



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 7

Úniky nezapáleného vodíku ve venkovním prostředí a jejich zmírňování

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

Po nežádoucím úniku vodíku dochází k mísení uniklého plynu se vzduchem, čímž vznikají počáteční podmínky pro nebezpečí požáru a výbuchu. K nezapáleným únikům vodíku se řadí únik stlačeného plynného vodíku skladovaného pod vysokým tlakem v systémech a infrastruktuře FCH. Havarijní úniky stlačeného plynného vodíku se dělí do dvou hlavních kategorií: permeační úniky a vysokotlaké proudy. Jednou z důležitých otázek pro členy zásahových jednotek je, zda únik plynného vodíku způsobí vznik hořlavé směsi se vzduchem. Pomocí zákona podobnosti a teorie o nedostatečně roztržitém proudu dokáží členové zásahových jednotek vyhodnotit velikost hořlavé vodíkové obálky a vypočítat rozpad koncentrace vodíku podél osy proudění. Kromě toho se členové zásahových jednotek naučí, jak vypočítat dobu poklesu tlaku a posoudit dynamiku tlaku ve skladovací nádrži se známým objemem. V závěru této přednášky se posluchači obeznámí s prostředky pro zkrácení nebezpečné vzdálenosti od místa úniku a s opatřeními pro prevenci/zmírnění/detekci úniku nezapáleného vodíku.

Klíčová slova

Nezapálený únik, zákon podobnosti, teorie nedostatečně roztržitého proudu, vodíková obálka, rozpad koncentrace vodíku, pokles tlaku, nebezpečná vzdálenost, zmírňující opatření, detekce

Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova	3
1. Cílové publikum	5
1.1 Popis úlohy: Specialista	5
1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Specialista	5
1.3 Předchozí učení: Specialista	5
2. Úvod a cíle.....	6
3. Užitečné definice	7
4. Úniky stlačeného vodíku	7
4.1 Roztříštěné a nedostatečně roztříštěné proudy	9
4.2 Podzvukové, zvukové a nadzvukové proudění	10
4.3 Proudění s dominující hybností a s dominujícím vztlakem	11
5. Rozpad koncentrace vodíku v proudění s dominující hybností	12
6. Zkrácení nebezpečné vzdálenosti od úniku vodíku.....	19
6.1 Kdy se proud stává vztakovým?	20
6.2 Co se rozumí bezpečným průměrem zařízení PRD?.....	22
7. Pokles tlaku v zásobníku stlačeného vodíku	23
8. Prevence úniků vodíku	28
9. Zmírňující opatření pro únik nezapáleného vodíku	29
10. Detekce úniků vodíku	30
11. Nástroje e-Laboratoře pro příslušné jevy.....	35
11.1 Model parametrů proudění	35
11.2 Zákon podobnosti pro rozpad koncentrace a nebezpečnou vzdálenost.....	36
11.3 Výpočet vztlaku.....	38
Poděkování	39
Literatura a odkazy	39



1. Cílové publikum

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

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

1.1 Popis úlohy: Specialista

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

1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Specialista

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

1.3 Předchozí učení: Specialista

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

2. Úvod a cíle

Nežádoucí únik vodíku může být způsoben buď poruchou zařízení, nebo ztrátou těsnosti systému FCH. Důsledky této události mohou být různé v závislosti na vlastnostech úniku a umístění jeho zdroje, tj. ve vnitřních nebo venkovních prostorech. Je-li únik zpočátku nezapálený, stále existuje možnost, že se po určitém zpoždění zapálí, jestliže se v cestě úniku nachází zdroj zapálení. Dojde-li k úniku vodíku ve vnitřních prostorech, budou následky závažnější než v případě úniku venku, protože v uzavřeném prostoru může vznikat výbušná atmosféra. Všechny tyto důsledky mohou mít dopady na člověka, konstrukce a životní prostředí. I drobné incidenty mohou eskalovat a vést až ke katastrofickým následkům.

Tato přednáška je zaměřena především na nezapálené úniky vodíku v otevřeném prostředí. V přednášce je uvedena klasifikace úniků stlačeného vodíku a užitečná terminologie. Členové zásahových jednotek se obeznámí se zákonem podobnosti a teorií neroztříštěného proudu, které jim umožní posoudit rozpad koncentrace vodíku a stanovit nebezpečnou vzdálenost od místa úniku k dolní mezi hořlavosti nebo k jakékoli jiné důležité koncentraci. Tato přednáška obsahuje podrobný popis způsobů, jak zkrátit nebezpečné vzdálenosti od zdroje úniku vodíku. Pojednává také o opatřeních pro prevenci a zmírnění/detekci úniků nezapáleného vodíku ze zásobníků stlačeného vodíku.

Na konci této přednášky budou členové zásahové jednotky schopni:

- klasifikovat nezapálené úniky vodíku (úniky/tryskání) a rozlišovat mezi permeací, podzvukovými, zvukovými a nadzvukovými proudy, roztříštěnými a nedostatečně roztříštěnými proudy, jakož i mezi proudy s dominující hybností a proudy s dominujícím vztlakem,
- posoudit rozpad koncentrace vodíku prouděch s dominující hybností pomocí příslušného nomogramu,
- předvídat vzdálenost, ve které ve vodíkovém proudu převáží vztlak,
- vypočítat velikosti hořlavé vodíkové obálky, tj. stanovit nejvzdálenější bod od zdroje úniku, ve kterém může dojít k zapálení proudu,
- posoudit bezpečné rozměry TPRD (tepelně aktivovaného přetlakového zařízení) s ohledem na prevenci vzniku hořlavé vodíkové vrstvy pod stropem uzavřené místnosti,
- vypočítat dobu poklesu tlaku v nádržích na stlačený vodík s různým objemem,
- Rozpoznat prostředky pro zkrácení nebezpečné vzdálenosti od místa úniku,
- uvést hlavní techniky prevence vzniku vodíkových proudů,
- rozpoznat opatření pro zmírňování následků úniku vodíku,
- uvést způsoby detekce úniků vodíku.

3. Užitečné definice

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

Roztříštěný proud je proudění s tlakem, který je na výstupu z trysky roven atmosférickému tlaku.

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

Permeace je průnik atomů, molekul nebo iontů do porézní nebo propustné látky nebo skrz ni.

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 (dle návrhu definice v normě ISO TC197).

Nedostatečně roztříštěný proud je proudění, u něhož je tlak na výstupu z trysky vyšší než atmosférický tlak.

4. Úniky stlačeného vodíku

Jak je již známo z předchozích přednášek, vozidla s pohonem FC jsou vybavena palubními zásobníky vodíku s tlakem až 70 MPa a infrastruktura pro doplňování paliva pracuje s tlakem až 100 MPa [1]. Vzhledem k malé velikosti molekuly je vodík velmi náchylný k úniku. K únikům vodíku dochází převážně z ventilů a spojů [2], a to jak v interiéru, tak v exteriéru. Úniky mohou být nezapálené (tj. nereagující) nebo zapálené (tj. reagující). Přestože úplné prasknutí potrubí nebo protržení nádoby je poměrně vzácné, mělo by být považováno za věrohodný nejhorší možný scénář. Proto je třeba věnovat prevenci nežádoucího uvolňování vodíku zvláštní úsilí. Uvolnění vodíku prostřednictvím PRD nebo v důsledku prasknutí potrubí způsobuje vznik vysokotlakých proudů vodíku.

Tabulka 1 obsahuje přehled typů úniku vodíku a zařízení nebo součástí, které bývají jejich zdrojem [3].

Tabulka 1. Zdroje úniků a scénáře vypracované EIGA (2007) [3]

Zařízení/součást	Typ úniku
Potrubí	Malé dírký, rozbočení potrubí
Příruby	Porucha těsnění, pohyby v důsledku působení tepla, průhyby materiálu
Svary	Praskliny ve svaru
Pájená spojení	Praskliny v pájce, roztavení pájky

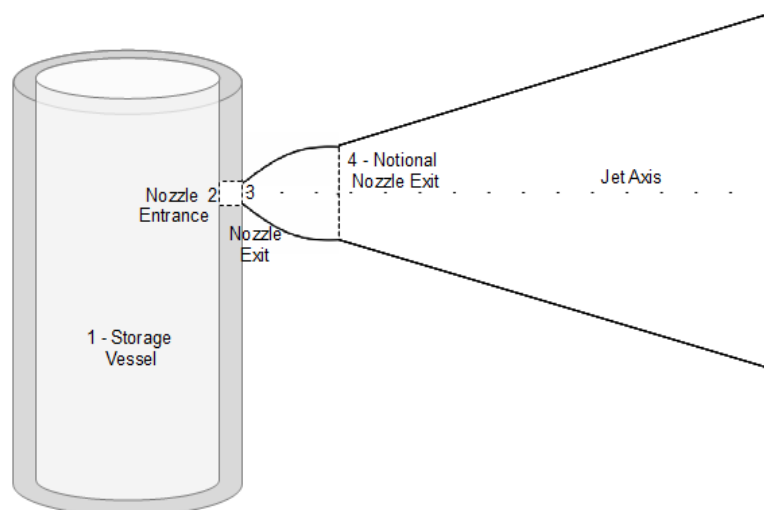
Závitové potrubní spoje	Pohyby v důsledku působení tepla, úniky
Šroubové spoje	Netěsnost, závada těsnění, průhyby, oddělení materiálu
Hadicové spoje	Závada těsnění, oddělení materiálu, lidská chyba
Ventily	Netěsnost dráhy, závada těsnění, oddělení víka/tělesa ventilu v důsledku nárazu
Hadice	Perforace
Nástroje	Protržení prvku
Regulátory	Prasknutí diafragmy, závada těsnění, prasknutí v následných částech (přetlak)
Elektromagnetické ventily	Závada těsnění
Čerpadla	Perforace, závada těsnění
Válce	Perforace, protržení, permeační netěsnost

Typické průtoky uvolňovaného vodíku mohou být značně různé, od 10^{-5} g/s u permeačních úniků až po 10^5 g/s v případě úniků na vodíkovém potrubí. Podle evropského nařízení o schválení typu vozidel na vodíkový pohon (2010) je *bezpečná rychlost permeace* pro vozidla s FC při teplotách 15 a 20 °C omezena na 6 a 8 ml/h na 1 l objemu zásobní nádrže [4]. To znamená, že u vodíkového zásobníku s objemem 170 l bude rychlost permeace činit $2,53 \times 10^{-5}$ g/s. Průtok při úniku z prasklého potrubí (u 150kW FC) bude činit přibližně 3 g/s. Únik z průmyslového potrubí (průměr 30 cm) při tlaku $p = 2,5$ MPa bude mít průtok 100 kg/s. V současné době se při uvolňování prostřednictvím PRD (s průměrem 5,08 mm) ze zásobníku při tlaku 35 MPa vytvoří průtok 390 g/s.

Uvolňování vodíku permeací se liší od proudění a tryskání: vodík se uvolňuje pomalu, ve velmi malém množství, rovnoměrně podél povrchu skladovacího zásobníku. Rychlost permeace vodíku konkrétním materiálem závisí na několika faktorech, např. na teplotě, vnitřním tlaku a tloušťce membrány. Čím vyšší je skladovací tlak, tím vyšší je rychlost permeace (viz přednášku 3 „Skládání vodíku“). Rozptyl prostupujícího vodíku ovlivňují tři hlavní jevy: vztlak, difuze a přirozená ventilace. Pronikající vodík se v místnosti podobné garáži rozdělí homogenně [5]. Maximální přípustná rychlost permeace v místnosti podobné garáži činí při 20 °C pro osobní automobil 8 ml/hod/l a pro autobus s FC 5 ml/hod/l [6]. Simulace provedené v rámci projektu HySAFER na Ulsterské univerzitě prokázaly, že při této míře permeace nepředstavuje rozptyl vodíku v typické garáži problém [5].

Neplánované uvolnění vodíku skladovaného pod vysokým tlakem může vytvořit silně *nedostatečně roztržštěný* (tlak na výstupu z trysky je vyšší než atmosférický tlak) turbulentní proud, který se chová jinak než proudy *roztržštěné* (tlak na výstupu z trysky je roven atmosférickému tlaku). Na tento jev byly v minulosti provedeny podrobné studie. Schematické

znázornění úniku vodíku z vysokotlakého skladovacího zásobníku je uvedeno na obrázku 1. Většina úniků ze skladovacích zásobníků a zařízení bude mít přinejmenším zpočátku podobu nedostatečně roztržitého proudu [1].



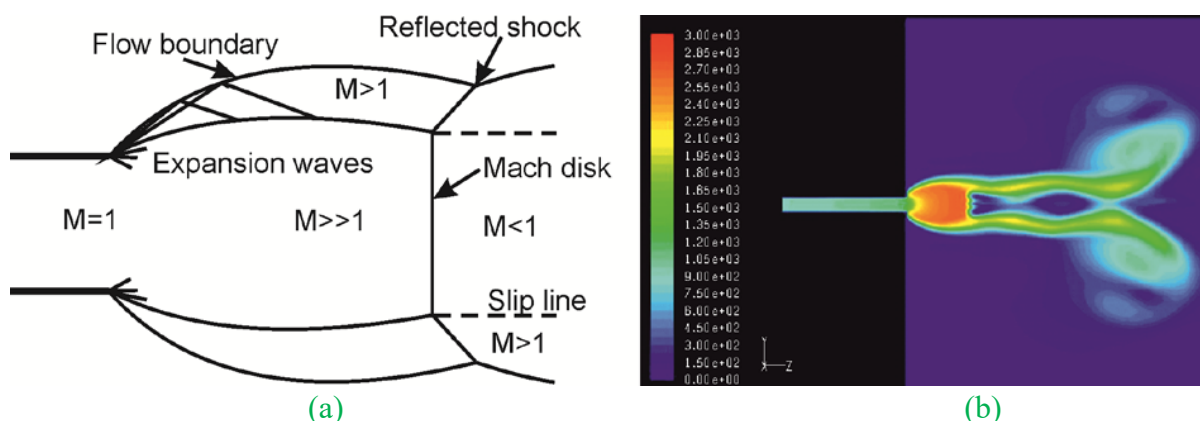
Obrázek 1. Schéma uvolňování vodíku z vysokotlakého skladovacího zásobníku.

4.1 Roztržitěné a nedostatečně roztržitěné proudy

Vodíkové proudy mohou být roztržitěné, nebo nedostatečně roztržitěné. *Roztržitěný proud* je proudění s tlakem, který je na výstupu z trysky roven atmosférickému tlaku. U *nedostatečně roztržitěného proudutlak* na výstupu z trysky ještě neklesl zcela na úroveň atmosférického tlaku. Při vysokém tlaku zůstává rychlost na výstupu z trysky lokálně sonická, ale výstupní tlak stoupá nad úroveň okolního tlaku. V důsledku toho dochází vně trysky k expanzi na okolní podmínky [1]. Kritický poměr mezi tlakem v zásobníku a okolním tlakem pro vytvoření zvukového (škrceného) proudění stlačitelného plynu činí přibližně 1,9 při STP. Je-li tlakový poměr nižší než 1,9, pak je proudění plynu v ústí roztržitěné (podzvukové). V opačném případě, při poměru vyšším než 1,9, se uvolňování považuje za nedostatečně roztržitěné (zvukové nebo škrcené) proudění.

