



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

## Přednáška 11

### Uzavřené prostory

### ÚROVEŇ IV

### Důstojník specialista

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

Toto téma je k dispozici **POUZE** na ÚROVNI IV

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

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





### Upozornění

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

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

### Poděkování

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

## Souhrn

Tato přednáška poskytuje zasahujícím osobám přehled o použití palivových článků a vodíkových technologií v uzavřených prostorech, např. v interiérech, v parkovacích domech a v tunelech. Je třeba zdůraznit, že všechny informace uvedené v předchozích přednáškách jsou platné, a proto zde uvádíme pouze výsledky nejnovějšího doplňujícího výzkumu. Tato přednáška upozorňuje na specifická nebezpečí spojená se systémy FCH umístěnými v interiéru. Zahrnuje důležitá témata pasivní a nucené ventilace, dobře ventilovaných a nedostatečně ventilovaných vodíkových požárů, včetně dvou režimů samovolného vyhasnutí, a vnějšího plamene. Přednáška pojednává též o jevu tlakové špičky, který je specifický pro vodík.

## Klíčová slova

Uzavřený prostor, ventilace, jev tlakové špičky, parkovací domy, tunely, dobře ventilované požáry, nedostatečně ventilované požáry, samozhášivý plamen, vnější plamen.

## Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova.....	3
<b>1. Cílové publikum.....</b>	<b>5</b>
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. Nebezpečí a související rizika při používání vodíku v uzavřených prostorech .....	6
4. Permeační netěsnosti.....	10
5. Úniky a rozptyl vodíku uvnitř budov .....	10
6. Přirozená a nucená ventilace .....	12
7. Jev tlakové špičky .....	15
8. Parkoviště.....	20
9. Tunely.....	23
9.1 Vliv rychlosti ventilace na rozptyl v tunelech.....	24
9.2 Přejít z deflagrace k detonaci (DDT) v tunelu.....	25
10. Režimy vodíkových požárů v interiérech.....	27
10.1 Dobře ventilované požáry.....	27
10.2 Nedostatečně ventilované požáry .....	30
10.3 Režim samovolného uhašení plamene.....	30
10.4 Režim externího plamene .....	34
11. Využití e-Laboratoře .....	37
11.1 Pasivní ventilace uzavřeného prostoru jedním ventilačním otvorem: homogenní koncentrace vodíku .....	37
11.2 Jev tlakové špičky pro nezapálené úniky .....	42
11.3 Jev tlakové špičky pro zapálený únik .....	48
Poděkování .....	54
Literatura a odkazy .....	55

## 1. Cílové publikum

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

Používání technologií FCH v uzavřených prostorech je spojeno s vyšší pravděpodobností hromadění vodíku. Díky rozvoji těchto technologií je možné najít instalace FCH nejen ve venkovním prostředí, ale i v interiéru. Mezi příklady se řadí: Vysokozdvížené vozíky na palivové články ve skladech, vozidla na palivové články na parkovištích, v tunelech a garážích, elektrolyzéry a palivové články pro domácí použití atd. V případě incidentu zahrnujícího vnitřní zařízení FCH je možný následující vývoj: obyvatelé nemusí být schopni opustit budovu/objekt; zasahující osoby nemusí být schopny plnit své povinnosti, aniž by ohrozily vlastní život; částečná nebo úplná demolice ohrožuje životy zasahujících osob i široké veřejnosti. Proto je téma bezpečného používání vodíkových a palivových článků v uzavřených prostorech pro zasahující osoby velmi důležité. Zatímco při úniku vodíku venku je vztlak přirozenou bezpečnostní výhodou, která zajišťuje jeho rychlé uvolnění/rozptýlení, při úniku uvnitř budov tomu tak být nemusí. Rychlé uvolňování vodíku v interiéru může vést buď k nárůstu tlaku, nebo k jeho hromadění, a tím k závažnějším následkům.

Ulsterská univerzita byla jedním z partnerů v evropsky financovaném projektu Hyindoor „Přednormativní výzkum bezpečného používání palivových článků a vodíkových systémů v interiérech“ ([www.hyindoor.eu](http://www.hyindoor.eu)). Hlavní výstupy z tohoto projektu vedly k hlubšímu pochopení jevů souvisejících s úniky z vodíkových zařízení ve vnitřním prostředí a k vytvoření pokynů pro používání vodíku v interiérech a tunelech [1, 14].

Na konci této přednášky budou členové zásahové jednotky / školitelé schopni:

- identifikovat hlavní rizika související s používáním vodíku v interiéru,
- rozlišit mezi pasivní a nucenou ventilací,
- popsat hlavní režimy požárů vodíku v interiéru,
- pochopit účinky ventilace deflagrace,
- vysvětlit jev tlakové špičky,
- používat nomogramy k posouzení možnosti výskytu jevu tlakové špičky (PPP).

## 3. Nebezpečí a související rizika při používání vodíku v uzavřených prostorech

Existuje celá řada situací, kdy se FCH nachází v uzavřených prostorech (viz výstup D1.1 z projektu HyResponder [2]). Celkové objemy uzavřených prostor mohou být různé, od malé garáže přes skříňku pro stacionární palivový článek (FC) až po rozsáhlý sklad. Rychlost uvolňování vodíku může být také různá, od uvolňování malým hmotnostním průtokem z přírodního potrubí do palivového článku (FC) až po uvolňování ve velkém měřítku z vysokotlakého zásobníku, například uvolňování přes zařízení TPRD automobilu na palivové články zaparkovaného v garáži obytného domu. V případě mimořádných událostí nebo havárií



na systémech FCH umístěných uvnitř budov jsou prioritami zasahujících osob: ochrana lidských životů, ochrana majetku a ochrana životního prostředí. Kritéria poškození zdraví člověka a kritéria poškození stavebních konstrukcí jsou podrobně uvedena v příslušné přednášce.

Mezi nebezpečí související s nehodou nebo havárií v systémech FCH umístěných uvnitř budov se řadí:

- vyčerpání kyslíku a následné udušení,
- vliv vysoké teploty a tepelného toku z tryskových požárů,
- popáleniny způsobené únikem kapalného vodíku,
- účinky přetlaku,
- zranění a ztráta života,
- zhroucení konstrukce,
- „domino“ efekty,
- poškození životního prostředí.

Osoby, které navrhují/schvalují/vlastní vnitřní instalaci systémů FCH, by měly pečlivě zvážit možnosti zmírňování „škod na konstrukcích a infrastrukturních zařízeních a minimalizovat narušení provozu, zachovat image společnosti a snížit přímé a nepřímé finanční ztráty“ [3, 4]. „Pozornost by měla být věnována prevenci eskalačních účinků předmětů, událostí a uspořádání zařízení na škody a hodnoty a významu majetku v objektu a jeho okolí“ [3].

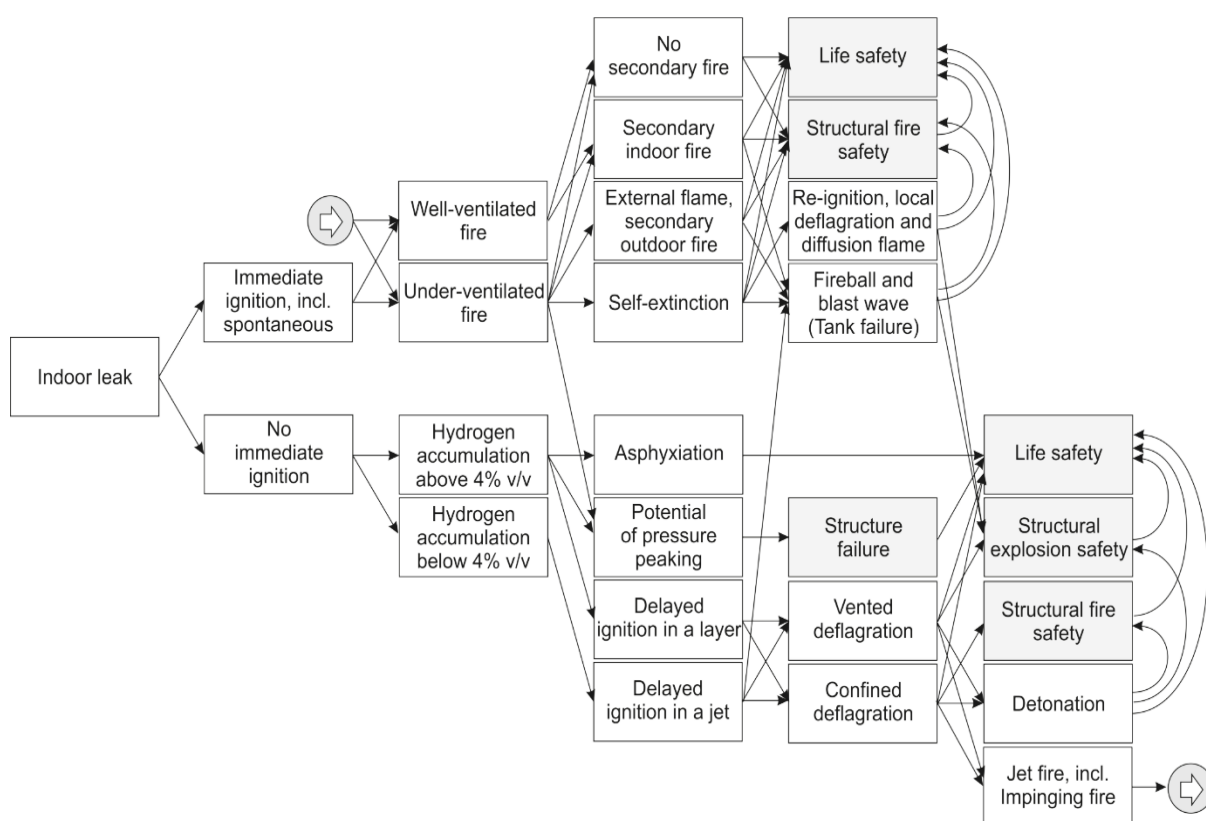
V případě úniku, ať velkého či malého, může vzniknout řada potenciálních jevů. Mezi ně se mohou řadit:

- Nezapálený únik vodíku. Pokud k němu dojde v interiéru, je třeba zvážit následující otázky: posouzení velikosti hořlavé obálky, určení úrovně potenciálního přetlaku (bez zapálení) a posouzení vztahu mezi rychlostí ventilace a únikem.
- Zapálený únik. Pokud dojde k zapálení úniku se vznikem tryskového požáru, je třeba zvážit řadu otázek, jako například: přenos tepla do okolí, udržitelnost požáru (tj. zda je k dispozici dostatečné množství kyslíku, které jej podpoří, nebo zda dojde k jeho zhasnutí), vztah mezi ventilací a chováním ohně, možnost opětovného vzplanutí požáru.
- Výbuch: Zde je třeba si položit otázky: pokud se nezapálený únik hromadí a následně se vznítí, což vede buď k deflagraci, nebo k detonaci, jaké jsou následky? Jaký je vztah mezi ventilací a deflagračním přetlakem?

