časopis Teorie a modelování spalování *Combustion Theory and Modelling*, 10, s. 861–881.
14. Butler, MS, Moran, CW, Suderland, PB a Axelbaum, RL (2009). Limity pro úniky vodíku, které mohou podporovat stabilní plameny. Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 34. s. 5174–5182.
15. Sunderland, PB (2010). Hydrogen microflame hazards, Proceedings of the 8th International Short Course and Advanced Research Workshop in the series “Progress in Hydrogen



Safety”, První aplikace vodíku a palivových článků na trhu, 11.–15. října 2010, University of Ulster, Belfast.

16. Hawthorne, WR, Weddell, DS a Hottel HC (1949). Mixing and combustion in turbulent gas jets (Směšování a spalování v turbulentním proudění plynů), Třetí mezinárodní sympozium o jevech souvisejících se spalováním, plameny a výbuchy, s. 266–288, Baltimore, USA.
17. Hottel, HC a Hawthorne, WR (1949). Diffusion in laminar flame jets (Difuze v laminárním proudění plamenů). Sborník ústavu Combustion Institute. Svazek 3, s. 254–266.
18. Brennan, S, Makarov, D a Molkov, V (2009). LES of high pressure hydrogen jet fire (LES of high pressure hydrogen jet fire (LES vysokotlakého tryskového požáru vodíku). Časopis o prevenci vzniku škod ve zpracovatelském průmyslu Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Svazek 22(3), s. 353–359.
19. Baev, VK a Yasakov, VA (1974). Effect of lifting forces on the length of diffusion flames (Vliv vztahových sil na délku difúzních plamenů). Spalování, výbuch a rázové vlny. Svazek 10, s. 752–758.
20. Shevyakov, GG a Komov, VF (1977). Effect of non-combustible admixtures on length of an axisymmetric on-port turbulent diffusion flame (Vliv nehořlavých příměsí na délku osově symetrického turbulentního difúzního plamene na vstupu). Spalování, výbuch a rázové vlny. Svazek 13, s. 563–566.
21. 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].
22. Kalghatgi, GT (1984). Lift-off heights and visible lengths of vertical turbulent jet diffusion flames in still air (Výška oddělení plamene a viditelné délky vertikálních turbulentních proudových difúzních plamenů v klidném vzduchu). Odborný časopis Věda a technologie spalování. Svazek 41, s. 17–29.
23. 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.
24. Schefer, RW, Houf, WG, Williams, TC, Bourne, B a Colton, J (2007). Characterization of high-pressure, underexpanded hydrogen-jet flames (Charakterizace plamenů ve vysokotlakých nedostatečně roztržštěných vodíkových prouděch). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 32, s. 2081–2093.
25. Molkov, V a Saffers, J-B (2013). Hydrogen jet flames (Vodíkové tryskové plameny). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 38, s. 8141–8158.

26. Proust, C, Jamois, D a Studer, E (2009). High pressure hydrogen fires (Požáry vysokotlakého vodíku). *Sborník 3. mezinárodní konference o vodíkové bezpečnosti*. 16.–18. září 2009, Ajaccio, Francie, příspěvek 214.
27. 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.
28. EIGA, Evropské sdružení technických plynů (2007). Stanovení bezpečnostních vzdáleností. Dokument IGC 75/07/E.
29. BSI British Standards Institution (2004). Zveřejněný dokument PD 7974-6:2004. Uplatnění zásad požárně bezpečnostního inženýrství při projektování požární bezpečnosti staveb – Část 6: Lidské faktory: Strategie ochrany života – evakuace, chování a stav obyvatel (podsystem 6).
30. DNV Technica (2001). Human resistance against thermal effects, explosion effects, toxic effects and obscuration of vision (Odolnost člověka proti tepelným účinkům, účinkům výbuchu, toxickým účinkům a omezení zrakových funkcí). DNV Technica, Scandpower A/S, Det Norske Veritas, Oslo, Norsko.
31. BSI British Standards Institution (1997). Britská norma 7899:1997. Code of practice for assessment of hazard to life and health from fire (Kodex pro posuzování ohrožení života a zdraví v důsledku požáru). Guidance on methods for the quantification of hazards to life and health and estimation of time to incapacitation and death in fires (Pokyny k metodám kvantifikace nebezpečí pro život a zdraví a odhadu doby k dosažení nezpůsobilosti a smrti při požárech).
32. Barlow, RS a Carter, CD (1996.) Relationships among Nitric Oxide, Temperature, and Mixture Fraction in Hydrogen Jet Flames. (Vztahy mezi oxidem dusnatým, teplotou a podílem směsi ve vodíkových tryskových plamenech). *Combustion and Flame (Spalování a plamen)*. Svazek 104, s. 288–299.
33. Imamura, T, Hamada, S, Mogi, T, Wada, Y, Horiguchi, S, Miyake, A a Ogawa, T (2008). Experimental investigation on the thermal properties of hydrogen jet flame and hot currents in the downstream region (Experimentální zkoumání tepelných vlastností tryskového vodíkového plamene a horkých proudů v dolní části proudění). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy*. Svazek 33, s. 3426–3435.
34. Royle, M a Willoughby, DB (2009). Consequences of catastrophic releases of ignited and unignited hydrogen jet releases (Důsledky katastrofického zapáleného i nezapáleného úniku vodíku). *3. mezinárodní konference o bezpečnosti vodíku, Ajaccio, Francie*.