U nedostatečně roztržitěného proudu dochází k expanzi proudění v blízkosti výstupu z trysky. Expanze je charakterizována složitou rázovou strukturou, která je dobře zdokumentována a publikována v jiných dokumentech [7]. Schéma pro rázovou strukturu nedostatečně roztržitěného proudu je uvedeno na obrázku 2a. Na tomto schématu je vidět rozložení *Machova čísla* (M nebo Ma), což je bezrozměrné číslo, které se rovná poměru rychlosti proudění v konkrétním místě k rychlosti zvuku v konkrétním místě. *Machův disk* je silný ráz, který se běžně formuje ve směru ve směru nedostatečně roztržitěného proudu. Na obrázku 2b je

znázorněna numericky simulovaná počáteční fáze uvolňování nedostatečně roztržštěného proudu vodíku při poměru tlaku v zásobníku a atmosférického tlaku 160.



Obrázek 2. (a) Schéma struktury nedostatečně roztržštěného proudu [8]; (b) počáteční fáze uvolňování nedostatečně roztržštěného proudu při tlaku 16,1 MPa kanálem s průměrem 0,25 mm a hmotnostním průtokem 0,46 g/s [1].

Jak je znázorněno na obrázku 2a, na výstupu z trysky se vytvoří lokální zvuková rychlost s Machovým číslem $M = 1$. Poté dochází k prudké expanzi vycházejícího plynu, která se zrychluje až k vysokým Machovým číslům ($\gg 1$, až $M = 8$ při skladovacím tlaku 70 MPa) a současně klesají tlak a hustota. Na výstupní hraně trysky se vytvoří řada expanzních vln. Tyto expanzní vlny se odrážejí jako kompresní vlny od volného povrchu na hranici proudění, sbíhají se a vytvářejí hlavnový ráz a Machův disk. Opakované hlavnové rázy a struktury Machových disků za prvním Machovým diskem se objevují nepravidelně při tlakových poměrech nižších než 20. U typických tlaků při skladování vodíku lze očekávat krátkou strukturu pouze s jedním Machovým diskem na začátku průběžného poklesu tlaku. Když plyn s velmi vysokým Machovým číslem překročí Machův disk, dojde k náhlému poklesu rychlosti proudění na podzvukovou rychlost a ke zvýšení tlaku (na atmosférický) a hustoty. Výsledná struktura proudění za Machovým diskem se skládá z podzvukového jádra ($M < 1$) obklopeného nadzvukovým pláštěm ($M > 1$), přičemž tyto dvě oblasti odděluje smyková vrstva zvaná smyková čára.

4.2 Podzvukové, zvukové a nadzvukové proudění

Machovo číslo proudění, které se rovná rychlosti proudění (U) dělené rychlostí zvuku v plynu (C) vystupujícím do okolního vzduchu, je důležitým parametrem, který určuje chování proudění. U podzvukového proudění $U < C$, $M < 1$ je tlak na výstupní rovině právě roven atmosférickému tlaku (nebo se mu velmi blíží). Jak jsme již zmínili dříve, mnoho úniků z vysokotlakého zásobníku tvoří nedostatečně roztržštěný proud se zvukovým (škraceným) prouděním na výstupu z trysky (když $U = C$ a $M = 1$). Nadzvukové proudění se vyznačuje rychlostí vyšší než rychlost zvuku ($U > C$).



Při vysokém tlaku zůstává výstupní rychlost lokálně zvuková, ale výstupní tlak stoupá nad okolní tlak, takže mimo trysku dochází k expanzi až na okolní podmínky. Pro vodík je kritický tlakový poměr pro zvukové (škrcené) proudění stlačitelného plynu 1,89 při standardní teplotě a tlaku ($\gamma=1,405$) a 1,89 při NTP ($\gamma=1,39$) podle teoretické rovnice pro podmínky škrceného proudění:

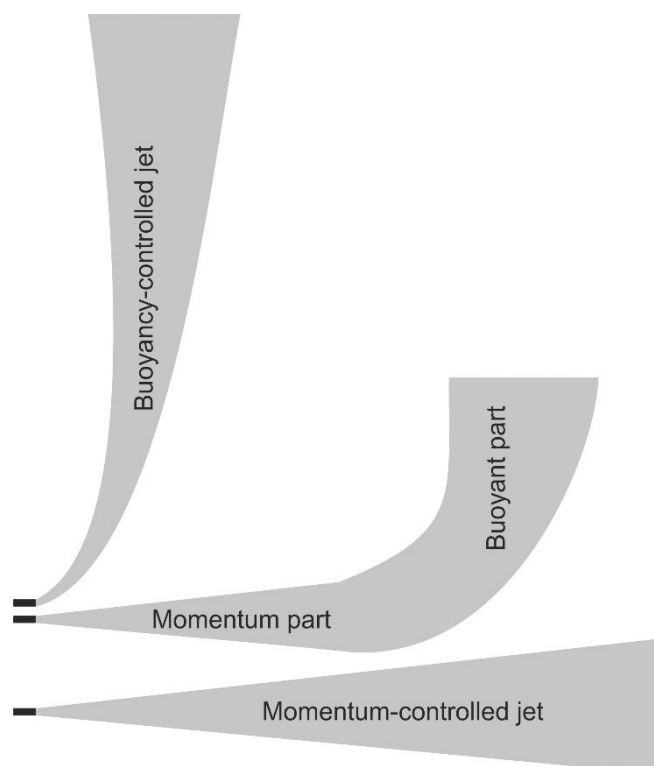
$$\frac{P_R}{P_N} = \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (1)$$

kde P_R a P_N jsou tlaky v zásobníku a na výstupu z trysky a γ je poměr hodnot měrného tepla. Rovnici (1) lze použít k odhadu tlaku na výstupu z netěsnosti (trysky) P_N , je-li znám zásobní tlak v zásobníku P_R [1].

Ishii et al. [8] uvádějí, že proudění dvouatomového plynu ($\gamma=7/5$) vypouštěné z otevřeného konce zkumavky mají tendenci být: *podzvukové a přizpůsobené* tlakovým poměrům ve vysokotlaké a nízkotlaké komoře (jediný parametr, kterým se řídí síla proudu) mezi 1 a 4,1; *zvukové a neroztříštěné* proudy pro tlakové poměry v rozmezí 4,1 až 41,2; *nadzvukové a neroztříštěné* proudy pro poměry tlaků nad 41,2. Tlakový poměr 4,1 je vyšší než kritický poměr 1,9 pro zvukové (škrcené) proudění. Není zde však žádný rozpor: každý ze dvou tlakových poměrů (od vysokotlaké komory k výstupu ze zkumavky a od výstupu ze zkumavky k nízkotlaké komoře) může být $P_R/P_N = 2,05$, což se blíží teoretickému kritickému tlakovému poměru 1,9 pro zvukové proudění. Tento rozdíl lze přičíst ztrátám mezi vysokotlakými a nízkotlakými komorami.

4.3 Proudění s dominující hybností a s dominujícím vztlakem

Všechna proudění lze na základě vztlaku rozdělit do tří typů. Tyto typy proudění v případě horizontálního proudění jsou schematicky znázorněny na obrázku 3. *Proudění s dominující hybností* není ovlivněno vztlakem, zatímco *proudění s dominujícím vztlakem* jsou rychle odkláněna z horizontálního do vertikálního směru proudění. Třetím typem je *přechodové proudění*, u nichž v oblasti výstupu z trysky dominuje hybnost, zatímco v oblasti dále ve směru proudění již převládá vztlak, neboť zde rychlost proudění klesá a současně se zvětšuje jeho průměr. Je důležité znát okamžik, kdy k tomuto přechodu dochází, protože tento okamžik ovlivňuje zejména nebezpečnou vzdálenost a obecně strategii a taktiku prvotního zásahu [1].



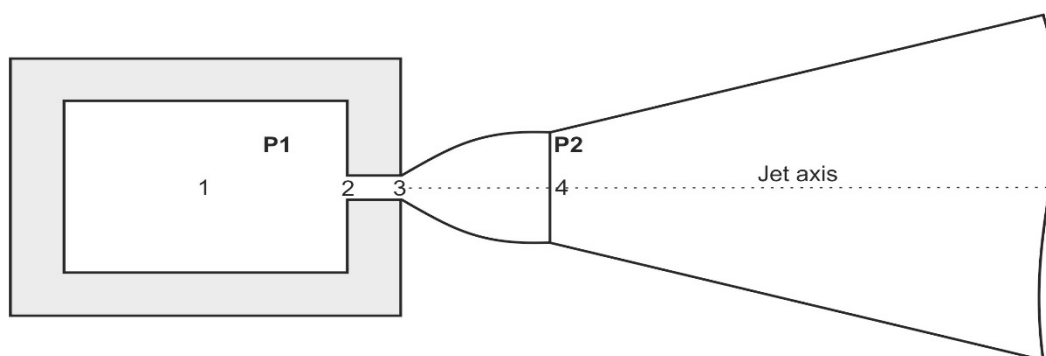
Obrázek 3. Schematické znázornění proudění s dominující hybností, přechodových proudění a proudění s dominujícím vztlakem [1].

5. Rozpad koncentrace vodíku v proudění s dominující hybností

Koncentrace vodíku v proudění se snižuje ze 100 % v trysce (tj. v místě úniku) k nižším hodnotám podél osy proudění a směrem od osy k okrajům. Pro některé výpočty je vhodnější nahradit nedostatečně roztržštěné proudění ze skutečné trysky roztržštěným proudem z tzv. *efektivní* nebo *fiktivní trysky*. Existuje několik teorií fiktivních trysek. Nejčastěji citovaným modelem je model, který navrhli Birch a kol. [9] v roce 1984. První modely jsou však založeny na stavové rovnici ideálního plynu, a proto nejsou použitelné pro skladovací tlaky nad 10–20 MPa, kdy je třeba zohlednit neideální chování plynu. První teorii *nedostatečně roztržštěného proudu*, která vysvětluje neideální chování vysoce stlačeného vodíku, publikovali Schefer a kol. [10] v roce 2007. Výpočty průměru fiktivní trysky, kterou provedli Schefer a kol. [10], jsou podobné jako výpočty, které provedli Birch a kol. [9], je však použita Noble-Abelova rovnice a předpoklad Birche a kol. o rychlosti zvuku u fiktivní trysky je zmírněn [9,10]. V důsledku toho teorie Schefera a kol. [10] předpovídá rovnoměrné nadzvukové rychlosti na výstupu z fiktivní trysky při vysokých tlacích v zásobníku.

Molkov a kol. [11] sestavili teorii nedostatečně roztržštěného plynu, která představuje alternativu k teorii, kterou navrhli Schefer a kol. [10]. Tato teorie je založena na rovnicích zachování hmoty a energie, nikoli na rovnicích zachování hmoty a hybnosti. Podobně jako Birch a kol. [9] vychází model Molkova a kol. [11] z předpokladu rovnoměrného zvukového

proudění přes fiktivní trysku. Výpočetní schéma použité pro teorii *roztržitého proudu* je znázorněno na obrázku 4.



Obrázek 4. Schéma nedostatečně roztržitého proudu: 1 – vysokotlaká nádoba; 2 – vstup trysky; 3 – výstup z trysky (= vstup do fiktivní trysky); 4 – výstup z fiktivní trysky (3–4: bez unášení); P1 – skladovací tlak; P2 – atmosférický tlak (po expanzi proudu) [1].

Jak předpokládá obrázek, rychlost proudění v zásobníku (1) je nulová. Parametry průtoku na vstupu do kanálu úniku, tj. vstupu do trysky, se označují jako (2) a na vlastním výstupu z trysky jako (3). Pro proudění rychlostí zvuku a nadzvukovou rychlostí jsou parametry na výstupu z trysky (3) shodné s parametry pro proudění se škrcením, a proto je výstupní rychlost z trysky rovna místní rychlosti zvuku (Machovo číslo $M = 1$). Fiktivní tryska se nachází mezi výstupem ze skutečné trysky (3) a výstupem z fiktivní trysky (4). Na výstupu z fiktivní trysky (4) odpovídají parametry proudění plně roztržitému proudu s tlakem rovným okolnímu tlaku a rovnoměrná rychlost proudění místní rychlosti zvuku. V některých případech nelze přehlédnout důležité menší a třecí ztráty v dráze proudění (2)–(3), například v případě velmi úzké trhliny [1].

Jak již bylo uvedeno, při posuzování kritérií škod je obecně prvořadě spalování. Nežádoucí uvolnění vodíku z vysokotlakého zařízení a infrastruktury vytvoří silně *roztržitého proudu*. Ten může způsobit vznik rozsáhlé *hořlavé obálky ze směsi vodíku se vzduchem*. Velikost hořlavé obálky je deterministická nebezpečná vzdálenost od zdroje úniku. V případě jejího následného zapálení může dojít k požáru, které může ovlivnit člověka, konstrukce, vybavení a životní prostředí. Přítomnost zdroje zapálení v obálce může zahájit silný *tryskový požár, deflagrace* případně i *přechod z deflagrace do detonace*. Je třeba pamatovat, že tepelné účinky tryskového požáru a tlakové účinky deflagrace nebo detonace by mohly překonat nebezpečnou vzdálenost určenou velikostí hořlavé obálky [1]. Znalost zákonů popisujících rozptyl vodíku a tvorbu a hořlavého mraku, včetně *axiálního rozpadu koncentrace* u náhodných proudů s různými parametry, je tedy zásadní pro rozhodování členů zásahových jednotek.

Pokud se hořlavá obálka dostane do místa sání vzduchu ve výškových budovách, mohou být následky pro obyvatele a konstrukci budovy katastrofální. Proto je důležité stanovit nejvzdálenější bod od místa úniku, kde může dojít k zapálení proudu. Ta je obecně definována koncentrací vodíku 4 % obj., tedy dolní mezí hořlavosti (LFL). Ačkoli je volba této koncentrace



vodíku předmětem diskuse, k přímému kontaktu s plamenem v důsledku zášlehového požáru dojde také v případě, jestliže člověk při zapálení vodíku nachází v oblasti koncentrace 4 % obj. vodíku. Velikost hořlavé obálky, tj. vzdálenost od LFL 4 % obj., se zvětšuje úměrně průměru [1].

Zákon podobnosti, který je popsán níže, se používá pro předpověď *axiálního rozpadu koncentrace* unikajícího plynu pro podzvukové, zvukové a nadzvukové proudění. Zákon podobnosti platí pro širokou škálu podmínek od roztržštěných až po velmi *nedostatečně roztržštěné proudy*. Lze jej použít pro výpočet *nebezpečných vzdáleností* na základě velikosti hořlavé obálky. Zohledňuje neideální chování vodíku při vysokých tlacích a nedostatečné roztržštění proudu na výstupu z trysky. V dřívějších publikacích Molkova a kol. [11, 14] byly tyto vzdálenosti označovány jako separační nebo nebezpečné vzdálenosti, jejichž definice se lišily dokument od dokumentu. Některé příklady definic jsou uvedeny níže:

„minimální vzdálenost, která odděluje konkrétní cíle (např. osoby, stavby nebo zařízení) od následků možných havárií souvisejících s provozem vodíkového zařízení“ [12].

„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“ [3].