Vodík má vysokou tendenci unikat, což může ve vnitřních prostorech představovat zásadní problém. Je zřejmé, že hromadění vodíku v uzavřených prostorech může vést ke vzniku hořlavé směsi se vzduchem (nebo kyslíkem). S nežádoucím únikem souvisejí i další problémy, jako

jsou jev tlakové špičky (PPP) a vliv úbytku kyslíku. Vhodná ventilace může tyto účinky zmírnit. Dojde-li k úniku vodíku, požár (tryskový požár nebo kouř) se v uzavřeném prostoru rozšíří a roste. Kromě plamene a s ním spojených nebezpečí, jako jsou teplota a tepelný tok, se budou vytvářet horké plynné spaliny, které mohou rovněž představovat nebezpečí. Při stoupání těchto plynných spalin se může pod stropem uzavřeného prostoru nahromadit vrstva horkých plynů. Způsob šíření požáru závisí na typu hoření, interakci s okolím a přístupu kyslíku [5]. V závislosti na velikosti a umístění úniku může samotný plamen zasáhnout konstrukční prvky uzavřeného prostoru.

Jevy související s bezpečností a potenciální následky spojené s vnitřními událostmi/nehodami zahrnujícími systémy FCH jsou shrnuty ve schématu na obrázku 1.



Obrázek 1. Jevy a důsledky související s bezpečností. Bílá pole odpovídají vodíkovým jevům, šedá pole důsledkům [4].

Jak je patrné z obrázku 1, po úniku vodíku v uzavřených prostorech jsou možné dvě varianty: bez okamžitého zapálení (spodní větev diagramu) a okamžité zapálení, včetně samovolného vznícení (horní větev diagramu). Zapálení uniklého vodíku může být způsobeno přítomností otevřeného plamene, horkého povrchu, elektrické nebo mechanické jiskry a dalších faktorů, jakož i specifickým jevem *samovolného vznícení* vodíku (v potrubí naplněném vzduchem) tzv. difuzním mechanismem [6].

Pokud dojde k okamžitému zapálení úniku, může se následný požár rozvinout ve dvou režimech: *dobře ventilovaný* a *nedostatečně ventilovaný*. *Dobře ventilovaný požár* je



charakterizován relativně nízkou rychlostí uvolňování vodíku a úplným vyhořením vodíku uvnitř prostoru. Mezi nebezpečí související s dobře ventilovaným požárem se řadí:

- přímý vliv plamene a proudu horkých zplodin hoření,
- tepelné záření z horké vrstvy vytvořené pod stropem,
- horké pevné povrchy, jako jsou střechy, selhání konstrukce nosných stavebních prvků v důsledku přímého působení plamene atd.

Zvýšení rychlosti uvolňování vodíku může mít za následek přechod k *nedostatečně ventilovanému požáru*, kdy je kyslík spotřebováván rychleji, než může být doplněn ventilací. Taková situace může vyústit ve dva různé dílčí režimy: *vnější plamen* vznikající v průduších (bez hoření uvnitř uzavřeného prostoru), a úplné *samovolné vznícení* uvnitř uzavřeného prostoru. Po samovolném vyhasnutí požáru, např. v zásobníku FC, se od zasahujících osob vyžadují další opatření, aby se zajistilo, že se v uzavřeném prostoru, v němž je FC umístěn, nehromadí vodík nad nebezpečnou koncentrací.

Oba typy požáru mohou mít za následek zapálení hořlavých materiálů uvnitř prostoru a vznik *sekundárního požáru v interiéru*. Požár tak bude pokračovat i po zastavení uvolňování vodíku, např. uzavřením bezpečnostních ventilů, a hrozí další nebezpečí, např. uvolňování toxických zplodin. Nedostatečně ventilovaný požár se vyznačuje poměrně vysokou rychlostí uvolňování vodíku. Existuje tedy možnost vzniku jevu tlakové špičky (PPP), která ohrožuje strukturální integritu uzavřeného prostoru [6, 7]. Je třeba poznamenat, že jak nezapálené, tak i zapálené úniky mohou v důsledku PPP vytvářet nebezpečný přetlak. Výpočet přetlaku v důsledku PPP se však u nezapáleného úniku a u tryskového požáru liší. Nedostatečně ventilovaný požár může také způsobit externí plamen, tj. *sekundární venkovní požár*.

Pokud se oba typy požárů i sekundární požáry neuhásí a pokračují v hoření, může to potenciálně vést ke katastrofickému selhání skladovací nádrže (nádrží) umístěné (umístěných) uvnitř, což má za následek rychlé uvolnění energie a následné zapálení velkého množství vodíku, které vyvolá *ohnivou kouli a tlakovou vlnu*. Vnější plameny a sekundární venkovní požáry mohou rovněž způsobit selhání venkovních zásobníků vodíku. Proto by měla být přijata opatření, která takovým situacím předejdou, např. umístěním vnějších zásobníků vodíku do dostatečné vzdálenosti od ventilačních otvorů uzavřeného prostoru.

Samovolně uhašený, nedostatečně ventilovaný požár ventilací se může znovu rozhořet, jakmile do uzavřeného prostoru pronikne čerstvý vzduch. To může potenciálně vést k *lokalizované deflagraci* a vzniku difuzního plamene v zónách obsahujících vodík nad dolní mezí hořlavosti (LFL), tj. 4 % obj. Všechny typy požárů představují riziko pro *zabezpečení života* (přímé tepelné poškození plamenem, poškození tepelným zářením, přetlak způsobený PPP a toxicita zplodin hoření vznikajících při sekundárních požárech) i nebezpečí pro *požární bezpečnost konstrukce* (oslabení celistvosti konstrukce a případné zhroucení stěn v důsledku dlouhodobého působení požáru) [4].

Pokud by nedošlo k zapálení vodíku ihned po jeho úniku, vodík by se v uzavřeném prostoru postupně hromadil. Při úniku s vysokým průtokem, který překračuje kapacitu ventilace, může dojít ke koncentraci vodíku nad úroveň LFL, což vytváří možnost *opožděného zapálení ve vrstvě* s následnou deflagrací. Kromě toho může při uvolnění s vysokým průtokem dojít k udušení a k jevu PPP. Přestože vodík není jedovatý/toxický, nepodporuje metabolismus. Podobně jako u jiných plynů (s výjimkou kyslíku) existuje riziko udušení především v uzavřených prostorech v důsledku vyčerpání kyslíku [8]. Uvolňování vodíku nižší rychlostí, které nevede k nahromadění vodíku ve vrstvě nad koncentrací 4 % obj., může přesto způsobit *opožděné zapálení v proudu*. Oba typy opožděného zapálení mohou mít za následek deflagraci směsi vodíku se vzduchem s průvodním jevem v podobě přetlaku, který může způsobit i naprosté zničení konstrukce uzavřeného prostoru. Rozšířenou techniku zmírňování následků výbuchu představuje ventilace deflagrace. Pokud je uzavřený prostor vybaven ventilačními otvory, které zajišťují odlehčení deflagračního přetlaku, může být výsledkem *ventilovaná deflagrace*. *Uzavřená deflagrace* se od ventilované deflagrace liší absencí významných otvorů vedoucích do atmosféry, což zabraňuje uvolnění tlaku v uzavřeném prostoru. Tlaková špička v uzavřené nádobě pro stechiometrickou směs vodíku se vzduchem může zpočátku při NTP dosáhnout až 815 kPa [9]. Takový přetlak by spolehlivě zničil jakoukoli civilní budovu (obecně schopnou odolat přetlakům okolo 10–20 kPa).

V některých případech může deflagrace vyústit v přechod k *detonaci*. Vzhledem k vyšší rychlosti šíření plamene a vyšší úrovni přetlaku představuje detonace větší nebezpečí než deflagrace. Deflagrace i detonace ohrožují *bezpečnost života* svými tlakovými a tepelnými účinky. Představují také nebezpečí *pro konstrukční bezpečnost*, což v nejhorším případě může způsobit i zhroucení konstrukce uzavřeného prostoru. A konečně, obě dříve zmíněné události opožděného zapálení mohou souviset s tryskovými požáry, včetně *dopadu ohně* na stěny nebo strop uzavřeného prostoru. Jakmile vznikne tryskový požár, může hořet buď v dobře ventilovaném, nebo v nedostatečně ventilovaném režimu a následné jevy a bezpečnostní důsledky by se řídily schématem naznačeným v horní větvi diagramu (obr. 1), která odpovídá okamžitému zapálení, jak je znázorněno šipkou (→) v kruhových piktogramech.

## 4. Permeační netěsnosti

U pronikání vodíku stěnami skladovacích zásobníků se nepředpokládá, že by pro zasahující osoby bylo problematické. Pro úplnost jsou však tyto jevy popsány v přednáškách 3 – Skladování vodíku, 4 – Slučitelnost vodíku s různými materiály a 6 – Úniky nezapáleného vodíku ve venkovním prostředí a jejich zmírňování.

## 5. Úniky a rozptyl vodíku uvnitř budov

Aplikace vodíkové energie často vyžadují, aby se systémy používaly v interiéru, např. průmyslové vozíky pro manipulaci s materiálem ve skladu, palivové články umístěné v místnosti nebo vodík skladovaný a rozváděný z plynové skříně. Může být také nutné nebo



žádoucí umístit některé součásti/zařízení vodíkového systému do vnitřních nebo venkovních krytů, a to z bezpečnostních důvodů, tj. aby byly izolovány od koncového uživatele a veřejnosti.

Používání vodíku v uzavřeném prostředí vyžaduje podrobné posouzení nebezpečí a souvisejících rizik, včetně možných prvků prevence a zmírňování rizik. Uvolňování vodíku může potenciálně vést k jeho hromadění a ke vzniku hořlavé směsi vodíku se vzduchem, která může být příčinou vzniku tryskového požáru.

V rámci projektu HyIndoor (<https://hydrogeneurope.eu/project/hyindoor>) byly odstraněny mezery ve znalostech v následujících čtyřech hlavních oblastech.