35. Mogi, T a Horiguchi, S (2009). Experimentální studie nebezpečnosti vysokotlakých vodíkových tryskových difúzních plamenů. Časopis o prevenci vzniku škod ve zpracovatelském průmyslu Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Svazek 22, s. 45–51.
36. Makarov, D a Molkov, V. (2013). Rovinné vodíkové trysky. Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 38 (19), s. 8068–8083.
37. Shevyakov, GG a Savelieva, NI (2004). Dispersion and combustion of hydrogen jet in the open atmosphere (Rozptyl a spalování vodíkového proudu v otevřené atmosféře). International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (Mezinárodní vědecký časopis pro alternativní energii a environmentální vědy). Sv. 1(9), s. 23–27 (v ruštině).
38. HYPER (2008), projekt FP6 STREP „Installation Permitting Guidance for Hydrogen and Fuel Cells Stationary Applications“ (Pokyny k povolování zřízení vodíkových zařízení a zařízení s palivovými články ve stacionárních aplikacích). Výstup 4.3 Releases, Fires and Explosions (Úniky, požáry a výbuchy). Závěrečná zpráva WP4.
39. 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.
40. Molina, A, Schefer, RW a Houf, WG (2007). Radiative fraction and optical thickness in large-scale hydrogen-jet fires (Radiační podíl a optická tloušťka při rozsáhlých tryskových požárech vodíku). Sborník ústavu Combustion Institute. Svazek 31, s. 2565–2572.
41. 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].
42. 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.
43. Statistiky požárů, Velká Británie, 2011–2012. Ministerstvo obcí a místní samosprávy.
44. 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.
45. 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].

46. 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.
47. 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].
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. Projekt HyIndoor, výstup D4.2 – První průběžná zpráva o analytických, numerických a experimentálních studiích (2014).
52. Yamazaki, K a Tamura, Y (2015). Study of a Post-fire Verification Method for the Activation Status of Hydrogen Cylinder Pressure Relief Devices. (Studie metody verifikace stavu aktivace přetlakových zařízení vodíkových lahví po požáru). 6. mezinárodní konference o vodíkové bezpečnosti, 19.–21. října 2015, Jokohama, Japonsko.
53. 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 25.11.2020].
54. Cirrone DMC, Makarov D, Molkov V. Simulation of thermal hazards from hydrogen under-expanded jet fire (Simulace tepelné nebezpečnosti nedostatečně roztříštěného tryskového požáru vodíku). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy 2019,44:8886–8892.
55. ANSYS Fluent. Průvodce teorií. 2016.
56. Schefer R, Houf B, Bourne B, Colton J. Experimental measurements to characterize the thermal and radiation properties of an open-flame hydrogen plume (Experimentální měření pro charakterizaci tepelných a radiačních vlastností otevřeného vodíkového plamene). Uvedeno v: Sborník příspěvků z 15. výroční konference a výstavy o vodíku; 2004.