Nebezpečnou vzdálenost 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 stanovení místa vzniku hořlavé směsi vodíku se vzduchem je důležité vědět, jak se koncentrace snižuje ze 100 % obj. na trysce až po LFL, tj. na 4 % obj. Původní podobu zákona podobnosti (rovnice 2) pro axiální rozpad koncentrace v rozšířených kruhových tryskách navrhli Chen a Rodi [13] v roce 1980:

$$C_{ax}^m = 5.4 \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_S}} \frac{D}{x} \quad (2)$$

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 kg/m³ za NTP), D je skutečný výstupní průměr trysky, ρ_N je hustota vodíku na výstupu z trysky (jediný neznámý parametr).

„Neznámou“ hustotu ρ_N lze vypočítat pomocí *teorie nedostatečně roztržštěných proudů*, která byla vyvinuta a ověřena v centru HySAFER na Ulsterské univerzitě. Vzdálenost od LFL je

přímo úměrná průměru úniku. Konstrukce systémů FCH tedy musí splňovat technologické požadavky na hmotnostní průtok a současně zohledňovat požadavek na minimalizaci vnitřního průměru potrubí, aby se zkrátila potenciální nebezpečná vzdálenost, jak vyplývá z rovnice (2). Je třeba pamatovat, že ρ_N také ovlivňuje velikost hořlavé obálky 4 obj. % (tj. hmotnostní zlomek C_m 0,00288) – čím větší je provozní tlak v aplikaci FCH, tím větší je hustota na fiktivní trysce ρ_N , a tedy i větší nebezpečná vzdálenost.

Ze zákona podobnosti (2) lze vyvodit, že pro vodíkové proudy uvolňované do klidného vzduchu z daného zásobního tlaku (tj. pevné hodnoty ρ_N) je poměr vzdálenosti k pevné koncentraci $x = L$, vyjádřené v hmotnostních procentech, k průměru trysky D konstantní, tj. $L/D = \text{konst.}$ To znamená, že nebezpečná vzdálenost je přímo úměrná průměru úniku. Pamatujte, že hmotnostní podíl (C_m) lze vypočítat z rovnice (3) na základě objemového (molárního) podílu (C_V):

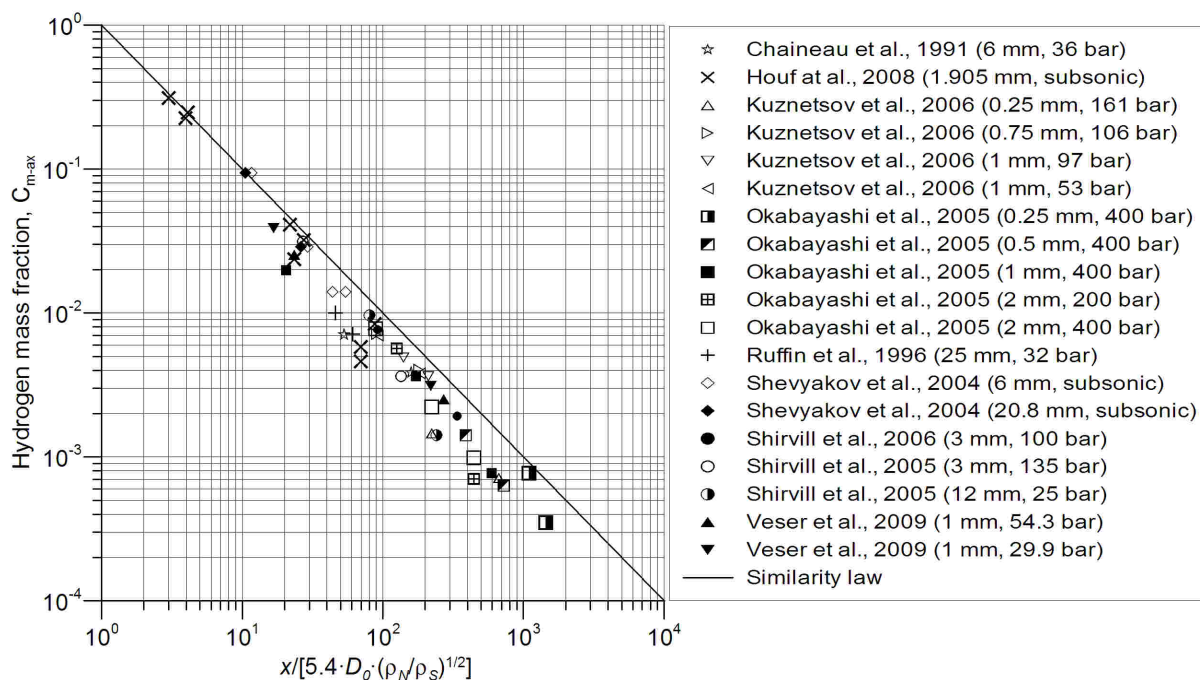
$$1/C_m = 1 + (1/C_V - 1)M_S/M_N \quad (3)$$

kde M_S a M_N jsou molekulové hmotnosti okolního plynu (28,84 g/mol pro vzduch) a plynu v trysce (vodík). Například hmotnostní zlomek 0,0282 odpovídá objemovému zlomku 0,295 (29,5 % obj. vodíku ve vzduchu, tj. stechiometrická směs); hmotnostní zlomek 0,044365 odpovídá objemovému zlomku 0,401 (40,1 % obj.). %, tj. směsi s maximální rychlostí hoření), 0,013037–0,16 (16 obj. %), 0,008498–0,11 (11 obj. %), 0,005994–0,08 (8 obj. %), 0,00288–0,04 (4 % obj. – LFL), 0,00141–0,02 (2 % obj.), 0,0007–0,01 (1 % obj.).

V případě plně roztržštěných kruhových proudů udává zákon podobnosti (2) následující poměry vzdálenosti k určité axiální koncentraci vodíku (v objemových %), L , k charakteristické velikosti trysky, D (pro atmosférický tlak trysky a roztržštěné podzvukové proudy s poměrem hustot $\rho_S/\rho_N = 14,38$: $(L/D)_{30\%} = 49,1$; $(L/D)_{4\%} = 491$; $(L/D)_{2\%} = 1\,003$; $(L/D)_{1\%} = 2\,019$. Například vzdálenost LFL vodíku ve vzduchu (4 % obj.) v roztržštěných proudech s dominující hybností se rovná 491 průměrům trysky. Upozorňujeme, že korelace (2) podle Chena a Rodiho [13] byla ověřena měřením koncentrace ve vertikálních proudech pouze do poměru $L/D = 50$. Její použitelnost nad tímto rozsahem je teprve třeba potvrdit [1].

Pokud se zákon podobnosti podle Chena a Rodiho [13] použije v původní podobě (2) na roztržštěné proudy, byl by výpočet nebezpečných vzdáleností pro nezapálené vodíkové kruhové proudy jednoduchý: pomocí rovnice (2) s hustotou vodíku na výstupu z trysky $\rho_N = 0,0838 \text{ kg/m}^3$ (NTP). Pro *nedostatečně roztržštěné proudy* však existuje jeden neznámý parametr, a to hustota plynu na výstupu ze skutečné trysky, ρ_N . Tuto hustotu lze vypočítat pomocí teorií s nedostatečně roztržštěnými proudy, a to buď beze ztrát [11], nebo se ztrátami [14].

Zákon podobnosti pro rozpad koncentrace vodíku podél osy proudů s dominující hybností, stejně jako experimentální data pro nedostatečně roztržštěné uvolňování vodíku, jsou znázorněny na obrázku 5.



Obrázek 5. Zákon podobnosti (přímka, plná čára) a experimentální data (symboly) o axiálním rozpadu koncentrace v roztržštěných a neroztržštěných vodíkových proudech s dominující hybností [1].

Experimentální údaje o axiálním rozpadu koncentrace čistého vodíku ve zvukových a nadzvukových proudech s dominující hybností vypouštěných z nádob s různým objemem pod tlakem až 40 MPa a tryskami s průměrem od 0,25 do 100 mm, jsou uvedeny v dokumentu [2]. Koncentrace vodíku ve vzduchu se pohybovala v rozmezí od 1 do 86,6 % obj. Zákon podobnosti byl ověřen u poměrů x/D v rozsahu od 4 do 28 580. K ověření univerzálního charakteru zákona podobnosti byly použity laminární a turbulentní, roztržštěné a nedostatečně roztržštěné proudy s dominující hybností [2]. Pamatujte, že zákon podobnosti je ve vztahu k experimentálním datovým bodům konzervativní, což je způsobeno vlivem tření a drobných ztrát při experimentech.

Jak již bylo uvedeno, hmotnostní zlomek vodíku odpovídající LFL (4 % obj.) činí 0,00288. Pokud použijeme tuto hodnotu společně s hustotou vzduchu 1,205 kg/m³ (NTP), rovnice (2) se zjednoduší na následující vzorec:

$$x_{4\%} = 1708 \cdot \sqrt{\rho_N} \cdot D \quad (4)$$

Tento vzorec lze použít k posouzení velikosti hořlavé obálky do 4 % obj. vodíku (nebezpečná vzdálenost pro nezapálený únik vodíku).

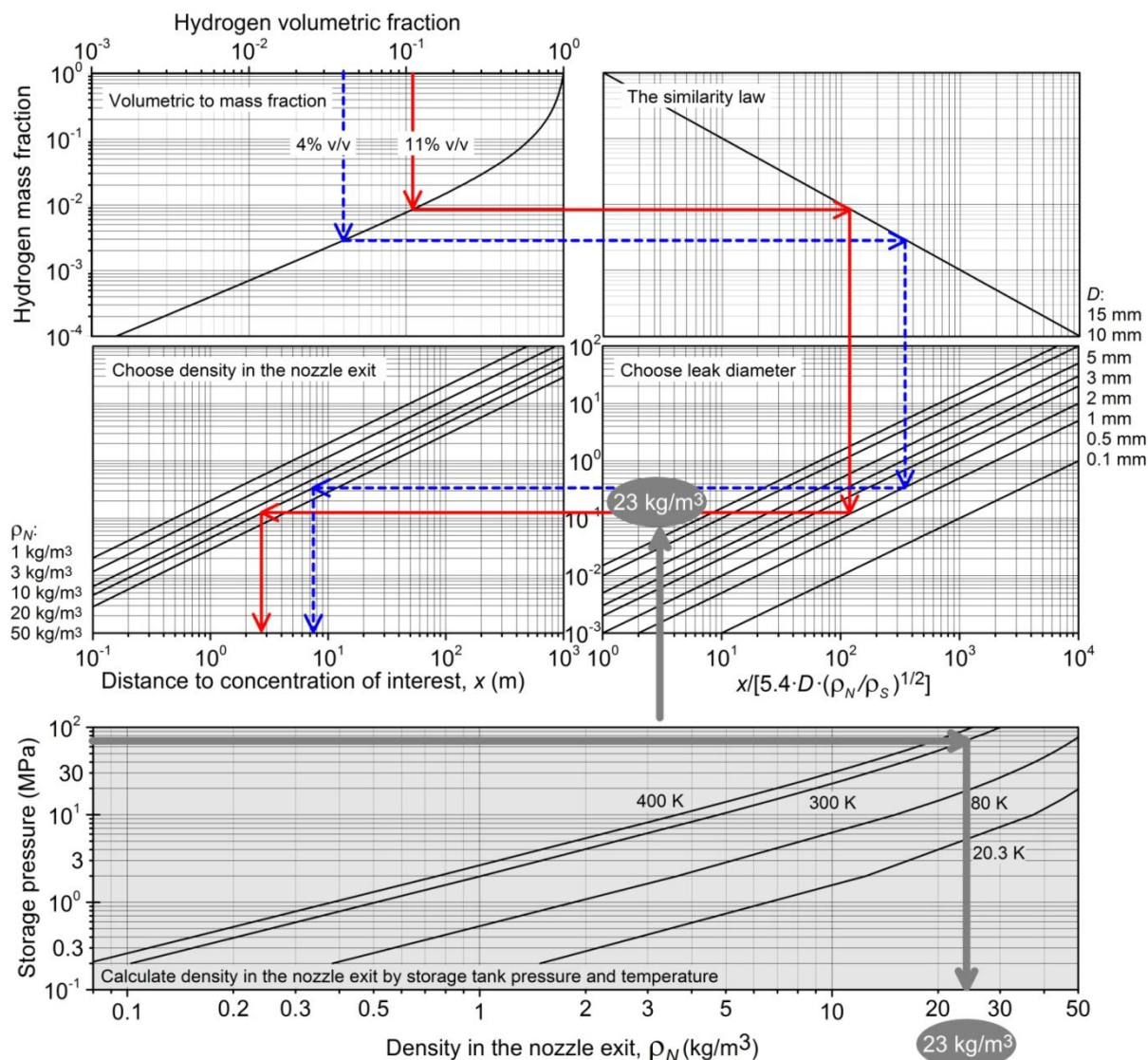
Rozsah uvolňování nezapáleného vodíku lze vypočítat dvěma metodami:

1. Nomogram rozpadu koncentrace vodíku.
2. e-Laboratoř (<https://hyresponder.eu/e-platform/e-laboratory/>).

Nomogram pro grafické vyhodnocení rozpadu koncentrace vodíku s využitím zákona podobnosti a teorie nedostatečně roztržitého proudu beze ztrát je znázorněn na obrázku 6. Nomogram se skládá ze čtyř hlavních grafů s názvy: „objemově k hmotnostnímu zlomku“, „zákon podobnosti“, „výběr průměru úniku“ a „výběr hustoty na výstupu z trysky“ a jeden doplňkový graf „výpočet hustoty na výstupu z trysky podle tlaku a teploty v zásobníku“ (na základě výpočtů podle teorie nedostatečně roztržitého proudu beze ztrát).

Níže je uvádíme příklad použití nomogramu k výpočtu vzdálenosti od trysky (např. o průměru 1 mm) k 4 % obj. vodíku ve vzduchu (modrá čárkovaná čára) podél osy uvolňování ze zásobníku při tlaku 70 MPa a teplotě 300 K.

1. Nakreslete svislou úsečku směrem dolů od bodu na vodorovné ose „objemový zlomek vodíku“, který odpovídá koncentraci, jež vás zajímá (4 % obj. nebo 0,04), až do průsečíku s čarou grafu „objemový a hmotnostní zlomek“ (levý horní roh na obrázku 6).
2. Nakreslete vodorovnou úsečku z tohoto průsečíku do průsečíku s přímkou zákona podobnosti v pravém horním rohu grafu „zákon podobnosti“ (obrázek 6).
3. Nakreslete svislou úsečku směrem dolů od průsečíku získaného na grafu „zákon podobnosti“ až do průsečíku s čarou odpovídající průměru 1 mm na grafu „výběr průměru úniku“ (obrázek 6). Pamatujte prosím, že na grafu „výběr průměru úniku“ je osm řádků, které odpovídají následujícím průměrům netěsnosti (shora dolů): 15 mm, 10 mm, 5 mm, 3 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,1 mm. Tyto údaje jsou uvedeny v pravé části grafu.
4. Hustotu vypočítejte pomocí doplňkového grafu „výpočet hustoty na výstupu z trysky podle tlaku a teploty v zásobníku“, který se nachází v dolní části nomogramu, přičemž na ose y použijte daný tlak (na našem příkladu 70 MPa) a řádek odpovídající zvolené teplotě (300 K). To je znázorněno dvěma tlustými šedými šipkami na grafu „výpočet hustoty na výstupu z trysky podle tlaku a teploty v zásobníku“. Hustota vypočítaná graficky na výstupu z trysky pro tlak 70 MPa a teplotu 300 K činí přibližně 23 kg/m^3 .
5. Vraťte se ke grafu „výběr průměru úniku“ a nakreslete vodorovnou přímku od průsečíku na čáře „1 mm“ až do průsečíku s pomyslnou čarou odpovídající 23 kg/m^3 (nachází se mezi dvěma čarami, 20 kg/m^3 a 50 kg/m^3 , znázorněnými v grafu). Všimněte si, že graf obsahuje shora dolů pět čar odpovídajících hustotám 1 kg/m^3 , 3 kg/m^3 , 10 kg/m^3 , 20 kg/m^3 a 50 kg/m^3 . Tyto hodnoty jsou uvedeny v levé části grafu.
6. Nakreslete svislou úsečku směrem dolů od průsečíku s pomyslnou přímkou odpovídající 23 kg/m^3 k průsečíku se souřadnicí na ose x „vzdálenost k zájmové koncentraci“ na grafu „výběr hustoty na výstupu z trysky“. Graficky stanovená vzdálenost od výstupu z trysky ke koncentraci vodíku 4 % obj. tedy činí přibližně 7,7 m.