- uvolňování vodíku uvnitř uzavřeného nebo částečně uzavřeného prostoru,
- deflagrace vodíku a vzduchu ve vnitřních prostorech,
- tryskový požár a nedostatečně ventilovaný požár,
- detekce vodíku v uzavřených prostorech.

Získané poznatky byly převedeny do nejmodernějších bezpečnostních pokynů i včetně konkrétních technických nástrojů podporujících jejich zavádění. Byla formulována doporučení týkající se vývoje potřebného v předpisech a normách na evropské a mezinárodní úrovni na podporu bezpečného zavádění palivových článků a vodíku na prvních trzích.

Pro každý bezpečnostní systém, včetně použití vodíkových systémů v interiéru, existují tři obecné bezpečnostní cíle: ochrana života, ochrana majetku a ochrana životního prostředí. Primární pozornost by měla být věnována ochraně života, např. pracovníků na staveništi, zákazníků a široké veřejnosti. Cíle ochrany života zahrnují mimo jiné [3]:

- obyvatelé jsou schopni opustit budovu/objekt v přiměřené době, případně následky jsou pro obyvatele přijatelně nízké,
- členové prvotních zásahových jednotek mohou pracovat v přiměřeném bezpečí,
- zřícení nebo trosky neohrožují okolostojící osoby, členy prvotních zásahových jednotek a další osoby, které se mohou nacházet v blízkosti zařízení.

Mezi obecná bezpečnostní pravidla, strategie a doporučení pro konstrukci a využívání vodíkové infrastruktury se řadí:

- zvážení, zda je skutečně nezbytné umístit vodíkovou soustavu do místnosti / uzavřeného prostoru, nebo zda by mohla být přemístěna ven, kde by náhodný únik vedl s menší pravděpodobností k nahromadění vodíku v hořlavých koncentracích díky lepší ventilaci,
- snížení průměru přívodního vodíkového potrubí a provozního tlaku na minimum nezbytné pro splnění technologických požadavků na hmotnostní průtok; není-li možné nebo žádoucí zmenšit průměr potrubí, použijí se omezovače průtoku,
- minimalizace provozního tlaku vodíku, kdykoli je to možné,

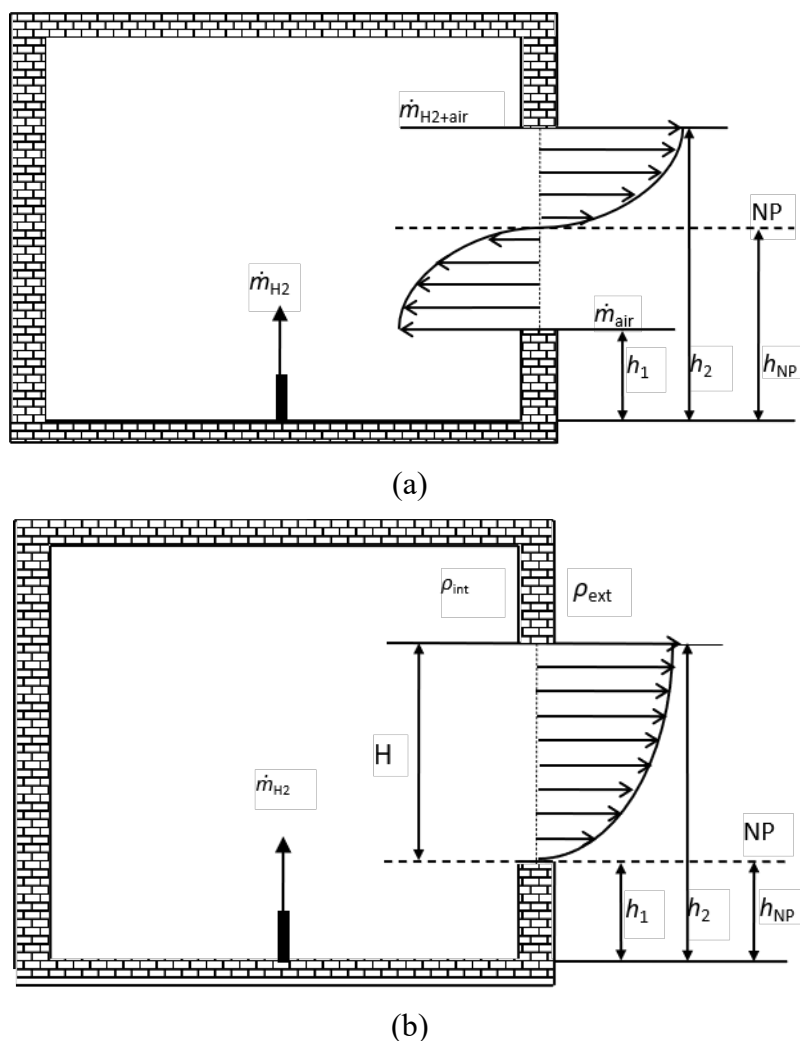
- měření vodíkové infrastruktury zajišťující rozpad proudu před dopadem na překážky v blízkosti s cílem předcházet vzniku vrstev s hořlavou koncentrací vodíku,
- identifikace a pokud možno snížení počtu a oddělení potenciálních zápalných zdrojů,
- využití skladovacích zásobníků s vysokou požární odolností, aby byl zajištěn dostatečný čas alespoň pro evakuaci osob,
- minimalizace zásob vodíku, aby se zabránilo vzniku hořlavé směsi v uzavřeném prostoru i po úplném úniku a rozptýlení vodíku, nebo jeho omezení pod množství, které by v případě deflagrace způsobilo poškození konstrukce nízkopevnostních zařízení a budov,
- posouzení deterministických separačních vzdáleností před kvantitativním hodnocením rizik (QRA); deterministické separační vzdálenosti lze vypočítat pro nezapálené úniky a pro dobře ventilované tryskové požáry pomocí zveřejněných a ověřených nomogramů,
- zvážení přednostního použití postranních odlehčovacích (ventilačních) otvorů namísto střešních ventilačních otvorů s cílem zkvalitnit pasivní ventilaci v porovnání s horizontálními ventilačními otvory se shodnou plochou,
- zvážení přednostního použití několika ventilačních otvorů oproti jedinému ventilačnímu otvoru se shodnou plochou; mezi ventilačními otvory by měly být co největší výškové rozdíly a otvory by měly být rozmístěny na všech stranách budovy s cílem zkvalitnit ventilaci s pomocí větru bez ohledu na jeho směr,
- pokud možno vyloučení ventilačních trubek a kanálů.

Pokyny a strategie pro zmírnění dopadů použití vodíku ve vnitřních prostorách lze nalézt ve výstupní zprávě projektu HyIndoor (<https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-02429488>)

## 6. Přirozená a nucená ventilace

Ventilace může být *přirozená/pasivní* nebo *nucená/mechanická/aktivní*. Přirozená ventilace představuje vhodnější volbu, protože je levná a spolehlivá, není závislá na zdroji energie a je vždy v provozu. Přirozená ventilace je zajištěna pevnými ventilačními otvory. Rozmístění těchto otvorů je důležité a mělo by zajistit maximální proudění vzduchu a rozptýlení hořlavého plynu. U vodíku se doporučuje kombinace horních a dolních ventilačních otvorů. Je-li to možno, přirozená ventilace by měla zajistit odvod veškerého plynu a přísun čerstvého vzduchu.

Neutrální rovina (NP) je vodorovná rovina, ve které je tlak uvnitř uzavřeného prostoru shodný s tlakem vně uzavřeného prostoru. Pod NP vstupuje do uzavřeného prostoru vzduch a nad NP uniká z uzavřeného prostoru lehčí směs vodíku se vzduchem. U přirozené ventilace se NP nachází v polovině výšky ventilačního otvoru (obrázek 2a). V případě pasivní ventilace uzavřeného prostoru s únikem plynu lehčího než vzduch se NP nachází v poloviční výšce ventilačního otvoru nebo pod ní za ustálených podmínek, jak je znázorněno na obrázku 2b.



Obrázek 2. Rychlost proudění ventilačním otvorem u přirozené (a) a pasivní (b) ventilace.

Rovnice přirozené ventilace vzduchu jsou odvozeny za předpokladu rovnosti proudění dovnitř a ven z uzavřeného prostoru. V případě pasivní ventilace se může NP pro plyny lehčí než vzduch nacházet kdekoli pod polovinou výšky ventilačního otvoru.

Maximální úroveň koncentrace vodíku ve uzavřeném prostoru s jedním ventilačním otvorem za předpokladu trvalého úniku lze vyhodnotit pomocí následující rovnice [10]:

$$X = f(X) \cdot \left[ \frac{Q_0}{C_D A (g' H)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (1)$$

kde  $X$  je objemový zlomek vodíku,  $Q_0$  je rychlost úniku ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $C_D$  je koeficient vypouštění,  $A$  je plocha ventilačního otvoru ( $\text{m}^2$ ),  $H$  je výška ventilačního otvoru (m),  $g$  je redukovaná gravitace ( $\text{m}/\text{s}^2$ ),  $g' = g(\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{H}_2})/\rho_{\text{air}}$ ,  $\rho_{\text{air}}$  a  $\rho_{\text{H}_2}$  jsou hustota vzduchu a vodíku v tomto pořadí, ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) a  $f(X)$  je funkce rovna:

$$f(X) = \left(\frac{9}{8}\right)^{1/3} \cdot \left\{ \left[ 1 - X \left( 1 - \frac{\rho_{H_2}}{\rho_{air}} \right) \right]^{1/3} + (1 - X)^{2/3} \right\} \quad (2)$$

Odvozená rovnice (1) předpokládá tyto podmínky:

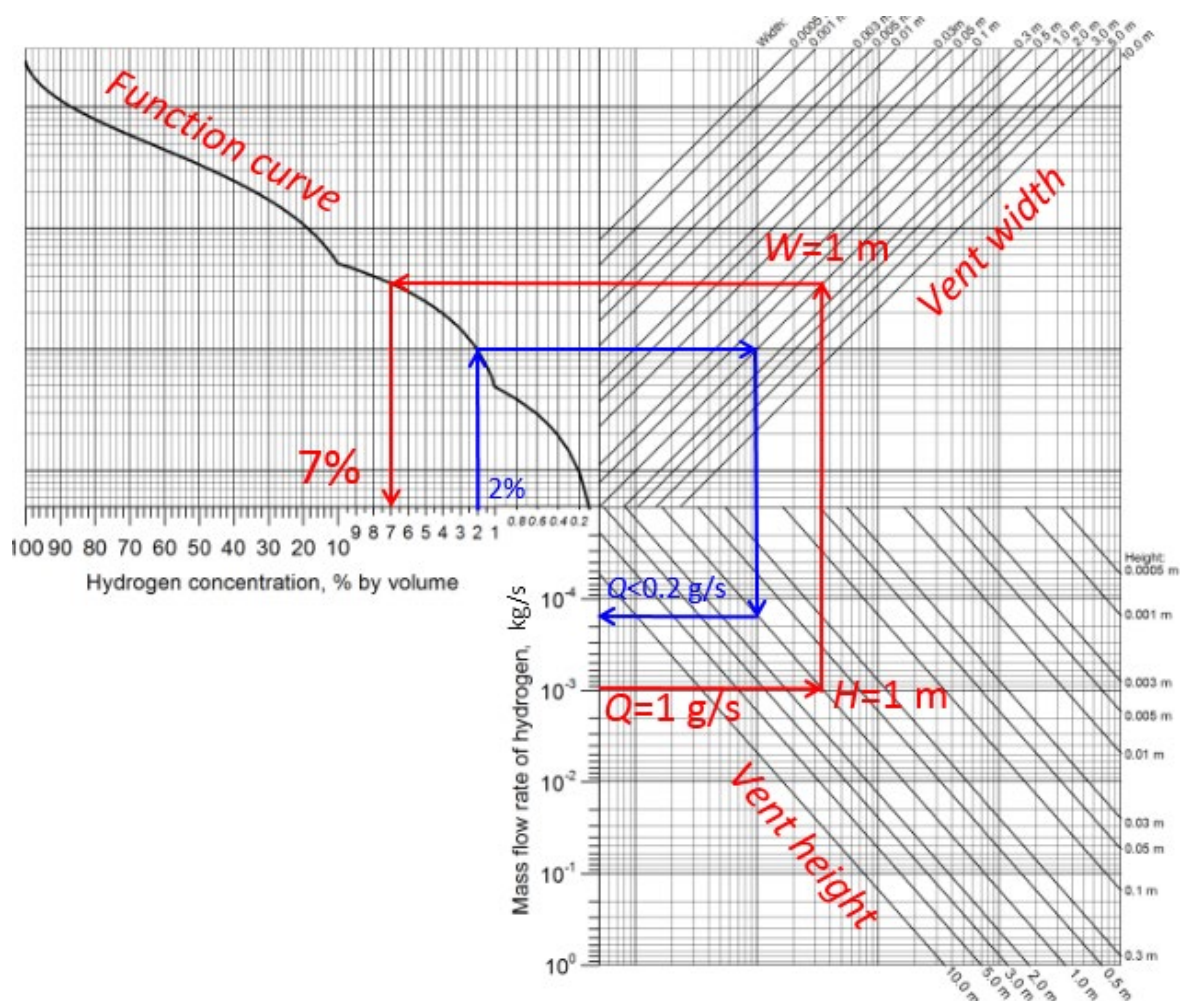
- průtok při úniku zůstává konstantní,
- směs plynů je v celém prostoru rovnoměrná, tj. koncentrace vodíku není závislá na umístění uvnitř uzavřeného prostoru.

Srovnání s experimenty však ukázalo, že rovnici (1) lze použít k předpovědi maximální koncentrace vodíku v případě, že vodík tvoří vrstvy [10], tj. lze ji považovat za konzervativní. Na základě rovnic (1) a (2) byl vypracován technologický nomogram pro výpočet rozměrů (výšky a šířky) ventilačního otvoru v případě homogenní směsi v uzavřeném prostoru s jedním ventilačním otvorem [10] (obrázek 3). Pamatujte, že ačkoli v praxi může směs vodíku a vzduchu tvořit vrstvy i v prostoru s jedním ventilačním otvorem, rovnice a nomogram na obrázku 3 poskytnou výsledky blízké maximálním hodnotám koncentrace, tj. jsou konzervativní a lze je použít i u nehomogenních směsí. Nomogram lze použít k výpočtu maximální koncentrace vodíku v ustáleném stavu na základě známé výšky a šířky ventilačního otvoru a rychlosti úniku. Nomogram platí pro homogenní i nehomogenní směsi v uzavřeném prostoru s jedním ventilačním otvorem. Postup výpočtu koncentrace vodíku (červené šipky) je následující:

1. Zvolte hmotnostní průtok unikajícího vodíku na svislé ose spodního panelu nomogramu a vynesete jej vodorovně až do průsečíku s jednou z diagonálních čar odpovídajících různým výškám ventilace. V nomogramu na obrázku 3 je 15 takových čar, které pokrývají prakticky všechny možné výšky ventilačních otvorů od 0,5 mm do 10 m.
2. Z průsečíku vynesete svislou čáru směrem vzhůru tak daleko, dokud neprotne jednu z diagonálních čar v pravém horním panelu nomogramu, které odpovídají různým šířkám ventilačních otvorů. V nomogramu na obrázku 3 je 15 takových čar, které pokrývají šířku ventilačních otvorů v rozmezí od 0,5 mm do 10 m.
3. Z průsečíku vynesete vodorovnou čáru doleva až do průsečíku s křivkou funkce v levém horním panelu nomogramu.
4. Nakreslete svislou čáru od průsečíku k vodorovné ose levého horního panelu. Hodnota na vodorovné ose odpovídá koncentraci vodíku v objemových procentech.

Nomogram na obrázku 3 lze použít i pro opačné vyhodnocení, tj. pro výpočet velikosti ventilačního otvoru potřebného k zajištění toho, aby při dané rychlosti úniku vodíku koncentrace nepřekročila stanovenou hodnotu (modré šipky na obrázku 3). V tomto případě se postup výpočtu provádí v opačném pořadí, přičemž se začíná od žádané hodnoty koncentrace (viz příklad se směsí 2 % obj. na obrázku 3). Je-li třeba vyhodnotit rozměry ventilačního

otvoru, který bude poskytovat objemové procento vodíku pod určitou úrovní, např. pod 2 % obj. (modré šipky), začneme s požadovanou hodnotou objemového procenta na vodorovné ose levého horního panelu a nakreslíme svislou čáru až do průsečíku s funkční křivkou v tomto panelu. Z tohoto průsečíku lze vynést vodorovnou čáru doprava k pravému hornímu panelu, která prochází napříč křivkami šířky ventilačních otvorů. Poté je třeba v levém dolním panelu nomogramu zvolit hmotnostní průtok uvolňované látky (např. 0,2 g/s) a nakreslit vodorovnou čáru doprava přes pravý dolní panel, která prochází křivkami výšky ventilačních otvorů. Nyní je možné určit rozměry ventilačního otvoru pro uzavřený prostor tak, aby koncentrace vodíku nepřesáhla 2 % obj. při dané rychlosti úniku vodíku. Na příkladu uvedeném na obrázku 3 by pro udržení koncentrace vodíku pod 2 % obj. při dané rychlosti úniku 0,2 g/s měl být uzavřený prostor vybaven ventilačním otvorem o výšce 1 m a šířce 1 m.



Obrázek 3. Technologický nomogram pro výpočet maximální hodnoty ustálené koncentrace vodíku uzavřeném prostoru s jedním ventilačním otvorem (koeficient vypouštění  $C=0,6$ ).

## 7. Jev tlakové špičky

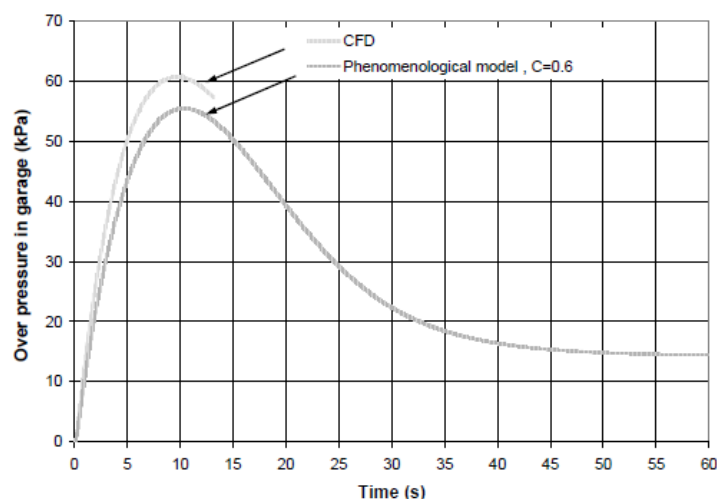
Tlaková špička je jev pozorovaný u plynů, které jsou velmi lehké (lehčí než vzduch), což může v případě dostatečně vysoké rychlosti uvolňování vodíku vést k přetlaku překračujícímu mez

pevnosti konstrukce pláště nebo budovy. Tlaková špička nastane, je-li průtok unikajícího vodíku dostatečně vysoký, aby došlo k úplnému vytlačení vzduchu z prostoru, tj. koncentrace vodíku v prostoru musí dosáhnout 100 % obj.

Je známo, že ve vozidlech s palivovými články se vodík běžně skladuje v podobě stlačeného plynu v nádržích, které jsou vybaveny tepelně aktivovanými zařízeními pro uvolnění přetlaku (TPRD) dle nařízení Komise EU č. 406/2010 [17]. Zařízení PRD je umístěno na palivové nádrži a začne uvolňovat vodík při dosažení teploty přibližně 110 °C, např. při požáru. Zařízení TPRD může zajistit rychlé uvolnění vodíku, pokud se použije velký průměr otvoru, čímž se minimalizuje možnost výbuchu nádrže při nadměrně dlouhém působení ohně. Vysoké hmotnostní průtoky ze zařízení TPRD jsou pravděpodobně „přijatelné“ pro venkovní prostředí. Nebezpečí plynoucí z rychlého uvolnění v interiéru se však liší.

Uvažujme hypotetický scénář, který zahrnuje únik z typické palubní nádrže na vodík při tlaku 35 MPa přes otvor s ústím o průměru 5,08 mm [18]. Předpokládá se, že k uvolnění dojde svisle vzhůru uprostřed, 0,5 m nad podlahou malé garáže s rozměry  $D \times \check{S} \times V = 4,5 \times 2,6 \times 2,6$  m [19] a objemem 30,4 m<sup>3</sup> s jediným ventilačním otvorem o ploše odpovídající typické cihle  $D \times V = 25 \times 5$  cm umístěným ve stropě a zarovnaným se stropem. Je zvolen konzervativní přístup, tj. po otevření zařízení TPRD se použije konstantní hmotnostní průtok 0,39 kg/s (bez ohledu na pokles tlaku v zásobníku). Uvažuje se tedy nejhorší možný scénář, tj. vysoký hmotnostní průtok v malé garáži s minimální ventilací.