57. Molkov, V., Makarov, D. a Bragin, M., „Physics and modeling of under-expanded jets and hydrogen dispersion in atmosphere“ (Fyzika a modelování nedostatečně roztráštěných trysek a rozptylu vodíku v atmosféře), sborník 24. mezinárodní konference o interakci intenzivních energetických proudů s hmotou, 1.–6. března 2009, Elbrus, Rusko, 2009, s. 146.
58. Molkov, V. a Saffers, J.-B., příspěvek „The correlation for non-premixed hydrogen jet flame length in still air“ (Korelace nepremixovaného vodíkového tryskového plamene v klidném vzduchu) přednesený na 10. mezinárodním sympoziu o požární bezpečnosti, 19.–24. června 2011, s. 933–943.
59. LaChance, J.L., příspěvek „Progress in risk assessment methodologies for emerging hydrogen applications“ (Pokrok v oblasti metodik pro posuzování rizik v nových aplikacích vodíku) přednesený na šestém mezinárodním krátkém kurzu a pokročilém výzkumném semináři „Progress in Hydrogen Safety - Regulations, Codes and Standards“ (Pokrok v oblasti vodíkové bezpečnosti – nařízení, předpisy a normy), 25.–29. ledna 2010, Belfast, Severní Irsko, 2010.
60. Wang H., Duncan I.J. Likelihood, causes, and consequences of focused leakage and rupture of U.S. natural transmission pipelines (Pravděpodobnost, příčiny a důsledky vybraných úniků a protržení dálkových plynovodů v USA). J. Loss Prevent. Proc. 2014, 30: 177–187.
61. Ministerstvo dopravy USA. Úřad pro bezpečnost potrubí a nebezpečných materiálů. (2010). <https://primis.phmsa.dot.gov/comm/publications/PIPA/PIPA-PipelineRiskReport-Final-20101021.pdf>
62. Lowesmith B.J., Hankinson G. Large scale high pressure jet fires involving natural gas and natural gas/hydrogen mixtures (Rozsáhlé vysokotlaké tryskové požáry zemního plynu a směsí zemního plynu s vodíkem). Bezpečnost procesů a životního prostředí 2012, 90: 108–120.
63. EGIG, Události na plynovodech, 8. zpráva Evropské datové skupiny pro události na plynovodech, EGIG 14.R.0403 (2011).
64. Casal J., Gomez-Mares M., Munoz M., Palacios A. Jet fires: a "minor" fire hazard? (Tryskové požáry: „druhořadé“ nebezpečí požáru?) Chem. Eng. Trans. 2012, 26: 13–20.
65. Houf W., Schefer R. 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, 2007, 32: 136–151.
66. Lin CL, Chien CF. Systems thinking in a gas explosion accident e lessons learned from Taiwan (Systémové myšlení při nehodě způsobené výbuchem plynu a poučení z Tchaj-



- wanu). Časopis Loss Prevention in the Process Industries 2019, Prevence ztrát ve zpracovatelském průmyslu) (62) 103987.
67. EIGA. Determination of safety distances (Stanovení bezpečnostních vzdáleností) (dokument IGC 75/07/E). 2007. <https://www.eiga.eu/publications/eiga-documents/doc-7507-determination-of-safety-distances/> [přístup k datu 12.02.2020].
68. Gomez-Mares M., Zarate L., Casal J. Jet fires and the domino effect (Tryskové požáry a dominový efekt). Časopis o požární bezpečnosti Fire Safety Journal 2008, 43: 583–588.
69. Cirrone DMC, Makarov D, Molkov V. Simulation of thermal hazards from hydrogen under-expanded jet fire (Simulace tepelné nebezpečnosti nedostatečně roztržitého tryskového požáru vodíku). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy 2019, 44: 8886–8892.
70. Wang Z, Shui K, You F, Dederichs AS, Markert F, Jiang J, Zhang Y, Li D, Fu Z, Xu J, He L, Huangfu W. Prediction of the failure probability of the overhead power line exposed to large-scale jet fires induced by high-pressure gas leakage (Předpověď pravděpodobnosti poruchy nadzemního elektrického vedení vystaveného rozsáhlým tryskovým požárům vyvolaným únikem vysokotlakého plynu). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy 2021, 46: 2413–2431.
71. Coccorullo I, Russo P. Jet fire consequence modeling for high-pressure gas pipelines (Modelování následků tryskového požáru pro vysokotlaké plynovody), Mezinárodní konference o výpočetních metodách ve vědě a technologiích, 2016 (iccmse 2016).
72. 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.