Obrázek 6. Nomogram pro výpočet rozpadu koncentrace v nezapálených proudech [1].

Použití rovnice (2) pro zákon podobnosti s přesnější hodnotou hustoty vodíku v trysce vypočtenou podle *teorie nedostatečně roztržitého proudu* ($23,95 \text{ kg/m}^3$) a hustoty vzduchu $1,205 \text{ kg/m}^3$ (NTP) dává vzdálenost $8,36 \text{ m}$ pro $4 \text{ obj. \%}$ vodíku ve vzduchu. Chyba grafických výpočtů je na přijatelné úrovni a je nižší než $10 \text{ \%}$.

Úkol pro posluchače: Pomocí nomogramu na obrázku 6 vyhodnoťte vzdálenost do $11 \text{ obj. \%}$ koncentrace vodíku ve vzduchu za předpokladu stejného skladovacího tlaku 70 MPa , teploty při skladování 300 K a fyzikálního průměru trysky 1 mm (odpovídá průměrnému umístění špičky plamene).

Nástroj e-Laboratoře „Jet parameters model“ (Model parametrů proudění) nabízí snadný a rychlý způsob vyhodnocení hustoty plynu v trysce zadáním následujících údajů: tlak v zásobníku, teplota v nádrži, průměr ústí a okolní tlak.

Zákon podobnosti pro *nedostatečně roztržité proudy* a nomogram jsou výkonnostní nástroje pro výpočet nebezpečných vzdáleností nezapálených úniků. Představují alternativu k normativním předpisům. Například Mezinárodní požární řád (2006) obsahuje tabulku předepsaných vzdáleností mezi vodíkovou soustavou a různými potenciálními cíli, včetně přívodu vzduchu do budovy [15]. Tento předpis však neposkytuje ani nevyžaduje žádné informace o parametrech skladování vodíku (tlak a teplota) a velikosti úniku ze soustavy. Tento předpis je příkladem archaického normativního přístupu, který je v rozporu s moderními požadavky na předpisy a normy založené na výkonu [1].

Norma NFPA 55 [16] z roku 2010 se oproti normativnímu Mezinárodnímu požárnímu řádu [15] z roku 2010 posunula o krok dále a předložila soustavu 4 rovnic pro výpočet vzdáleností k axiální koncentraci 4 % obj. vodíku ve vzduchu. Molkov [1] poukázal na dvě slabá místa této normy. Pro „zjednodušení“ použití metodiky v praxi je každá ze 4 rovnic přiřazena poměrně širokému rozsahu tlaků. Výsledkem je „naprogramovaná“ nadměrná a nedostatečná předpověď vzdálenosti v závislosti na tlaku v zásobníku. Nejzávažnějším nedostatkem při výpočtu vzdálenosti podle normy NFPA 55 [16] je však použití velikosti úniku pouze 3 % průtočné plochy potrubí (tato volba vychází z četnosti úniků jiných plynů, které se používají v plynárenském průmyslu) [1]. Zákon podobnosti totiž říká, že při stejné hustotě vodíku na výstupu z trysky ρ_N , tj. při stejném tlaku v zásobníku, je nebezpečná vzdálenost přímo úměrná průměru úniku. Sporná volba velikosti úniku jako 3 % plochy průřezu potrubí v normě NFPA 55 [16] tak vede k „předepsanému“ zkrácení vzdálenosti o převrácenou odmocninu z 0,03, tj. 5,77krát. Je zřejmé, že v případě protržení vodíkového potrubí v plném rozsahu by následky mohly být katastrofální, pokud by se tento „3%“ přístup široce uplatňoval a prosazoval ze strany regulačních orgánů. Přístupy zohledňující rizika nemohou ohrozit vědecky podloženou inženýrskou konstrukci. Alternativou k tomuto „vynucenému“ zkrácení nebezpečné vzdálenosti je bezpečnostně technické řešení vodíkových systémů, např. snížení tlaku v potrubí, je-li to možné, a zmenšení průměru potrubí na minimální velikost požadovanou technologickými důvody a/nebo nahrazení jednoho velkého potrubí několika menšími, použití zařízení PRD s posílenými bezpečnostními vlastnostmi atd. [1].

Lze vyvodit závěr, že zákon podobnosti lze použít k přesnějšímu výpočtu nebezpečné vzdálenosti v porovnání se současnými dostupnými normami a předpisy. Tato metodika je vědecky podložená a v případě potřeby dokáže zohlednit tření a drobné ztráty v dráze úniku. V neposlední řadě poskytuje vodíkové bezpečnostní inženýrství volnost při posuzování nejhoršího možného scénáře protržení otvoru v celém průřezu namísto sporného přístupu 3 % plochy průřezu potrubí, jak navrhuji některé předpisy a normy [1].

6. Zkrácení nebezpečné vzdálenosti od úniku vodíku

Rovnice (4) ukazuje, že nebezpečná vzdálenost pro nezapálené proudy, x , je úměrná průměru úniku, D , a roste jako odmocnina z tlaku v zásobníku (hustota ρ_N). S ohledem na tuto skutečnost lze klíčový bezpečnostní požadavek pro únik nezapáleného vodíku formulovat takto: *zmenšit*

průměr potrubí (což je průměr úniku pro nejhorší věrohodný scénář) na technologicky dostupné minimum, což je v souladu se zásadou ALARP („as low as reasonably practicable“, tj. „co nejmenší, jak je rozumně proveditelné“) a ALARA („co nejmenší, jak je rozumně dosažitelné“), které se často používají při regulaci a řízení bezpečnostně kritických a bezpečnostně významných systémů. Stejný přístup lze aplikovat na průměr zařízení pro uvolnění tlaku (PRD) nebo zařízení pro uvolnění tlaku aktivovaného teplotou (TPRD) [2].

6.1 Kdy se proud stává vztlakovým?

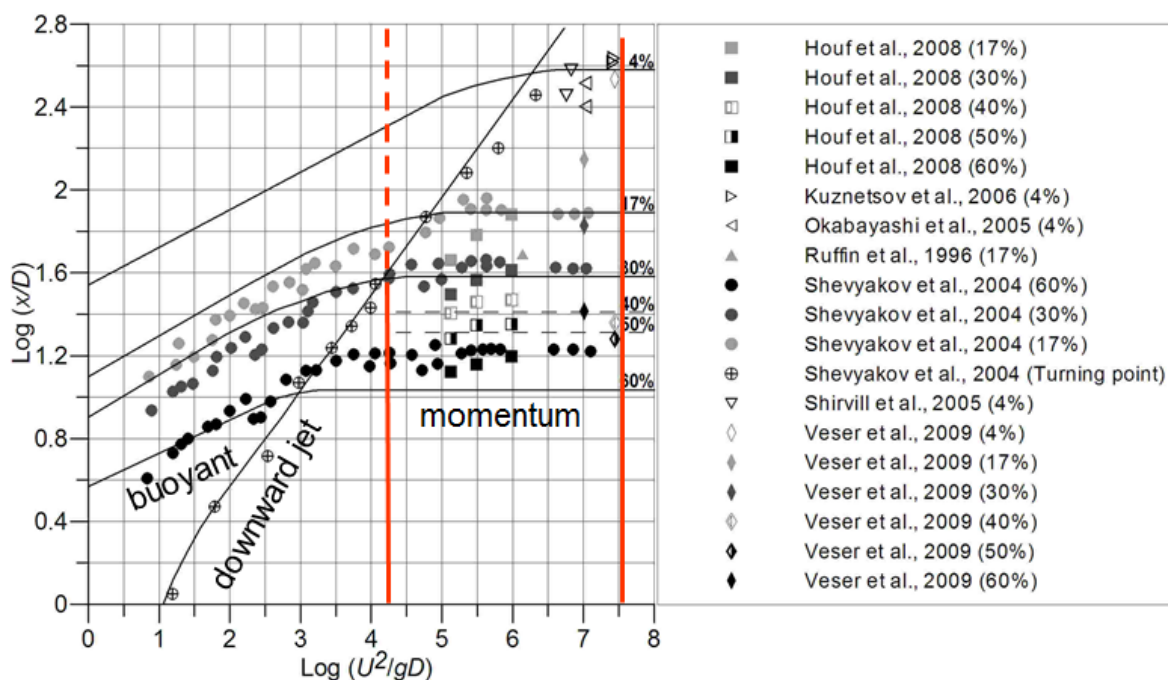
V závislosti na vztlakovém jevu mohou být proudy buď s dominující hybností, přechodové, nebo s dominujícím vztlakem, jak ukazuje obrázek 3. Nebezpečná vzdálenost pro únik nezapáleného vodíku je větší u horizontálního úniku než u šikmého či vertikálního úniku. V mnoha případech nepředstavuje vertikální nezapálený proud, který se vyskytuje venku, žádné nebezpečí pro člověka a nezpůsobuje škody na budovách a konstrukcích. Pro členy zásahových jednotek je však důležité vědět, zda se primárně jedná o únik s dominující hybností nebo vztlakem, nebo při jaké koncentraci vodíku se režim proudění mění z proudění s dominující hybností na proudění s dominujícím vztlakem (například v případě vertikálních úniků směřujících dolů).

Níže uvedená technika, která umožňuje rozlišovat mezi prouděním s dominující hybností a s dominujícím vztlakem v roztržštěných a nedostatečně roztržštěných prouděch, vychází z práce Shevyakova a kol. [17, 18], která je založena výhradně na roztržštěných prouděch. Obrázek 7 ukazuje v logaritmických souřadnicích závislost poměru vzdálenosti k průměru trysky x/D (osa y) při konkrétní objemové koncentraci vodíku ve vzduchu na *Froudeově čísle* Fr (osa x) v klasickém tvaru:

$$Fr = U^2/gD \quad (5)$$

kde U je rychlost na výstupu z trysky (výstup z fiktivní trysky pro nedostatečně roztržštěné proudy), m/s, g je gravitační zrychlení (standardní gravitační zrychlení na Zemi je 9,80665 m/s²), D je průměr trysky (průměr výstupu z fiktivní trysky pro nedostatečně roztržštěné proudy), m.

Pro nedostatečně roztržštěné proudy na obrázku 7 byly parametry, které se použijí v (5) – průměr výstupu z fiktivní trysky D a rychlost na výstupu z fiktivní trysky U – vypočteny podle *teorie nedostatečně roztržštěných trysek* [11]. Roztržštěné a nedostatečně roztržštěné proudy se řídí stejnou funkční závislostí s přesností 20 % přijatelnou pro technické aplikace.



Obrázek 7. Závislost poměru vzdálenosti k průměru trysky při konkrétní koncentraci vodíku ve vzduchu na Froudeově čísle [17, 18].

Na obrázku 7 je znázorněno pět teoretických křivek (plné čáry) a experimentální data dle Ševjakova a kol. pro roztříštěné proudy [17, 18] a data jiných výzkumníků pro nedostatečně roztříštěné proudy. Jak vyplývá z dostupných testů použitých k ověření korelace na obrázku 7, prakticky všechny nedostatečně roztříštěné proudy v haváriích/nehodách za účasti vodíku budou dominovány hybností. Čtyři z pěti teoretických křivek v grafu se vztahují na koncentrace vodíku 4 %, 17 %, 30 % a 60 obj. % Každá z těchto čtyř křivek má vzestupnou vztlakovou část a plochou část, kde dominuje hybnost [1].

Je důležité zdůraznit, že Froudeovo číslo (Fr) při přechodu ze vztlakové části křivky do hybnostní závisí na koncentraci vodíku. Například při axiální koncentraci vodíku 60 % obj. zůstává tryska v režimu s dominující hybností, dokud $\text{Log}(Fr) > 3,5$, zatímco aby byla tryska v režimu s dominující hybností v axiálním místě, kde koncentrace vodíku klesne na 4 % obj. (LFL), musí být Froudeovo číslo na výstupu z trysky mnohem vyšší, tj. $\text{Log}(Fr) > 6,5$ (tj. o tři řády vyšší) [1].

Pátá křivka na obrázku 7 označená popisem „downward jets“ (proudý směřující dolů) je zajímavá zejména pro ty, kteří budou rozhodovat na místě nehody. U proudy směřujícího svisle dolů udává bezrozměrnou vzdálenost od trysky k bodu obratu, kde proud mění směr proudění z klesajícího na stoupající. Pro výpočet vzdálenosti k bodu zvratu je nutná pouze znalost Froudeova čísla na trysce (fiktivní trysce). Pátá křivka dle očekávání protíná všechny čtyři ostatní křivky na obrázku 7 v oblasti přechodu z proudění s dominující hybností k proudění řízenému vztlakem [1]. Pro použití korelace na obrázku 7 je třeba provést následující kroky:

1. Vypočítejte Froudeovo číslo Fr na výstupu z trysky a jeho logaritmus. Pro výpočet průměru výstupu z fiktivní trysky a rychlosti proudění výstupu z fiktivní pro nedostatečně roztržštěné proudy použijte teorii nedostatečně roztržštěných proudů.
2. Z bodu na ose x (vodorovná) nakreslete svislou přímku směrem nahoru, která se rovná vypočtenému logaritmu Froudeova čísla. Průsečík této svislé přímky s čarou označenou v grafu jako „downward jets“ (proudy směřující dolů) označuje koncentraci, nad níž je proud kvalifikován jako proud s dominující hybností (plná červená čára). Pod ní je proud kvalifikován jako proud s dominujícím vztlakem (přerušovaná červená čára).

Pokud je například Froudeovo číslo na výstupu proudění $\text{Log}(Fr) = 4,25$, průsečík svislé přímky s čarou „downward jets“ (proudy směřující dolů) je v místě teoretické křivky odpovídající 30 % obj. Proudění je tedy v režimu s dominující hybností, je-li koncentrace v proudu vyšší než 30 % obj., a přechází do režimu s dominujícím vztlakem, jakmile je koncentrace v ose proudění nižší než 30 % obj. (dále po proudu od axiální koncentrace 30 % obj.).