Při použití matematických modelů pro stabilní podzvukový únik (kdy vodík zcela zaplní prostor) se předpokládané hodnoty přetlaku v prostoru pohybují v rozmezí 15 (vyplyvá z Bernoulliho rovnice při nulové rychlosti v nádobě) a 17,9 kPa (z rovnice průtoku ústím při podzvukovém proudění) pro součinitel vypouštění  $C$ , který se v obou případech bere jako běžně doporučený  $C=0,6$  [20]. Tyto odhady však nezohledňují počáteční stav vstříkování lehčího plynu (vodíku) do těžšího plynu (vzduchu). Předpokládané přechodné tlakové zatížení ve ventilovaném uzavřeném prostoru je uvedeno na obrázku 4.



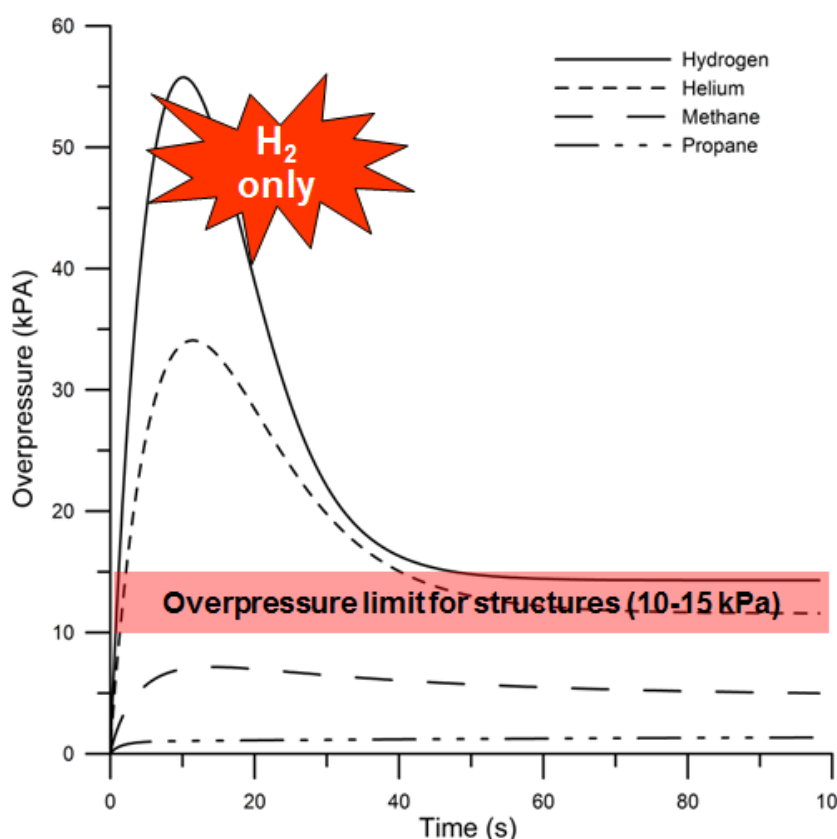


Obrázek 4. Předpokládaný přetlak v garáži v závislosti na čase, srovnání CFD a fenomenologického modelu [18].

Na obrázku 4 je znázorněno, jak přetlak v uzavřeném prostoru vzniklý vstříknutím vodíku dosáhne v uvedeném scénáři úrovně schopné zdemolovat garáž [9] během pouhých 3 s. Jak vyplývá z obrázku 4, pokud není garáž nejprve zničena, dosáhne tlak v garáži v tomto konkrétním scénáři maximální úrovně přesahující 60 kPa. Tlak poté klesá a směřuje k ustálené hodnotě, která je podstatně nižší a rovná se hodnotě předpovězené jednoduchým odhadem ustáleného stavu. Ještě jednou upozorníme, že se jedná o nejhorší možný scénář s konstantním hmotnostním průtokem. Proto je pokračování konstantního hmotnostního průtoku po dobu 60 s, které je uvedeno na obrázku 4, pouze ilustrativní, aby se ukázal časový rámec před dosažením ustálených podmínek, kdy je prakticky celá garáž vyplněna 100 % obj. vodíku. Je třeba také poznamenat, že maximálního tlaku je dosaženo za méně než 10 s: za tuto dobu by byla celá garáž zdemolována, aniž bychom uvažovali o následcích zapálení.

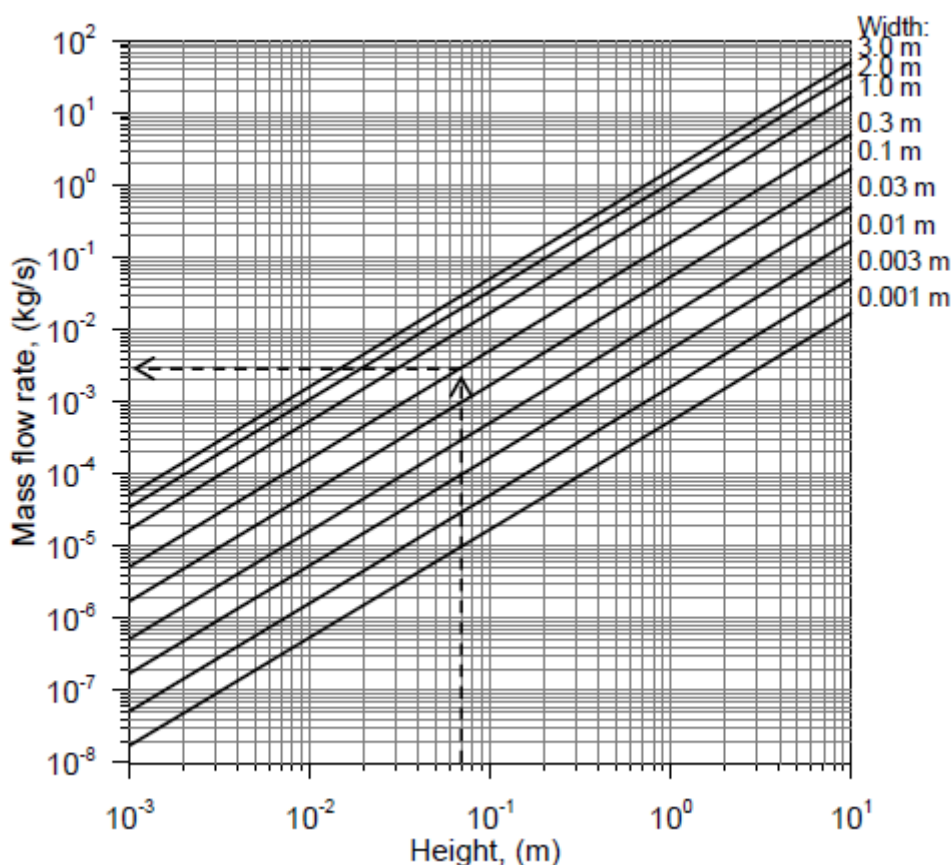
Je třeba poznamenat, že úroveň přetlaku dosažená uvnitř garáže se zvyšuje s poklesem molekulové hmotnosti plynu vstříkovaného do garáže, tj. lehčí plyn, jako je vodík, má za následek výrazně vyšší tlak než těžší plyn, např. propan. Tuto skutečnost je třeba zohlednit při konstrukci zařízení TPRD pro použití s vodíkem, tj. nemělo by se předpokládat, že stejná technologie používaná např. pro CNG se bude u vodíku chovat shodně.

Obrázek 5 ukazuje předpovězené hodnoty přetlaku v závislosti na čase pro řadu plynů se stejným hmotnostním průtokem (0,39 kg/s) ve stejném prostoru podobném garáži (objem 30,4 m<sup>3</sup>, ventilační otvor 0,0125 m<sup>2</sup>). Koeficient vypouštění  $C=0,6$ . Molekulové hmotnosti vodíku, hélia, metanu a propanu jsou 0,002, 0,004, 0,016 a 0,044 kg/mol. Je zřejmé, že přetlaková špička klesá s rostoucí molekulovou hmotností plynu. Čím vyšší je molekulová hmotnost plynu, tím více se maximální tlak blíží hodnotám v ustáleném stavu předpovězeným jednoduchými metodami. Objemový průtok z uzavřeného prostoru je nepřímo úměrný druhé odmocnině z hustoty plynu, který z uzavřeného prostoru uniká. Na začátku procesu, kdy je hustota směsi vodíku se vzduchem velmi vysoká a blíží se hustotě vzduchu, je tedy konstantní objemový přítok čistého vodíku podstatně vyšší než objemový odtok těžší směsi vodíku se vzduchem, což vysvětluje, proč přetlak lehčího vstupujícího plynu roste na vyšší úroveň ve srovnání s těžším vstupujícím plynem a dynamika tlaku má charakteristickou špičku pouze v případě vodíku.



Obrázek 5. Předpokládané hodnoty přetlaku u vodíku, helia, metanu a propanu uvolněných do garáže v závislosti na čase; rychlost uvolňování 0,39 kg/s [18].

K tlakové špičce dochází pouze tehdy, když je rychlost uvolňování vodíku dostatečně vysoká na to, aby s pokračující dobou trvalého úniku zcela vytlačila vzduch z uzavřeného prostoru. Proto je před odhadem přetlaku vzniklého při jevu PPP nutné potvrdit, zda je rychlost uvolňování dostatečná k tomu, aby se uzavřený prostor v případě trvalého úniku naplnil ze 100 % vodíkem. K ověření lze použít technologický nomogram na obrázku 6 [10]. Nomogram umožňuje vypočítat maximální rozměry ventilačního otvoru, které při daném ustáleném uvolňování nakonec povedou ke 100% koncentraci vodíku v uzavřeném prostoru. Chcete-li zjistit maximální rozměry ventilačního otvoru, vyberte na svislé ose rychlost uvolňování vodíku a nakreslete vodorovnou čáru až k jejímu průsečíku s jednou z úhlopříčných čar odpovídající příslušné šířce ventilačního otvoru. Nakreslete svislou čáru od průsečíku s vodorovnou osou a zjistíte požadovanou výšku ventilačního otvoru. Případně lze nomogram na obrázku 6 použít ke zjištění minimální rychlosti uvolňování pro známou kapacitu ventilace, pokud je třeba vypočítat jev PPP, a v takovém případě se výše uvedené kroky obrátí. Pokud je rychlost uvolňování zjištěná pomocí tohoto nomogramu nižší než skutečná rychlost nebo jsou skutečné rozměry ventilace menší než rozměry zjištěné pomocí nomogramu na obrázku 6, bude dosaženo 100 % obj. koncentrace vodíku. Proto může vzniknout jev tlakové špičky a měl by se použít příslušný nomogram (obrázek 7).