Tato technika je poměrně snadná a současně může být pro členy zásahových jednotek velmi užitečná. Například nebezpečnou vzdálenost pro uvolnění horizontálního proudu lze podstatně zkrátit, protože jako údaj o nebezpečné vzdálenosti lze uvážit pouze délku části proudění s dominující hybností nikoliv celkovou délku, tj. obě části proudění – s dominující hybností a s dominujícím vztlakem – do dolní meze hořlavosti (LFL) 4 % obj. vodíku.

6.2 Co se rozumí bezpečným průměrem zařízení PRD?

Zákon podobnosti (2) je jednoduchý a důkladně validovaný nástroj pro vodíkové bezpečnostní inženýrství v případě roztržštěných i neroztržštěných kruhových proudů. Uvažujme následující situaci: ve skladu je zaparkován vysokozdvíhový vozík s pohonem na palivové články. Vysokozdvíhový vozík je vybaven zásobníkem vodíku se zařízením pro uvolnění přetlaku (PRD). Vypočítejme, jaký průměr by mělo mít toto zařízení PRD, aby bylo zajištěno bezpečné uvolňování vodíku z palubního zásobníku směrem nahoru při tlaku 35 MPa. V tomto případě bychom chtěli vyloučit vznik hořlavé vrstvy pod stropem skladu, který se nachází ve výšce 10 m nad zařízením PRD. Pro realizaci této bezpečnostní strategie by měla být koncentrace na ose proudění ve vzdálenosti 10 m rovna nebo menší než 4 % obj. (odpovídající hmotnostní zlomek vodíku je 0,00288). Hustota vodíku na výstupu z trysky vypočítaná podle teorie nedostatečně roztržštěného proudu pro zásobní tlak 35 MPa činí $\rho_N = 14,4 \text{ kg/m}^3$. Průměr zařízení PRD lze tedy vypočítat ze zákona podobnosti (2) jako rovný nebo menší než 1,5 mm:

$$D = \frac{C_{ax}^m}{5.4} \sqrt{\frac{\rho_S}{\rho_N}} x = \frac{0.00288}{5.4} \sqrt{\frac{1.205}{14.4}} 10 = 0.0015 \text{ m} \quad (6)$$

Pro dokončení této bezpečnostní strategie při používání vodíkových vysokozdvíhových vozíků ve skladu je třeba formulovat požadavek na požární odolnost palubního zásobníku a provést

příslušné zkoušky. Hodnota požární odolnosti by totiž měla být vyšší než doba poklesu tlaku (tj. doba potřebná k vyprázdnění) ve skladovací nádrži, aby se vyloučilo její katastrofické selhání v případě okolního požáru. Je zřejmé, že použití zařízení PRD s větším průměrem by vytvořilo buď hořlavý mrak, nebo tryskový plamen s vyššími riziky, např. nebezpečným přetlakem při „opožděném zapálení“ nebo deflagrací prvotního mraku [1]. Uvolňováním zapáleného vodíku (neboli tryskovými požáry) se budeme zabývat v jedné z následujících přednášek.

7. Pokles tlaku v zásobníku stlačeného vodíku

Poklesem tlaku se rozumí proces související s postupným vyprazdňováním obsahu zásobní nádrže přes otvor zařízení TPRD/ventil/únik. Doba poklesu tlaku závisí na hmotnosti skladovaného vodíku, objemu nádrže, skladovacím tlaku a průměru ústí otvoru.

Například v tabulkách 2 a 3 jsou uvedeny objemy, tlaky, hmotnosti a doby poklesu tlaku vodíku na tlak atmosférický (v sekundách) v palubních zásobnících vybraných předváděcích nebo prototypových vozidel s palivovými články. U vozidla s největším objemem zásobní nádrže (vozidlo 3, 156 l, 70 MPa) je doba poklesu tlaku nejdelší. Ačkoli u typického průměru ústí netěsnosti 4–6 mm se doba poklesu tlaku pohybuje od 124 s (lehce přes 2 minuty) do 54 s (těsně pod 1 minutu), což znamená, že se jedná o velmi rychlý proces.

Tabulka 2. Příklady parametrů palubního zásobníku vodíku u různých vozidel s palivovými články

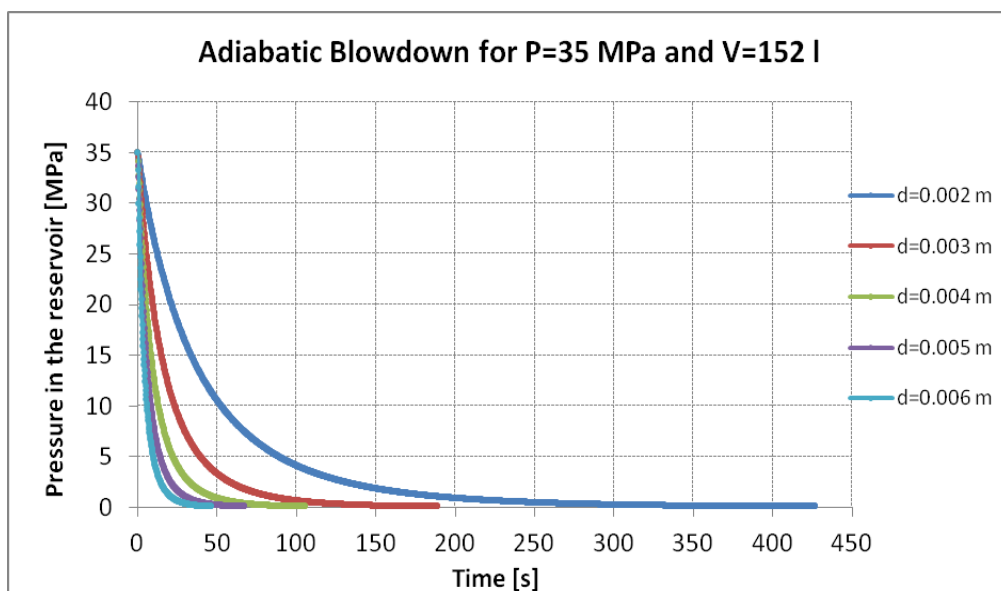
Vozidla	Výrobce	Model	Tlak (MPa)	Objem (L)	Hmotnost (kg)	Stav
1	Hyundai	Tucson Hybrid FCEV	35	152	3,6	Předváděcí
2	VW	Touran HyMotion	35	81	1,9	Prototyp
3	Toyota	FCHV-adv (2008)	70	156	6,2	Prototyp
4	VW	Tiguan HyMotion	70	81	3,2	Zkouška vozidla

Tabulka 3. Doby adiabatického poklesu tlaku vypočítané pro různé průměry netěsností u palubních nádrží vozidel 1–4

Průměr úniku [mm]	Doba poklesu tlaku u vozidla č. 1 (s)	Doba poklesu tlaku u vozidla č. 2 (s)	Doba poklesu tlaku u vozidla č. 3 (s)	Doba poklesu tlaku u vozidla č. 4 [s]
2	427	226	502	260
3	189	100	222	115
4	105	56	124	64

5	67	35	79	41
6	46	24	54	28

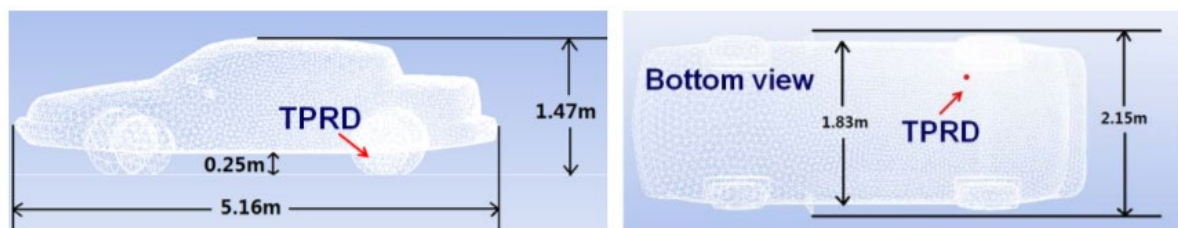
Na obrázku 8 je znázorněno, jak se během postupného poklesu snižuje tlak v zásobnících. Jak vidíte, pokles tlaku je značný: tlak velmi rychle klesne na atmosférické hodnoty.



Obrázek 8. Pokles tlaku v zásobníku vodíku v závislosti na čase u netěsností s různým průměrem (vozidlo 1).

Studii CFD nezapálených úniků vodíku z palubního zásobníku vodíku FC vozu provedli v roce 2015 Li a kol. [19] v centru HySAFER Ulsterské univerzity, kteří uvažovali scénář nehody zahrnující vertikální únik vodíku směrem dolů z tepelně aktivovaného přetlakového zařízení (TPRD) pod FC vozidlem umístěným ve venkovním prostředí (tj. v otevřené atmosféře). K nezapálenému uvolnění vodíku může dojít v důsledku neočekávané iniciace vadného zařízení TPRD, například po těžké autonehodě. Zařízení TPRD jsou obvykle umístěna pod FC vozidlem (obrázek 8) a jejich výpustné otvory jsou orientovány svisle dolů, proto uvolněný vodík dopadá na podlahu [19]. Uvolněný vodík může vytvořit hořlavý mrak, který může způsobit požár.

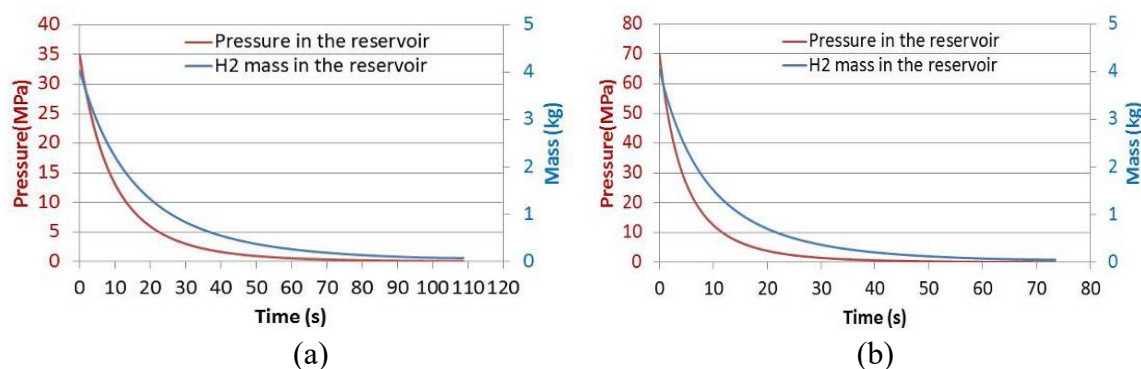
Rozměry typického sedanu použitého v dokumentu [19] jsou uvedeny na obrázku 9. Autoři předpokládali plnou palubní vodíkovou nádrž s objemem 171 litrů, převzatou ze specifikace vozu Honda FCX [20]. Byly zvažovány dva skladovací tlaky: 35 a 70 MPa. Předpokládá se, že zařízení TPRD je umístěno v blízkosti zadního kola pod vozidlem, jak je znázorněno na obrázku 9, a průměr jeho otvoru činí 4,2 mm [21]. Mezi další předpoklady patří: tlak a teplota okolí 1 atm, resp. 20 °C, bezvětří v okolí [19].



Obrázek 9. Geometrie FC vozidla a umístění zařízení TPRD [19].

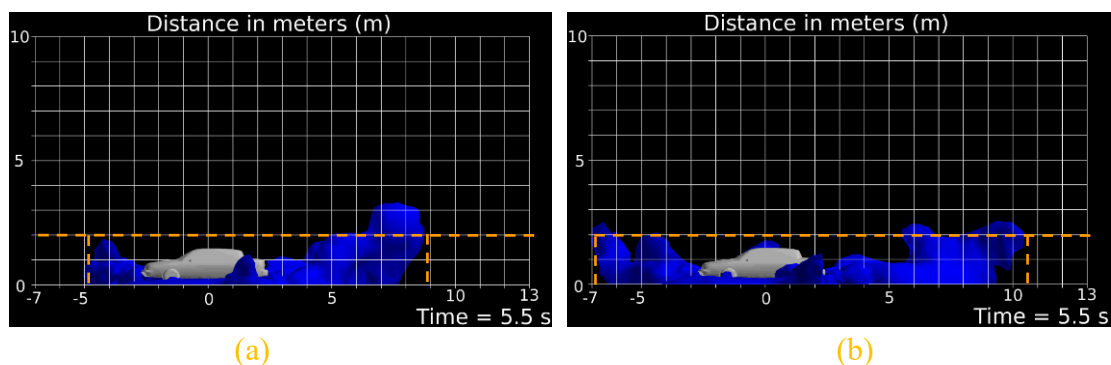
V této studii je jako kritérium škodlivosti pro širokou veřejnost použita konzervativní hodnota koncentrace vodíku 4 % obj., zatímco 8 % obj. je kritériem škodlivosti pro osoby, které nejsou vybaveny tepelným ochranným oděvem, jako jsou policisté a zdravotnický personál. Pro hasiče s celotělovou ochrannou výstrojí bude hořlavý mrak vodíku neškodný, protože je výstroj ochrání před možným požárem s vodíkovým plamenem. Kromě kritérií poškození zdraví člověka byla jako kritérium poškození přívodu vzduchu do budov zvolena koncentrace vodíku 4 % obj. Pokud se hořlavá obálka s koncentrací vodíku 4 % obj. dostane do místa přívodu vzduchu do výškové budovy, může tato skutečnost vést ke katastrofálním následkům jak pro osoby, které se nacházejí uvnitř budovy, tak pro její konstrukci [19].

V reálných podmínkách neprobíhá uvolňování vodíku z vysokotlakého zásobníku jako stabilní proces, ale jako pokles tlaku, při kterém tlak v zásobníku pozvolna klesá, dokud se zásobník zcela nevyprázdní. K simulaci dynamiky tlaku v zásobníku vodíku při nedostatečně roztržitém proudu lze použít již dříve zmiňovaný model fiktivní trysky. Byl použit nástroj e-Laboratoře „Adiabatic blow-down of storage tank“ (Adiabatický pokles tlaku ve skladovacím zásobníku). Výsledky jsou uvedeny na obrázku 10. Při uvolňování z nádrže s objemem 171 l a tlakem 35 MPa prostřednictvím otvoru s průměrem 4,2 mm je celková doba poklesu tlaku kratší než 110 s (<2 minuty) a přechod z nedostatečně roztržitého proudu na roztržitý nastává v 85 s. Při uvolňování z otvoru s průměrem 4,2 mm při tlaku 70 MPa s identickou hmotností činí celková doba poklesu tlaku méně než 75 s, přičemž přechod z *nedostatečně roztržitého proudu* na *roztržitý proud* nastává v 58. sekundě [19].

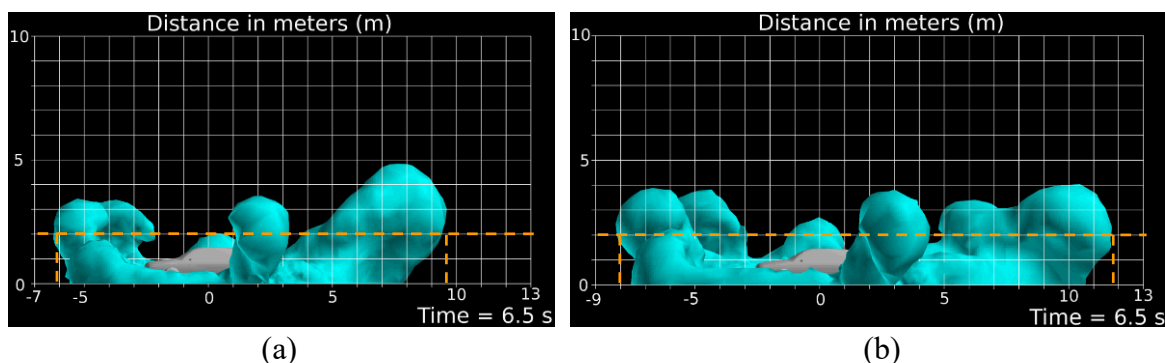


Obrázek 10. Adiabatický pokles tlaku v zásobnících z 35 MPa (a) a 70 MPa (b) (průměr otvoru – 4,2 mm) [19].

Jak je patrné na obrázku 11, nejkratší bezpečná vzdálenost od místa úniku pro členy zásahových jednotek bez tepelného ochranného oděvu činí 8,8 m a 10,5 m u skladovacího tlaku 35 MPa, resp. 70 MPa. Nebezpečná vzdálenost při úniku ze zásobníku vodíku s tlakem 70 MPa je téměř o 20 % delší než v případě zásobníku s tlakem 35 MPa. V obou případech se největší rozměry vodíkových obálek s koncentrací 8 obj. % vytvořily v blízkosti podlahy v čase 5,5 s po otevření zařízení TPRD. Následně se obálky zmenší a nebezpečné vzdálenosti se zkrátí.



Obrázek 11. Vodíkové obálky s koncentrací 8 obj. % zaznamenané 5,5 s po začátku uvolňování: a) skladovací tlak 35 MPa, b) skladovací tlak 70 MPa (rozsah největší nebezpečné vzdálenosti za předpokladu maximální tělesné výšky členů zásahových jednotek 2 m) [19].

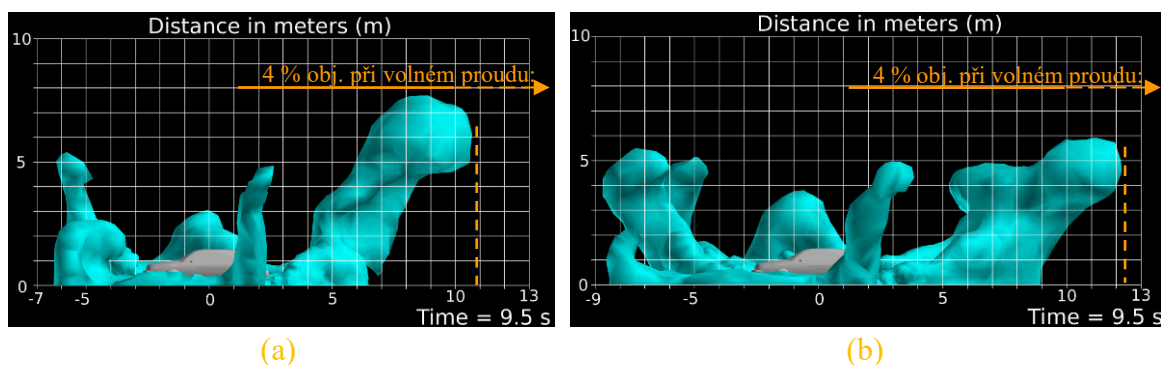


Obrázek 12. Vodíkové obálky s koncentrací 4 obj. % zaznamenané 6,5 s po začátku uvolňování: a) skladovací tlak 35 MPa, b) skladovací tlak 70 MPa (rozsah největší nebezpečné vzdálenosti za předpokladu maximální tělesné výšky členů zásahových jednotek 2 m) [19].

Jak je znázorněno na obrázku 12, největší nebezpečné vzdálenosti pro uvolnění tlaku 35 a 70 MPa činí pro veřejnost na zemi 9,4 a 11,8 m. V obou případech byly největší obálky vodíku s koncentrací 4 % obj. zaznamenány u podlahy v čase 6,5 sekundy po aktivaci zařízení TPRD. Poté se rozměry obálky i nebezpečné vzdálenosti zmenší. Na obrázku 12 jsou znázorněny pouze obálky 4 % obj. pro výšku nižší než 2 m (oranžové mezní čáry). Největší hořlavé obálky pro celou oblast jsou uvedeny na obrázku 13; lze z nich posoudit nebezpečné vzdálenosti v okolí [19].

Z obrázku 13 je patrné, že v případě přívodu vzduchu do budovy činí největší nebezpečné vzdálenosti 10,7 m a 12,3 m při úniku ze zásobníků s tlakem 35 MPa, resp. 70 MPa. Nebezpečná vzdálenost při uvolnění tlaku 70 MPa se v porovnání s uvolněním tlaku 35 MPa

prodlouží o 15 %. V obou případech se největší rozměry obálky s koncentrací 4 % obj. vyskytují 9,5 sekundy po aktivaci zařízení TPRD. Následně se obálky zmenší a nebezpečné vzdálenosti se zkrátí. Jak vyplývá z obrázku 13, porovnáme-li nebezpečné vzdálenosti od těchto proražených trysek s nebezpečnými vzdálenostmi vypočtenými pro volné trysky (27,4 m při skladovacím tlaku 35 MPa a 35,4 m při skladovacím tlaku 70 MPa), výsledky ukazují výrazné zkrácení o více než 60 % a 65 % v případě uvolnění z 35 MPa, resp. 70 MPa.



Obrázek 13. Rozsah vodíkové obálky s koncentrací 4 % obj. při nezapáleném úniku ze skladovacích zásobníků: a) tlak 35 MPa, b) tlak 70 MPa [19].

Závěrem lze konstatovat, že studie CFD, kterou provedli Li a kol. [19], prokázala tyto skutečnosti:

- v případě uvolnění nezapáleného vodíku ze skladovacích zásobníků pod tlakem 35 MPa a 70 MPa se největší nebezpečné vzdálenosti vyskytují do 10 s po otevření TPRD a doba trvání nebezpečí spojeného s únikem vodíku je kratší než 2 min,
- deterministické nebezpečné vzdálenosti pro úniky nezapáleného vodíku z TPRD namířené svisle dolů pod vozem s pohonem FC jsou výrazně kratší než v případě volného proudění,
- jak pro veřejnost, tak pro osoby, které nejsou vybaveny tepelným ochranným oděvem, se maximální nebezpečná vzdálenost od úniku nezapáleného vodíku pohybuje od 8 do 12 m v závislosti na tlaku v zásobníku,
- aby se zajistilo, že koncentrace vodíku bude v místě přívodu vzduchu do budov vždy nižší než LFL (4 % obj.), měla by být nebezpečná vzdálenost stanovena nejméně na 11 m pro úniky 35 MPa a na 13 m pro úniky 70 MPa.

Uvolňováním nezapáleného vodíku v uzavřených prostorech se budeme podrobněji zabývat v další přednášce „Uzavřené prostory“.

Obecně platí, že hlavní bezpečnostní strategii při úniku vodíku představuje minimalizace jeho hmotnostního průtok, například zmenšením velikosti případného úniku použitím co nejmenšího světlého průměru potrubí. Jestliže hořlavá směs vodíku a vzduchu představuje nepřijatelné riziko, ukazuje se z hlediska prevence hromadění vodíku na nebezpečnou



koncentraci jako nejúčinnější strategie „nezasahovat do úniku“ [1]. Popis prevence a zmírnění úniků nezapáleného vodíku je uveden níže.

8. Prevence úniků vodíku

Počátečními kroky před detekcí a zmírněním úniku vodíku jsou preventivní opatření k řízení souvisejících rizik. Preventivní opatření jsou bezpečnostní opatření, která mohou ovlivňovat kombinaci příčin nebezpečné události a zabránit jejímu vzniku. Tato opatření snižují pravděpodobnost vzniku události. Jejich cílem je zabránit ztrátě těsnosti a poruše zařízení. Patří mezi ně mimo jiné následující opatření:

- prevence vzniku hořlavé atmosféry díky bezpečnější konstrukci systémů FCH,
- pečlivý výběr materiálů pro systémy FCH s cílem předejít vodíkové křehkosti,
- minimalizace množství vodíku (a případně i kyslíku), které se skladuje a podílí se na provozu,
- validace zařízení,
- fyzikální ochrana,
- pravidelné kontroly těsnosti,
- pravidelná kontrola zařízení.

Mezi preventivní opatření týkající se mechanické integrity vodíkových systémů se řadí:

- validace konstrukce zařízení prostřednictvím výkonových zkoušek,
- pravidelné kontroly zařízení po jeho instalaci.

Zařízení lze vyřadit z provozu po uplynutí stanovené životnosti [22]. Cílem zkoušek a validace konstrukce je prokázat, že zařízení vyhovuje aplikaci, ve které má být použito. Lze provést i zkoušky odolnosti a trvanlivosti. Zkoušky odolnosti jsou základní zkoušky, kdy se testují všechny důležité vlastnosti systému (např. hydraulická tlaková zkouška). Zkoušky trvanlivosti jsou složitější: systém je vystaven cyklickému zatěžování a trvanlivost systému vyjadřuje doba do výskytu závady. Pro stanovení životnosti se použije koeficient, například požadavek na odolnost 50 000 zkušebních cyklů pro stanovenou životnost 10 000 cyklů [22].

Níže je uveden seznam zařízení, která jsou podrobována zkoušce mechanické integrity:

- zásobník plynného vodíku,
- ventily nádob,
- ohebné hadice,
- zařízení s rychlospojky.

Inherentně bezpečná konstrukce je přístup, který se zaměřuje na zmírnění nebo odstranění nebezpečí souvisejících s výrobkem nebo procesem. Podívejme se, jak lze posílit bezpečnost systému palivových článků (FC) snížením nebezpečí bez zásahu do technologie samotné. Současné systémy FC se bohužel často navrhuji s průměrem potrubí 5–15 mm a tlakem 0,5–1,5 MPa bez ohledu na nebezpečí. Hmotnostní průtok otvorem o průměru 5 mm při tlaku v zásobníku 0,5 MPa lze vypočítat pomocí *teorie nedostatečně roztržitého proudu* a činí přibližně 6 g/s. U potrubí s průměrem 15 mm a tlakem 1,5 MPa činí hmotnostní průtok 170 g/s [1].

Nyní odhadněme hmotnostní průtok u systému FC s výkonem 50 kW, který dodává energii velkým zařízením, jako jsou hotely, nemocnice, kancelářské budovy a obytné budovy s vyšším počtem bytových jednotek. Za předpokladu, že elektrická účinnost FC je 45 % a horní reakční teplo (spalování) vodíku se vzduchem je $[(286,1 \text{ kJ/mol})/(2,016 \text{ g/mol})]=141,92 \text{ kJ/g}$, lze hmotnostní průtok pro FC pracující při maximálním výkonu vypočítat jako $(50 \text{ kW})/0,45/(141,92 \text{ kJ/g})=0,78 \text{ g/s}$. Tento hmotnostní průtok lze zajistit například při tlaku 0,5 MPa přes omezovač v zásobníku nebo potrubním systému s průměrem ústí pouze cca 1,8 mm nebo při tlaku 0,2 MPa přes ústí s průměrem cca 2,9 mm [1].

Jak bylo uvedeno dříve v této přednášce, nebezpečná vzdálenost pro nezapálený únik je přímo úměrná průměru trysky a odmocnině z hodnoty skladovacího tlaku. Zmenšení průměru potrubí z 15 na 2,9 mm a snížení tlaku z 1,5 na 0,2 MPa tak může zkrátit nebezpečnou vzdálenost více než 14krát [1].

K porovnání nebezpečných vzdáleností u těchto dvou alternativ lze provést další analýzu:

- alternativa 1 – tlak 0,5 MPa a průměr potrubí 1,8 mm,
- alternativa 2 – tlak 0,2 MPa a průměr potrubí 2,9 mm.

Poměr nebezpečných vzdáleností u nezapálených úniků v alternativách 1 a 2 za předpokladu protržení otvoru v celém průměru potrubí lze odhadnout na 0,98, tj. jsou prakticky shodné. Tyto příklady zřetelně ukazují výhody vědecky podložené bezpečnostní konstrukce vodíkových systémů a systémů palivových článků, která zásadně zkracuje nebezpečné vzdálenosti, aniž by ovlivnila výkonové parametry systému FC [1].

9. Zmírňující opatření pro únik nezapáleného vodíku

Po provedení preventivních opatření se lze zaměřit na detekci a zmírňující opatření. Bezpečnostní opatření zaměřená na zmírnění nebo snížení závažnosti následků nebezpečné události se nazývají zmírňující opatření [22]. Z hlediska snížení rizika je třeba co nejvíce snížit počet ohrožených osob a zajistit odlehčení, potlačení nebo omezení rozsahu výbuchu. K detekci úniku lze případně použít plynové senzory. Důležité jsou také průtokoměry, infračervené detektory atd. Některá zmírňující opatření uvádíme níže [22, 23]:

- snížení objemu úniku, například použitím omezovačů průtoku vodíku,



- oddělení vodíku od oxidantů, nebezpečných materiálů a nebezpečných zařízení,
- používání poplašných a/nebo výstražných zařízení (včetně vodíkových senzorů a požárních hlásičů),
- používání vypínacích zařízení a systémů,
- stanovení a pokud možno oddělení nebo odstranění potenciálních zdrojů zapálení,
- prevence vzniku hořlavého prostředí, např. ventilací (přirozenou i nucenou),
- vyvýšení vodíkových systémů, použití průtokoměrů apod,
- umístění vně budov, je-li to možné,
- prevence přetížení,
- stanovení nebezpečných vzdáleností,
- dodržování zásad správného hospodaření, jakými jsou například průchodnost přístupových a evakuačních tras, pořádek a žádná nežádoucí vegetace u vodíkových systémů apod,
- zajištění reakce na mimořádné události.

10. Detekce úniků vodíku

Vzhledem k tomu, že vodík je bezbarvý a bez zápachu, představují senzory klíčový bezpečnostní prvek bezpečnosti čerpacích stanic a dalších vodíkových zařízení. Přidání odorantu do vodíku by usnadnilo detekci malých úniků. Ve většině případů to však není proveditelné, protože by to např. znamenalo otrávit drahý katalyzátor v palivových článcích. Detektory/senzory lze použít k detekci úniku vodíku, k automatickému odstavení systémů, k aktivaci poplachů a k vyrozumění zásahových jednotek. Vodíkové senzory jsou předmětem probíhajícího celosvětového výzkumu.

Při výběru vodíkových senzorů se uplatňují následující kritéria:

- odolnost a spolehlivost,
- citlivost na křížovou kontaminaci např. uhlovodíky,
- citlivost na vlhkost,
- doba odezvy,
- výskyt falešně pozitivních výsledků,
- citlivost na extrémní teploty,
- požadavky na údržbu,
- rozsah měření,
- přesnost.

Oblasti, na které se FCTO (úřad pro technologie palivových článků) zaměřuje, jsou shrnuty ve víceletém plánu výzkumu, vývoje a demonstrací v rámci programu pro vodík, palivové články a infrastrukturu technologie (dále jen „víceletý projektový plán“), který byl zveřejněn v roce 2007 [24] a aktualizován v roce 2012 [25]. V roce 2007 byl stanoven krátký seznam kritických parametrů vodíkových senzorů s cílovými specifikacemi. Tabulka obsahující metriku a příslušné specifikace je uvedena na obrázku 14. Takřka totožná tabulka byla zahrnuta do MYPP 2012 [25].