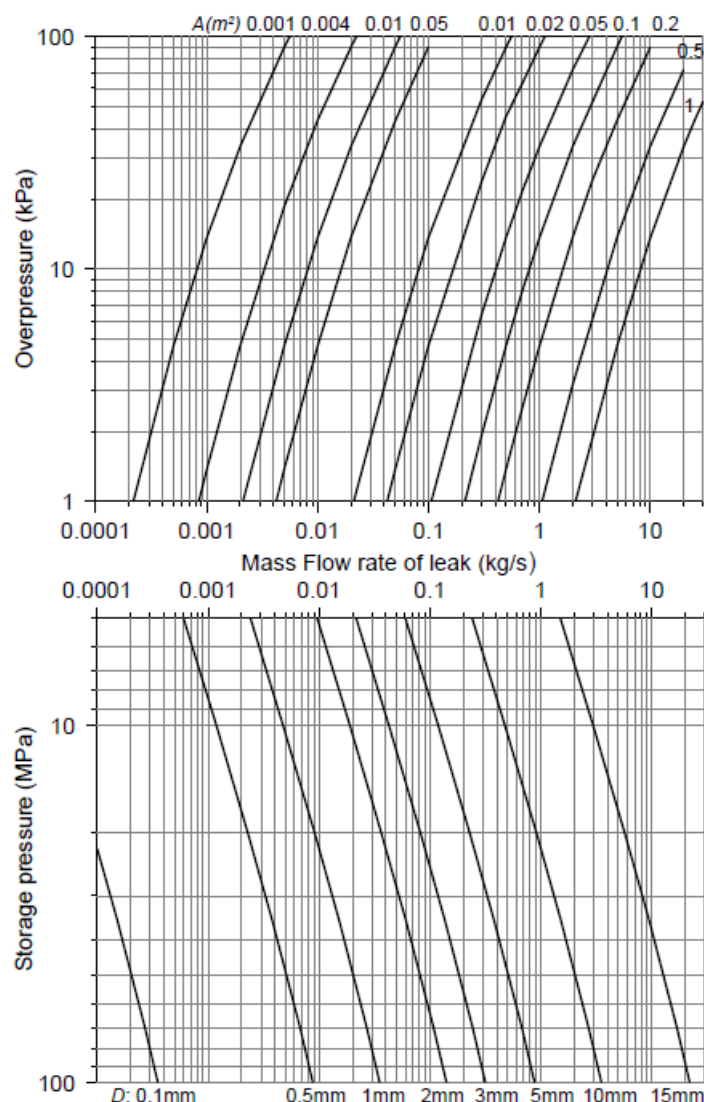
Obrázek 6. Nomogram pro grafické vyhodnocení hmotnostního průtoku unikajícího vodíku v uzavřeném prostoru s jedním ventilačním otvorem, který vede ke 100% obj. koncentrace vodíku [10].

Obrázek 7 obsahuje nomogram pro vyhodnocení jevu tlakové špičky. Nomogram umožňuje výpočet maximální přetlakové špičky vzniklé při velmi rychlém uvolňování vodíku za známého hmotnostního průtoku a průměru netěsnosti. Chcete-li použít nomogram na obrázku 7, postupujte dle tohoto popisu:

- Začněte na svislé ose na spodním panelu grafu a vyberte skladovací tlak, který odečítejte vodorovně až k průměru netěsnosti.
- Při výpočtu hmotnostního průtoku netěsnosti odečítejte svisle nahoru. Pokračujte svisle vzhůru od hmotnostního průtoku k průsečíku s čarou pro příslušnou oblast odvědušení v horním panelu.
- Čtěte vodorovně doleva až do průsečíku se svislou osou. V průsečíku se nachází hodnota maximálního přetlaku v uzavřeném prostoru.

Případně lze k určení plochy ventilačního otvoru potřebné k udržení přetlaku pod stanovenou mezí použít nomogram na obrázku 7. V tomto případě postupujte podle prvních dvou kroků a poté vynesete vodorovnou čáru od požadované hodnoty přetlaku, kterou najdete na svislé ose horního panelu grafu. Bod nejbližší k průsečíku s křivkou v horním panelu bude odpovídat

požadované ploše ventilace (pokud průřezík spadá mezi dvě křivky, použijte křivku více vpravo, abyste získali konzervativní hodnotu).



Obrázek 7. Nomogram tlakových špiček pro různé rychlosti uvolňování [4].

## 8. Parkoviště

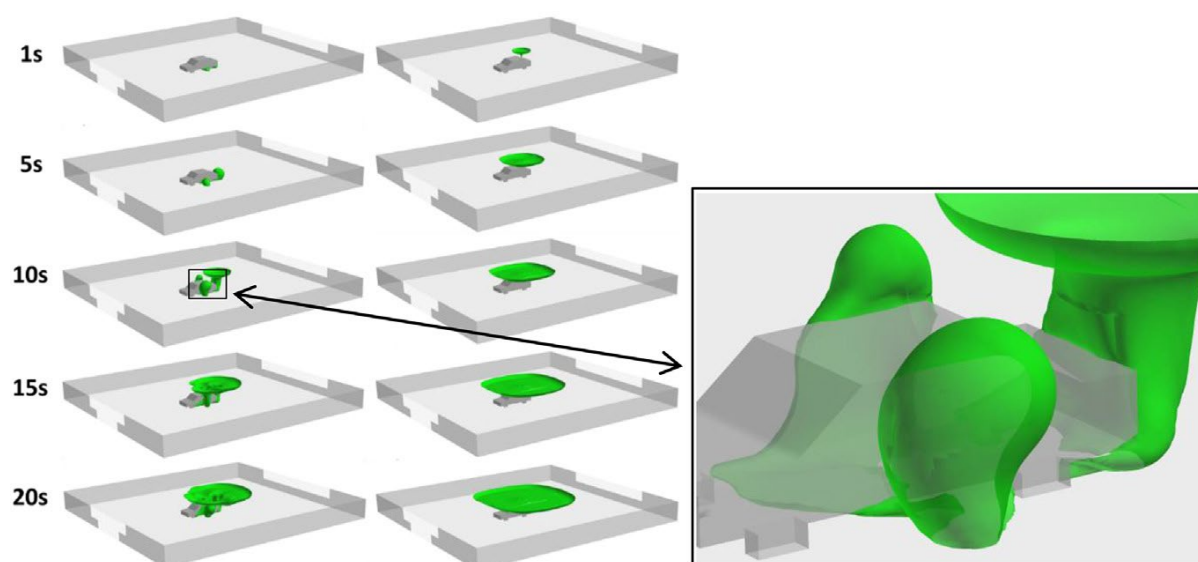
Budování podzemních, otevřených nebo krytých parkovišť je z důvodu rostoucího počtu vozidel na vodíkový pohon na celém světě nezbytné. Proto je stejně tak nezbytné zvážit praktické scénáře a problémy, které mohou nastat při každodenním používání těchto vozidel. Při pochopení nebezpečí, která vznikají v důsledku umístění vozidel na vodíkové palivo do uzavřeného prostoru, lze podniknout kroky ke snížení souvisejících nebezpečí a rizik prostřednictvím inherentně bezpečnější konstrukce. Ve většině osobních automobilů je vodík běžně skladován v nádržích v podobě stlačeného plynu. Typické skladovací tlaky se pohybují v rozmezí 350 až 700 bar. Zásoba vodíku se liší v závislosti na velikosti vozidla a podle amerického ministerstva energetiky je k dosažení dojezdu delšího než 300 mil u celé platformy

lehkých užitkových automobilů využívajících pohonné systémy s palivovými články zapotřebí palubní zásoba vodíku v rozsahu přibližně 5–13 kg [26].

Palubní nádrže na vodík jsou obvykle vybaveny přetlakovými zařízeními (TPRD), která zajišťují rychlé uvolnění vodíku, aby se minimalizovala možnost katastrofického selhání zásobníku při vystavení působení požáru. V případě náhodného úniku vodíku jsou pravděpodobně přijatelné vysoké hmotnostní průtoky z TPRD ve venkovním prostředí, kde je vztlak vodíku výhodou, protože napomáhá rozptylu pod hranici LFL. Rychlé uvolnění v interiéru by však mohlo vést k hromadění vodíku a vzniku hořlavé směsi vodíku se vzduchem. Z bezpečnostního hlediska vzniká při vysoké rychlosti uvolňování řada nebezpečí. Byly objeveny a vysvětleny jevy tlakové špičky v případě typického zařízení TPRD (průměr 5,08 mm) s malým ventilačním otvorem [27]. Bylo zjištěno, že při konstantní rychlosti uvolňování vodíku 0,39 kg/s do garáže s objemem 30,4 m<sup>3</sup> s jediným ventilačním otvorem o velikosti jedné cihly může přetlak rychle, tj. během pouhých 2 sekund, dosáhnout úrovně 10–20 kPa. Takový přetlak může způsobit velké škody a případné zhroucení konstrukce v závislosti na její povaze a době trvání impulsu. V případě uvolnění vodíku tak vysoký objemový průtok vede k výrazným přetlakům i bez spalování. Bylo prokázáno, že tlak v garáži dosahuje maximální úrovně přesahující 50 kPa při skladovacím tlaku 350 bar a 100 kPa při skladovacím tlaku 700 bar. Tento maximální tlak poté klesá a směřuje k hodnotě ustáleného stavu, která je řádově nižší a rovná se hodnotě předpovězené jednoduchým odhadem ustáleného stavu [27].