Table 3.8.2. Targets for Hydrogen Safety Sensor R&D	
• Measurement Range: 0.1%-10% • Operating Temperature: -30 to 80°C • Response Time: under one second • Accuracy: 5% of full scale • Gas environment: ambient air, 10%-98% relative humidity range • Lifetime: 10 years • Interference resistant (e.g., hydrocarbons)	

Obrázek 14. Cíle pro vodíkové senzory, jak nastínilo americké ministerstvo energetiky [26].



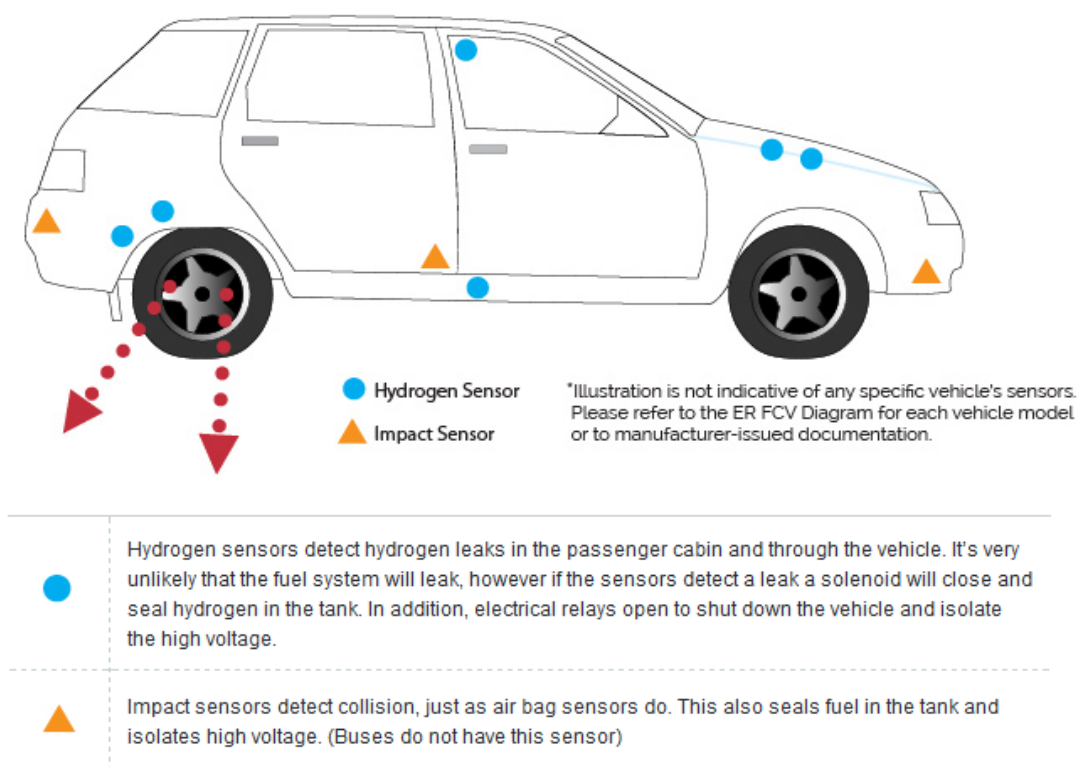
Je také důležité vědět, že v případě vodíkových bezpečnostních technologií nepředstavují senzory dokonalou detekční strategii, a to z důvodu vztlaku a difuzivity vodíku. Například ve velké hale nebo ve venkovním prostředí budou možnosti využití vodíkového senzoru značně omezené. Rozmístění senzorů je proto třeba pečlivě zvážit a k simulaci scénářů úniku použít nástroje, jako je CFD, které poskytnou informace o vhodném umístění senzorů. Pro ochranu personálu a zařízení jsou nezbytné jak pevně umístěné, tak osobní/ruční sledovací zařízení.

Navrhované rozmístění vodíkových senzorů je podrobně rozepsáno níže:

- místa, kde může dojít k úniku nebo rozlití vodíku,
- u vodíkových přípojek, které jsou běžně oddělené (například přípojky pro doplňování vodíku),
- místa, kde by se vodík mohl hromadit,
- v potrubích pro přívod vzduchu do budovy, pokud by jimi vodík mohl vnikat dovnitř,
- ve ventilačních šachtách budov, pokud se uvnitř budovy může uvolnit vodík.

Existují také požadavky na montáž vodíkových senzorů do vozidel s pohonem FC, které řidiče upozorní na možný únik. Rozmístění detektorů vodíku v elektrických vozidlech s pohonem na palivové články (FCEV) je na obrázku 15 znázorněno modrými body [27]:

- výfukové potrubí (řízení procesu),
- kabina pro cestující (bezpečnost),
- motor (bezpečnost),
- svazek palivových článků (bezpečnost).



Obrázek 15. Možné rozmístění vodíkových senzorů ve vozidle FCEV [27].

Běžně používaná úroveň koncentrace pro hlavní poplach činí 1 % obj. vodíku ve vzduchu, což odpovídá 25 % dolní meze hořlavosti. Tato úroveň koncentrace zpravidla poskytuje dostatečnou dobu pro vhodnou reakci, jako jsou vypnutí systému, evakuace personálu nebo jiná opatření, jsou-li nezbytná. Výstraha může být vystavena i dříve. Pro dosažení všech cílových specifikací je třeba použít více senzorových platforem, přičemž kombinace senzorových platforem vykazuje nejlepší výsledky.

Komerčně dostupné jsou tyto typy vodíkových senzorů/detektorů:

- elektrochemické detektory,
- detektory oxidů kovů,
- detektory tepelné konduktivity,
- terénní detektory plynů (FED),
- tenká fólie palladia na bázi odporu,
- katalytické detektory,
- elektromechanické mikrosystémy (MEMS),
- optická zařízení,
- výzkum dalších zařízení probíhá.



Při výběru detektorů je třeba zohlednit následující faktory [28]:

- přesnost (1–10 %),
- spolehlivost,
- možnost údržby,
- kalibrace,
- mezní hodnoty detekce (vysoké a nízké),
- doba odezvy (<10 s),
- obnovení nebo neobnovení funkčnosti v průběhu určitého času,
- dlouhá životnost (déle než 5 let),
- nízká spotřeba energie (<10 MW),
- snadná systémová integrace.

V roce 2009 provedl institut INERIS (Francie) v rámci projektu HYPER 2008 [29] zkušební program založený na částech mezinárodní normy IEC 61779-1&4 z roku 1998 [30], který se zaměřoval na posouzení výkonu detektorů vodíku dostupných v běžné distribuční síti. Tato zařízení byla elektrochemického a katalytického typu, tj. dvou typů, které se v průmyslových aplikacích používají nejčastěji. Katalytický senzor reagoval na náhlou expozici vodíku pětikrát rychleji než elektrochemický. Doba odezvy činila přibližně 10 s u katalytického senzoru a 50 s u elektrochemického senzoru. Tyto údaje platí i pro dobu obnovení funkčnosti senzoru po aktivaci. V mnoha praktických situacích je takto dlouhá doba přijatelná jen stěží [1].

Katalytické detektory zkoumané v rámci projektu HYPER rovněž vykazovaly jistou náchylnost ke ztrátě citlivosti a driftu nuly po dlouhodobější expozici vodíku. Tato skutečnost zdůrazňuje potřebu pravidelné kalibrace těchto zařízení. Vyšší vlhkost měla tendenci zvyšovat hodnoty katalytického detektoru pro konstantní obsah vodíku. Katalytický detektor byl velmi citlivý na přítomnost oxidu uhelnatého (CO), avšak toto rušení bylo pouze dočasné, tj. po ukončení expozice CO se detektor choval běžným způsobem [1].

Výzkum prováděný ve Společném výzkumném středisku, Institutu pro energii, Evropská komise, v rámci projektu HYPER prokázal, že doba potřebná k reakci elektrochemického senzoru na působení vodíku o známé koncentraci se prodlužuje při snížení průtoku plynu, tj. může být dvakrát delší pouze při snížení průtoku ze 100 na 30 ml/min. Toto zjištění je důležité zejména v případě, kdy je senzor určen ke kontrole vzniku výbušné atmosféry ve uzavřeném prostoru s palivovými články [1].

S rychlejšími katalytickými senzory souvisí další problém, který zatím není v literatuře dostatečně rozebrán. Ten představuje možnost zapálení směsi vodíku a vzduchu s vysokou

koncentrací vodíku samotným senzorem. Zapálení směsi vodíku a vzduchu s vysokým obsahem vodíku rekombinátory bylo pozorováno již dříve [31].

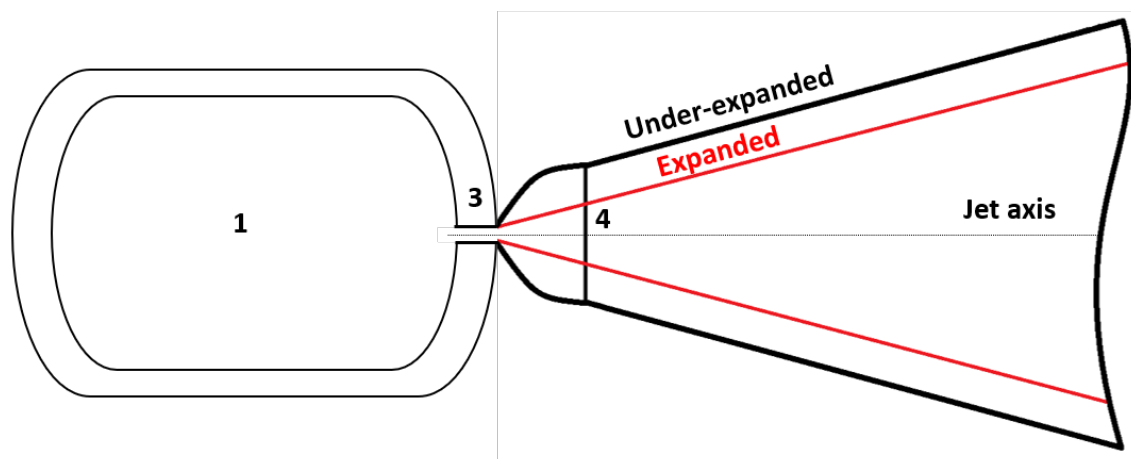
Pro detekci přítomnosti vodíku je v prodejní síti k dispozici řada metod a typů senzorů [23]. Mnohé z těchto detektorů jsou vhodné k použití v automatických výstražných a provozních systémech. Podrobné informace o stacionárních systémech najdete například v normě ISO 26142:2010 [32].

11. Nástroje e-Laboratoře pro příslušné jevy

Představení e-Laboratoře je uvedeno v Přednášce 1. Uživatelé přihlašují do e-Laboratoře na adrese <https://hyresponder.eu/e-platform/e-laboratory/> a vyberou příslušné nástroje ze seznamu. Tato část obsahuje podrobný popis nástrojů „Jet parameters model“ (Model parametrů proudění), „Similarity law for concentration decay and hazard distance“ (Zákon podobnosti pro rozpad koncentrace a nebezpečnou vzdálenost) a „Buoyancy calculation“ (Výpočet vztlaku).

11.1 Model parametrů proudění

Tento model popisuje parametry buď v roztržitém, nebo v nedostatečně roztržitěm proudě. Obrázek 16 obsahuje jednoduché schéma „roztržitého“ (červené čáry) a „nedostatečně roztržitého“ (černé čáry) proudě pro srovnání s obrázkem 4.



Obrázek 16. Jednoduché schéma „roztržitého“ (červené čáry) a nedostatečně roztržitěho“ (černé čáry) proudě.

1 – zásobník (vysokotlaká nádoba), 3 – výstup z trysky nebo ústí (vstup do fiktivní trysky), 4 – výstup z fiktivní trysky/ústí (kde tlak a rychlost jsou rovny okolní, resp. místní rychlosti zvuku). Všimněte si, že výstup 4 je určen pouze pro nedostatečně roztržitěný proud.

Kritický tlakový poměr pro přechod ke zvukovému proudění vodíku je přibližně 1,9. Pokud je kritický tlakový poměr menší než 1,9, proudění je podzvukové a roztržité, pokud je větší než 1,9, výstupní rychlost zůstává lokálně zvuková a proud je nedostatečně roztržitý. 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.

Kritický tlakový poměr přes netěsnost, p^* , určuje, zda je proudění podzvukové nebo zvukové/nadzvukové.

$$p^* = \frac{p_1}{p_{atm}} = \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (6)$$

Proto se řeší různé sady rovnic v závislosti na tom, zda je proud roztržštěný, nebo nedostatečně roztržštěný. Soubor rovnic pro nedostatečně roztržštěný proud podrobně popsal Molkov [11] a je založen na Noble-Abelově stavové rovnici pro vodík, rovnicích o zachování hmoty a energie, předpokladu, že ve stavu (4) (tzv. „efektivní průměr trysky“) je tlak roven tlaku okolí a rychlost je rovna místní rychlosti zvuku.

Sada rovnic pro roztržštěnou trysku využívá vztahy izentropického tlaku a hustoty.

Mezi vstupní parametry se řadí průměr ústí d_3 , okolní tlak p_4 , tlak vodíku v zásobníku p_1 a teplota vodíku v zásobníku T_1 . Po nastavení výše uvedených parametrů lze získat sadu vypočítaných parametrů, jak je uvedeno v tabulce 4.

Tabulka 4 Vstupní a výstupní parametry modelu parametrů proudu

Name	Symbol	Value	Unit
Orifice diameter	d_3	0.0095	m
Ambient pressure	p_4	1.01325e+5	Pa
H2 pressure in reservoir	p_1	2.05e+7	Pa
H2 temperature in reservoir	T_1	288	K
H2 density in reservoir	ρ_1	15.2366	kg/m ³
H2 density at orifice	ρ_3	9.48882	kg/m ³
Pressure in orifice	p_3	9.83938e+6	Pa
Velocity in orifice	V_3	1253	m/s
Temperature at the orifice	T_3	233	K
Diameter of effective nozzle exit	d_4	0.0942914	m
Density in effective nozzle exit	ρ_4	0.1025	kg/m ³
Velocity in effective nozzle exit	V_4	1178	m/s
Temperature in effective nozzle exit	T_4	239.501	K
Mass flow rate	$\dot{m}$	0.84318	kg/s

11.2 Zákon podobnosti pro rozpad koncentrace a nebezpečnou vzdálenost

Tento model se používá pro předpověď axiálního rozpadu koncentrace unikajícího plynu pro podzvukové, zvukové a nadzvukové proudění. Zákon podobnosti platí pro širokou škálu podmínek od roztržštěných až po velmi nedostatečně roztržštěné proudy. Model lze použít pro výpočet nebezpečných vzdáleností na základě velikosti hořlavé obálky.

Analýza experimentálních dat ukázala, že nejdelší, a tedy nejnebezpečnější plameny lze očekávat u nedostatečně roztržštěných proudů. S ohledem na to byl zákon podobnosti [33] pro



axiální rozpad koncentrace v kruhových nezapálených, roztržštěných proudů s dominující hybností, jak jej navrhli Chen a Rodi [34], nyní rozšířen a ověřen pro nedostatečně roztržštěné vodíkové proudy [1].

Rovnici pro výpočet axiální vzdálenosti od trysky k předepsané koncentraci vodíku lze zapsat takto:

$$x = \frac{5.4 \times D}{C_{ax}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_N}{\rho_S}} \quad (7)$$

kde x je axiální vzdálenost od trysky, D je průměr trysky, C_{ax} je hmotnostní podíl vodíku v axiální vzdálenosti x , ρ_N je hustota na výstupu z trysky a ρ_S je hustota vzduchu.

Při posuzování nedostatečně roztržštěných trysek je nutná znalost hustoty v trysce, ρ_N , (jako funkce tlaku v zásobníku a ztrát v cestě úniku). Tato hustota se vypočítá pomocí technologického nástroje „Hydrogen jet parameters“ (Parametry vodíkového proudu), jehož popis je uveden v kapitole 10.1. U roztržštěných proudů jsou výpočty založeny na vztazích izentropického tlaku a hustoty (tato sada rovnic je podrobněji popsána v technologickém nástroji „Flame length and separation distance for jet fires“ (Délka plamene a separační vzdálenost u tryskových požárů).

Korelace mezi polohou špičky vodíkového plamene a polohou tří různých koncentrací vodíku (8 %, 11 % a 16 %) v nezapáleném proudu vycházejícím ze stejného zdroje úniku.

Tento technický nástroj vypočítá axiální vzdálenost od trysky odpovídající umístění různých předem zvolených koncentrací vodíku, konkrétně 4 %, 8 %, 11 %, 16 % a 29,5 % obj. v nezapálených proudech. Tento model také umožňuje uživatelům zvolit si vlastní koncentraci k analýze v rámci mezí hořlavosti vodíku od 4 % do 75 % obj.

Příklad vstupních a výstupních parametrů a jejich hodnot tohoto nástroje je uveden v tabulce 5.

Tabulka 5 Vstupní a výstupní parametry tohoto nástroje

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
Axial distance from nozzle to 7% by vol. H2	$X_{7\%,H_2}$	5.50167	m

11.3 Výpočet vztlaku

Tento nástroj ukazuje vliv zkrácení nebezpečné vzdálenosti v důsledku vztlaku při nezapálených únicích. Umožňuje vypočítat vzdálenost od vypouštěcí trysky ke koncentraci, při níž únik přechází z režimu proudu s dominující hybností na režim proudu s dominujícím vztlakem, jakož i nebezpečnou vzdálenost ke koncentraci 4 % obj. vodíku.

Všechna proudění lze na základě vztlaku rozdělit do tří typů. Tyto typy proudění jsou schematicky znázorněny na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** pro horizontální proudění. Proud s dominující hybností nejsou ovlivněny vztlakem. Proud s plně dominujícím vztlakem rychle změni směr proudění z horizontálního na vertikální. Třetí typ proudů, které lze označit jako přechodové, má blíže k trysce část s dominující hybností a dále po proudu část s dominujícím vztlakem, kde rychlost proudění klesá a jeho průměr se zvětšuje. Pro bezpečnostní vodíkové inženýrství je důležité vědět, kdy k tomuto přechodu dochází. Přímou totiž ovlivňuje separační vzdálenost, a tím i bezpečnost a náklady na vodíkový systém nebo infrastrukturu.

Zde prezentovaný technologický nástroj pro kvalifikaci vodíkového proudu (roztržitého i nedostatečně roztržitého) nebo jeho části jako proudu s dominující hybností a zbytku proudu coby proudu s dominujícím vztlakem vychází z práce [17, 18], která zohledňovala pouze roztržité proudy. Závislost poměru vzdálenosti a průměru trysky (x/D) na Froudeově čísle (Fr) při konkrétní koncentraci vodíku ve vzduchu je vyjádřena rovnicí (5). Pro nedostatečně roztržité proudy byly průměr výstupu z fiktivní trysky a rychlost na výstupu z fiktivní trysky vypočteny podle teorie nedostatečně roztržitých trysek [11]. Roztržité a nedostatečně roztržité proudy se řídí stejnou funkční závislostí s přesností 20 % přijatelnou pro technické aplikace.

Je uvedeno pět teoretických křivek (plné čáry) a experimentální data pro roztržité proudy [17, 18] a data jiných výzkumníků pro nedostatečně roztržité proudy. Prakticky všechny nedostatečně roztržité proudy při vodíkových haváriích/nehodách budou v režimu s dominující hybností. Čtyři z pěti teoretických křivek v grafu se vztahují na koncentrace vodíku 4 %, 17 %, 30 % a 60 % objemových. Každá z těchto čtyř křivek má vzestupnou vztlakovou část a plochou část, kde dominuje hybnost.

Je důležité zdůraznit, že Froudeovo číslo při přechodu ze vztlakové části křivky do hybnostní závisí na koncentraci vodíku. Například při axiální koncentraci vodíku 60 % obj. zůstává proud v režimu s dominující hybností, dokud $\text{Log}(Fr) > 3,5$, zatímco aby byl proud v režimu s dominující hybností v axiálním místě, kde koncentrace vodíku klesne na 4 % obj. (LFL), musí být Froudeovo číslo na výstupu z trysky mnohem vyšší, tj. $\text{Log}(Fr) > 6,5$ (o tři řády vyšší).

Pro vodíkové bezpečnostní inženýrství je zajímavá zejména křivka „Downward jets“ (Proud s směřující dolů). U proudu směřujícího svisle dolů udává bezrozměrnou vzdálenost od trysky k bodu obratu, kde proud mění směr proudění z klesajícího na stoupající. Pro výpočet vzdálenosti k bodu zvratu je nutná pouze znalost Froudeova čísla na trysce (fiktivní trysce). Pátá křivka dle



očekávání protíná všechny čtyři ostatní křivky v oblasti přechodu z proudění s dominující hybností k proudění řízenému vztlakem.

V e-Laboratoři jsou k dispozici dva dílčí nástroje věnované vlivu vztlaku na zkrácení nebezpečné vzdálenosti u nezapálených úniků. Tyto nástroje pomáhají odpovědět na následující dvě otázky.

- Otázka 1: stanovit u horizontálního úniku vzdálenost a koncentrace, při nichž v úniku dominuje vztlak, a nebezpečnou vzdálenost do dosažení 4 % obj. podél středové osy proudění.
- Otázka 2: stanovit u vertikálního úniku směřujícího dolů vzdálenost a koncentrace, při nichž začne proudění stoupat v důsledku působení vztlaku.

Vstupní parametry tohoto nástroje jsou tlak vodíku v zásobníku p_1 , teplota vodíku v zásobníku T_1 , průměr ústí d_3 a okolní tlak p_4 . Jako příklad jsou výstupní parametry nástroje pro Q1 uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 Příklad vstupních a výstupních parametrů tohoto nástroje

Name	Symbol	Value	Unit
H2 pressure in reservoir	p_1	7e+6	Pa
H2 temperature in reservoir	T_1	288	K
Orifice diameter	d_3	0.02	m
Ambient pressure	p_4	1.01325e+5	Pa
Axial distance from nozzle to C_B % by vol. H_2 where release becomes buoyant.	X	35.6746	m
Axial distance from nozzle to 4% by vol. H_2	$X_{4\%}$	44.2411	m
Axial distance from nozzle to 17% by vol. H_2	$X_{17\%}$	9.24329	m
Axial distance from nozzle to 30% by vol. H_2	$X_{30\%}$	4.5659	m
Axial distance from nozzle to 40% by vol. H_2	$X_{40\%}$	3.08551	m
Axial distance from nozzle to 50% by vol. H_2	$X_{50\%}$	2.43964	m
Axial distance from nozzle to 60% by vol. H_2	$X_{60\%}$	1.28028	m

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. Projekt HyFacts. Kapitola R. Hydrogen releases and dispersion (Uvolňování a rozptyl vodíku). K dispozici na adrese: <https://www.h2euro.org/hyfacts/category/education-training/> [přístup k datu 12.11.2020].

3. EIGA, Evropské sdružení technických plynů (2007). Stanovení bezpečnostních vzdáleností. Dokument IGC 75/07/E.
4. Nařízení Komise (EU) č. 406/2010 ze dne 26. dubna 2010, kterým se provádí nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 79/2009 o schvalování typu vozidel na vodíkový pohon. Úřední věstník Evropské unie. Svazek 53, 18. května 2010. K dispozici na adrese: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:FULL:EN:PDF> [přístup k datu 12.11.2020].
5. Saffers, JB, Makarov, DV a Molkov, VV (2011). Modelování a numerická simulace prostupování a šíření vodíku v garáži s adiabatickými stěnami a nehybným vzduchem. Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 36(3), s. 2582–2588.
6. Adams, P, Bengaouer, A, Cariteau, B, Molkov, V a Venetsanos, AG (2011). Přípustná míra prostupování vodíku ze silničních vozidel. Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 36, s. 2742–2749.
7. Dulov, VG a Luk'yanov, GA (1984) *Gasdynamics of the outflow processes* (Dynamika výtoku plynů). Nauka, Novosibirsk.
8. Ishii, R, Fujimoto, H, Hatta, N a Umeda, Y (1999). Experimental and numerical analysis of circular pulse jets (Experimentální a numerická analýza kruhových pulzních proudů). Journal of Fluid Mechanics. Svazek 392, s. 129–153.
9. Birch, AD, Brown, DR, Dodson, MG a Swaffield, F (1984) The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas (Struktura a rozpad koncentrace vysokotlakých proudů zemního plynu). Časopis Combustion Science and Technology (Věda a technologie spalování), svazek 36, s. 249–261.
10. 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.
11. Molkov, V, Makarov, D a Bragin, M (2009). Physics and modelling of under-expanded jets and hydrogen dispersion in atmosphere (Fyzika a modelování nedostatečně roztržštěných proudů a rozptylu vodíku v atmosféře), Fortov, VE a kol. (eds) Physics of Extreme States of Matter (Fyzika extrémních stavů hmoty) 2009 Černogolovka, Rusko, s. 143–145.
12. 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.
13. Chen, CJ a Rodi, W (1980). Vertical turbulent buoyant jets – a review of experimental data (Vertikální turbulentní vztlakové proudy – přehled experimentálních dat), řada The Science Applications of Heat and Mass Transfer (Vědecké aplikace přenosu tepla a hmoty), sv. 4, ed. Chen C. J. 1980, Pergamon Press: Oxford, s. 83
 14. Molkov, V a Bragin, M (2009) High-pressure hydrogen leak through a narrow channel (Únik vysokotlakého vodíku úzkým kanálem). Uvedeno v: *Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere (Nerovnovážné jevy: plasma, spalování, atmosféra)*; Torus Press: Moskva, s. 332–338.
 15. Mezinárodní požární řád (2006). Mezinárodní rada požárního řádu.
 16. NFPA 55, Národní asociace požární ochrany (2010). Norma pro skladování, používání a manipulaci se stlačenými plyny a kryogenními kapalinami v přenosných a stacionárních zásobnících, lahvích a nádržích. Quincy, MA, 2010.
 17. Shevyakov, GG, Tomilin, VP a Kondrashkov, YuA (1980). Influence of buoyancy on the mixing length in a free turbulent jet (Vliv vztlaku na délku směšování ve volném turbulentním proudě), Engineering Physical Journal, uloženo u VINITI, N3671-80 (v ruštině).
 18. 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).
 19. Li, Z, Makarov, D, Keenan, J, Molkov, V (2015). CFD studie uvolňování nezapáleného a zapáleného vodíku z TPRD pod vozidly s palivovými články. 6. mezinárodní konference o vodíkové bezpečnosti, 19.–21. října 2015, Jokohama, Japonsko.
 20. Technické údaje vozidla Honda FCX (2009). K dispozici na adrese: <https://global.honda/heritage/timeline/product-history/automobiles/2016Clarity-Fuel-Cell.html> [přístup k datu 12.11.2020].
 21. Tamura, Y, Takabayashi, M a Takeuchi, M (2014). The spread of fire from adjoining vehicles to a hydrogen fuel cell vehicle (Šíření požáru ze sousedních vozidel na vozidlo s vodíkovými palivovými články). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy, svazek 39, s. 6169–6175.
 22. Projekt HyFacts. Kapitola RM. Prevention and mitigation of releases: Detection and ventilation (Prevence a zmírňování následků úniků: Detekce a ventilace). K dispozici na

- adrese: <https://www.h2euro.org/hyfacts/category/education-training/> [přístup k datu 12.11.2020].
23. ISO/TR 15916 (2004). Základní hlediska bezpečnosti vodíkových systémů. Mezinárodní organizace pro normalizaci. Technická komise ISO 197, Vodíkové technologie. Mezinárodní organizace pro normalizaci, Ženeva.
 24. Plán výzkumu, vývoje a demonstrací v rámci programu pro vodík, palivové články a infrastrukturní technologie na období 2005–2015, (2007).
 25. DOE FCTO Víceletý plán výzkumu, vývoje a demonstrací, (2012) https://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f23/fcto_myrrdd_safety_codes.pdf [přístup k datu 12.11.2020].
 26. Buttne W, Burgess R, Schmidt K, Wright H, Rivkin C a kol. Hydrogen safety sensor performance and use gap analysis (Analýza výkonnosti vodíkového bezpečnostního senzoru a mezery v jeho použití). 7. mezinárodní konference o bezpečnosti vodíku (ICHS 2017), Hamburk, Německo, 11.–13. září 2017.
 27. CFCP, California Fuel Cells Partnership, 2014. K dispozici na adrese: <http://cafcsp.org/> [přístup k datu 12.11.2020].
 28. Bader, M. Hydrogen sensors (Vodíkové senzory). H2FC Evropská technická škola vodíkových a palivových článků, 2014.
 29. 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. K dispozici na adrese: <http://www.hyperproject.uk/page/4942/> [přístup k datu 12.11.2020].
 30. IEC 61779-1 (1998). Elektrické přístroje pro detekci a měření hořlavých plynů – Část 1: Všeobecné požadavky a metody zkoušek. Norma IEC 61779-4: Požadavky na provedení zařízení skupiny II s rozsahem do 100 % dolní meze výbušnosti. Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC).
 31. Blanchat, TK a Malliakos, A (1998). Performance testing of passive autocatalytic recombiners (Výkonové testy pasivních autokatalytických rekombinátorů), NUREG/CR-6580, SAND97-2632.
 32. ISO 26142:2010. Hydrogen detection apparatus – Stationary applications (Přístroje pro detekci vodíku – Stacionární aplikace). Technická komise ISO 197, Vodíkové technologie. Mezinárodní organizace pro normalizaci.
 33. S. L. Brennan, D. V. Makarov a V. Molkov, „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*, sv. 22, č. 3, s. 353–359, květen 2009.
34. C. Chen a W. Rodi, *Vertical turbulent buoyant jets – a review of experimental data* (Vertikální turbulentní vztlakové proudy – přehled experimentálních dat). Oxford: Pergamon Press, 1980.
 35. V. Molkov a J.-B. Saffers, „Hydrogen Jet Flames“ (Plameny vodíkového proudu), mezinárodní časopis o vodíkové energii *International Journal of Hydrogen Energy*, sv. 38, č. 19, s. 8158– 8141, červen 2013.