Z výše uvedené analýzy vyplývá, že „typický“ průměr zařízení TPRD 5,08 mm nemusí být „bezpečný“ pro uzavřené prostory, např. vnitřní parkoviště s omezenou ventilací. Proto byla v garážích a prostorech jim podobných studována dynamika tlaku, aby bylo možné vybrat optimální průměr zařízení TPRD na základě teorie nedostatečně roztržštěných proudů a modelu poklesu tlaku vyvinuté na univerzitě v Ulsteru [28]. Byla provedena studie, která zkoumala vztah mezi průměrem zařízení TPRD, výměnou vzduchu za hodinu (ACH) a objemem úniku v uzavřených prostorech s jediným ventilačním otvorem z palubních nádrží na 1, 5 a 13 kg vodíku při tlaku 350 a 700 bar. Jako „bezpečný“ byl stanoven takový průměr zařízení TPRD, který by v případě úniku nezpůsobil v garáži přetlak vyšší než 20 kPa. Při technologických pracích na systémech pro použití v interiérech je třeba počítat s dynamickým růstem tlaku, který je pro únik vodíku ve ventilovaném uzavřeném prostoru typický. Studie dynamiky tlaku pro 5 kg vodíku uloženého v nádrži pod tlakem 350 bar v garáži s objemem 30 m<sup>3</sup> s výměnou vzduchu 0,18 ukázala, že zmenšení průměru zařízení TPRD z 5 na 0,55 mm by dokázalo účinně předejít vzniku jevu tlakové špičky v garáži. Ze studie vyplynulo, že současné uspořádání zařízení TPRD na palubních nádržích bez požární odolnosti vytváří nepřijatelný výkon v uzavřených prostorách, pokud jsou zařízení TPRD aktivována i při úniku bez zapálení. Zjednodušená „nová konstrukce“ zařízení TPRD pro ochranu garáže před zborcením tak klade těžko realizovatelné požadavky na požární odolnost v řádu až několika hodin. Je zapotřebí dalšího výzkumu s cílem vyvinout bezpečnostní strategie a technická řešení problematiky požární odolnosti palubních nádrží a požadavků na výkon zařízení TPRD.

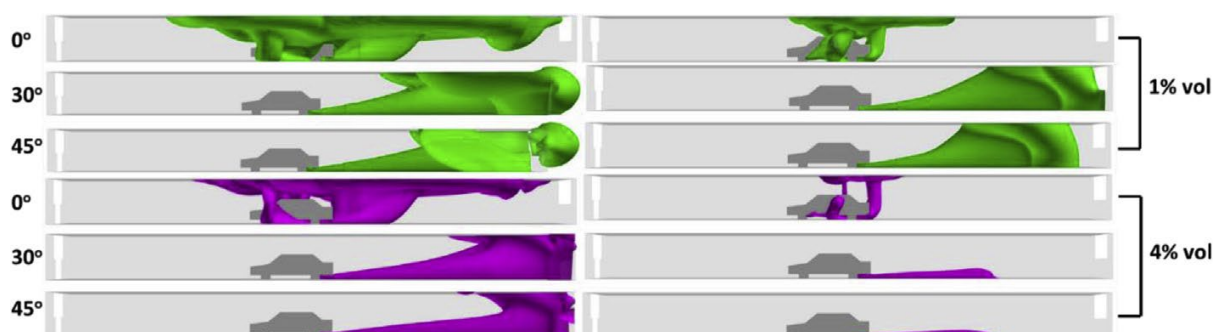
Před nedávnem provedla univerzita v Ulsteru studii úniku nezapáleného vodíku z palubní nádrže na krytém parkovišti s přirozenou ventilací [29]. Tato nová studie předkládá zjištění, která jsou důležitá pro výrobce vozidel, normalizační organizace (SDO) a rozvoj intravilánu. Vyvinutý numerický model byl ověřen na základě experimentálních dat z institutu KIT (Německo) pro nárazový proud helia a bylo dosaženo dobré shody mezi numerickými modely a experimenty, která se držela v rámci přijatelné technologické chyby. Simulace byly provedeny pro parkoviště s rozměry  $30 \times 28,6 \times 2,6 \text{ m}^3$  dle britské normy BS 7346-7:2013. Bylo zvažováno jedenáct případů úniku z nádrže pod tlakem 700 bar, včetně čtyř úniků směrem nahoru z potrubí ve výšce 0,5 m nad podlahou a jednoho úniku směrem nahoru a šesti úniků směrem dolů. Podle očekávání vedly úniky při konstantním hmotnostním průtoku k většímu množství hořlaviny na parkovišti ve srovnání s pozvolným snižováním tlaku přes stejný průměr zařízení TPRD. Menší průměr 0,5 mm vedl k podstatně menší koncentraci, než jaká vzniká při použití větších průměrů zařízení TPRD, např. 2 a 3,34 mm. Pro „typické“ průměry zařízení TPRD v uzavřených prostorech nepředstavuje při dostatečné ventilaci jev tlakové špičky důvod ke znepokojení.



Obrázek 8 Izopovrch zobrazující 1% molární podíl vodíku pro úniku z tlaku 700 bar přes zařízení TPRD s průměrem 0,5 mm pro uvolňování směrem dolů (vlevo) a směrem nahoru (vpravo) [29].

Jednou z novinek této práce bylo porovnání uvolňování vodíku směrem dolů a nahoru z nádrže pod tlakem 700 bar přes zařízení TPRD s průměrem 0,5 mm. Jak je znázorněno na obrázku 8, bylo zjištěno, že uvolnění směrem dolů mělo za následek vytvoření větší hořlavé obálky v blízkosti vozidla. Průměrná koncentrace vodíku v hořlavé směsi však byla nižší než v případě uvolnění směrem nahoru. Naproti tomu při uvolnění směrem nahoru vznikla rozsáhlá hořlavá obálka pod stropem, která však neobklopovala vozidlo. Uvolňování směrem dolů i nahoru z tlaku 700 bar přes průměr 0,5 mm v krytém parkovišti lze považovat za bezpečnější volbu, pokud je spojeno s vhodnou konstrukcí nádrže, která vytváří omezené množství hořlavého

oblaku, jenž se rychle rozptýlí. Zejména byly porovnávány tři různé úhly uvolňování směrem dolů ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$  a  $45^\circ$ ), aby bylo možné pochopit vliv orientace uvolňování vodíku. Jak je znázorněno na obrázku 9, při uvolnění přímo směrem dolů se okolo vozidla mohl vytvořit hořlavý vodíkový oblak, i když pouze krátkodobě. Pro členy zásahových jednotek však tato skutečnost může představovat problém při přístupu k cestujícím ve vozidle v případě zapálení. Uvolnění směrem dolů pod úhlem  $30^\circ$  a  $45^\circ$  směrem k zadní části vozidla vytlačilo hořlavý plyn z okolí vozidla, což zvýšilo bezpečnost evakuace posádky vozidla. Tyto faktory by měly být zohledněny při konstrukci zařízení TPRD pro palubní nádrže ve vozidlech s vodíkovým pohonem.



Obrázek 9 Grafy izopovrchu při 1 % a 4 % objemového podílu vodíku při průměru zařízení TPRD 2 mm (vlevo) v porovnání s průměrem 0,5 mm (vpravo) a různé směry uvolňování při době 20 s.

Další analýzy nebezpečí a souvisejících rizik relevantních pro použití vozidel s FCH v podzemní dopravní infrastruktuře lze nalézt v projektu HyTunnel-CS (<https://hytunnel.net/>), zejména v dokumentu Výstup D3.1 – Podrobný program výzkumu vodíkových požárů v uzavřených konstrukcích ([https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS\\_D3.1\\_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf](https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS_D3.1_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf)).

## 9. Tunely

Použití vozidla na FCH nebo přeprava stlačeného plynného vodíku ( $\text{CGH}_2$ ) a kryogenního kapalného vodíku ( $\text{LH}_2$ ) v tunelech a podobných stísněných prostorech představuje novou výzvu pro zajištění ochrany života, majetku a životního prostředí při přijatelné úrovni rizika. Několik studií prokázalo, že uzavření prostoru nebo jeho zneprůchodnění může mít závažnější následky než nehody v otevřeném prostředí. Kritická analýza nebezpečí a souvisejících rizik, která se týká používání vozidel FCH na podzemních dopravních komunikacích, byla provedena ve výstupu 1.2 z projektu HyTunnel-CS ([https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS\\_D1.2\\_Risks-and-Hazards.pdf](https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.2_Risks-and-Hazards.pdf)).

Příslušné základní poznatky o úniku vodíku, požáru a výbuchu byly uvedeny již dříve, např. ventilace (kapitola 5 této přednášky), jevy spojené s tlakovou špičkou (kapitola 6 této



přednášky), tryskové uvolňování vodíku (přednáška 9 – Separace od vodíkových plamenů a hašení požáru) a výbuch vodíku (přednáška 10 – Zvládání explozí vodíku). V případě tunelů existuje několik dalších jedinečných vlastností, o kterých je třeba pojednat samostatně.

### 9.1 Vliv rychlosti ventilace na rozptyl v tunelech

Pasivní ventilace je v tunelu zpravidla přítomna v důsledku pístového efektu, který vyvolávají jedoucí vozidla nebo meteorologické podmínky, např. rozdílem atmosférického tlaku u portálů na koncích tunelu. Zejména v dlouhých tunelech je také velmi pravděpodobné použití nucené ventilace, která odstraňuje škodliviny z emisí vozidel nebo kouř v případě požáru.

Větrání silně ovlivňuje rozptyl nebezpečných plynů. Důležité mohou být přesné umístění vozidel a geometrie tunelu, protože ovlivňují charakter proudění. Ventilace může mít na rozptyl vodíku pozitivní i negativní vliv.

Pozitivní vlivy jsou:

- může zředit koncentraci vodíku a minimalizovat velikost hořlavého oblaku,
- může bezpečně přepravit neomezené množství vodíku ven z tunelu skrze portály a šachty, pokud je koncentrace vodíku nižší než LFL.

Negativní vlivy jsou:

- hořlavý oblak může být rozšířen dále od místa úniku,
- ventilace může způsobit turbulence, které mohou urychlit hoření a tím i přetlak v případě zapálení úniku.

Při podélné ventilaci je k odstranění nebezpečného plynu a kouře zapotřebí minimální rychlost vzduchu. Vodík se chová podobně jako kouř z ohně, protože má velký vztlak. U požárů v tunelech byla studována kritická rychlost v závislosti na rychlosti uvolňování tepla a zdá se, že hodnota rychlosti ventilace 3,5 m/s je pro většinu požárů v tunelech dostatečná k tomu, aby se zabránilo efektu „zpětné vrstvy“, včetně velkých požárů s výkonem více než 100 MW ([https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS\\_D1.1-Effectiveness-of-conventional-safety-measures-.pdf](https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.1-Effectiveness-of-conventional-safety-measures-.pdf)).

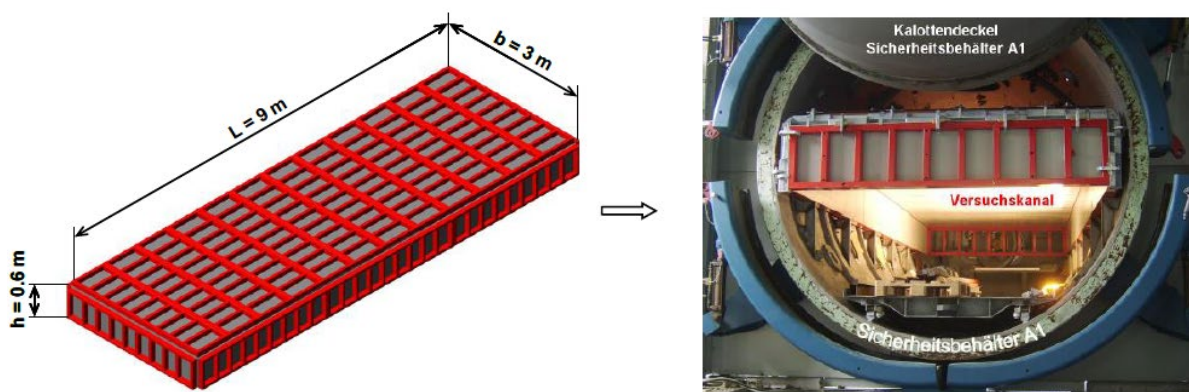
Ventilace v tunelu má obecně příznivý účinek na ředění vodíku a jeho bezpečné odstranění, takže koncentrace vodíku klesá pod 4 % obj. (LFL). Za určitých podmínek však může ventilace hořlavý oblak přemísťovat a dále rozšiřovat, což vede k jeho pohybu směrem k jiným vozidlům nebo podél ventilačních kanálů a šachet. Proto je třeba provést další experimentální studie, které by prozkoumaly optimální rychlost ventilace v takových situacích a vytvořily základ pro obecnější, univerzální doporučení týkající se účinnosti ventilace v tunelech. Kromě toho je třeba do budoucího výzkumu zahrnout vliv sklonu tunelu na proudění a rozptyl vodíku. Maximální sklon povolený evropskou směrnicí 2004/54/ES činí u nově budovaných podélných tunelů 5 %. Směrnice dále uvádí, že u sklonů nad 3 % jsou vyžadována dodatečná opatření ke zvýšení úrovně bezpečnosti.



## 9.2 Přejchod z deflagrace k detonaci (DDT) v tunelu

Přejchod DDT byl podrobně popsán v přednášce 10, kde byla kritéria DDT vypracována především pro uzavřené tvary s rovnoměrnou koncentrací vodíku v oxidantu (vzduch nebo kyslík). V důsledku úniku vodíku nebo náhodného vypuštění vodíku z vysokotlaké nádrže v tunelu však může dojít k vytvoření nehomogenní, např. stratifikované směsi vodíku se vzduchem, která se zpravidla vytvoří ve stropní části konstrukce tunelu.

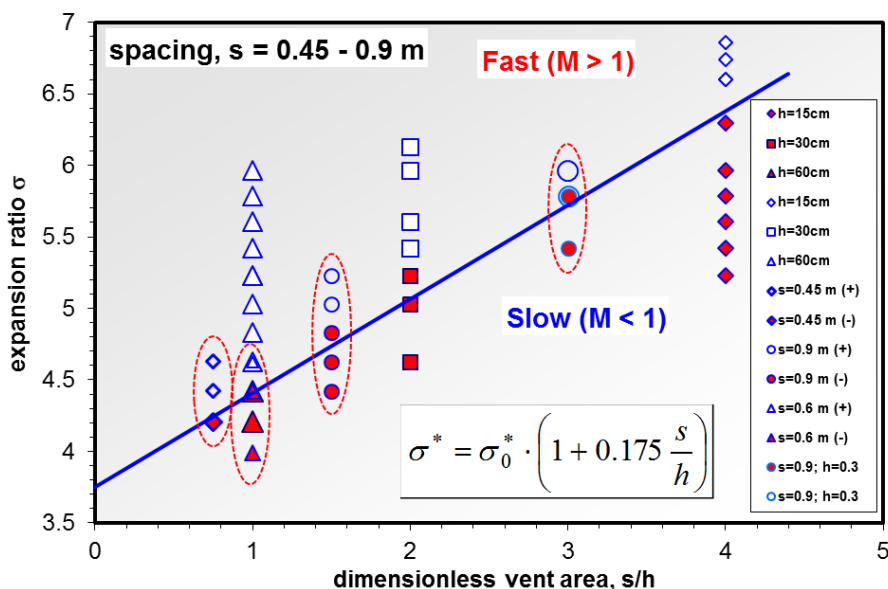
Bylo provedeno několik experimentů a numerických simulací s ohledem na hoření a detonaci stratifikované vrstvy směsi vodíku se vzduchem v polouzavřeném prostoru, která je typická v případě nehody v tunelu. Experimenty s hořením vodíku v tenké vrstvě v částečně uzavřeném prostoru byly prováděny uvnitř bezpečnostní nádoby s objemem 100 m<sup>3</sup> [22]. Válec má vnitřní průměr 3,5 m a délku 12 m. Tloušťka stěny 80 mm umožňuje provádět detonační experimenty přímo uvnitř válce. Uvnitř bezpečnostní nádoby byl instalován obdélníkový box s rozměry 9×3×0,6 m<sup>3</sup>, jak je znázorněno na obrázku 10. S ohledem na geometrii a rozměry je takové experimentální uspořádání velmi vhodné pro experimentální simulaci vodíkové nehody v prostředí tunelu.



Obrázek 10 Hlavní rozměry plochého boxu (vlevo) a tenkovrstvého boxu umístěných uvnitř bezpečnostní nádoby (vpravo) [22].

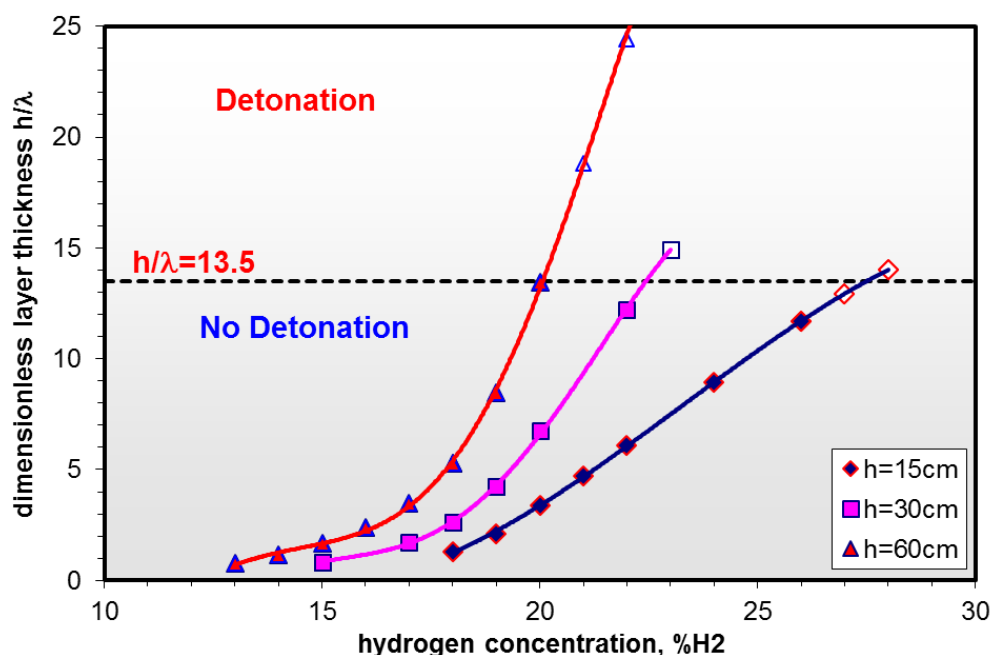
Experimentální údaje o charakteristickém tlaku a rychlosti plamene v případě homogenního složení ukázaly, že prahem mezi pomalým a rychlým režimem plamene v polootevřených kanálech je zvuková rychlost v reaktantu, zatímco v uzavřených kanálech je to zvuková rychlost produktů [23]. Při použití tenčí vrstvy (tloušťka  $h$ ) je třeba pro dosažení rychlosti zvuku zvýšit koncentraci vodíku nebo reaktivitu směsi. Expanzní poměr je kritickým ukazatelem potenciální akcelerace plamene [23, 24]. Na obrázku 11 jsou shrnuty experimentální údaje o expanzním poměru  $\sigma$  v závislosti na bezrozměrné ploše ventilačního otvoru (definované jako poměr tloušťky vrstvy  $h$  a vzdálenosti mezi překážkami pro vrstvu  $s$  v polouzavřeném prostoru). Byla odvozena lineární korelace mezi kritickým poměrem rozpínání  $\sigma^*$  pro rychlé šíření plamene v ploché vrstvě a vzájemnou tloušťkou vrstvy  $l/h$  nebo vzdáleností mezi překážkami  $s$ . U homogenních směsí dochází k detonaci při různých

koncentraci vodíku v závislosti na tloušťce vrstvy, např. 27 % při  $h=0,15$  m, 23 % při  $h=0,3$  m a 21 % při  $h=0,6$  m. Výsledky naznačují, že tenčí vrstva potřebuje k detonaci více reaktivní směsi než vrstva silnější. Jelikož energetické ztráty a reaktivita směsi jsou ve vzájemném vztahu s tloušťkou vrstvy  $h$  a šířkou detonační buňky  $\lambda$ , lze očekávat, že bezrozměrný poměr tloušťky vrstvy k šířce detonační buňky bude pro kritické detonační podmínky konstantní.



Obrázek 11 Kritické podmínky pro efektivní zrychlení plamene jako funkce expanzního poměru v závislosti na bezrozměrné ploše ventilačních otvorů: plamen se zvukovou rychlostí a detonace (otevřené body), podzvukový plamen (plné body) [22].

Obrázek 12 potvrzuje, že bezrozměrná tloušťka vrstvy pro kritické podmínky vzniku detonace je téměř shodná,  $h/\lambda=13-14$ , u všech tří zkoumaných tlouštěk vrstvy od 15 do 60 mm [22]. Tato hodnota dobře koresponduje s předchozími experimenty provedenými na menším zařízení  $h/\lambda=7-15$  [23].



Obrázek 12 Kritické podmínky pro přechod DDT ve vztahu mezi bezrozměrnou tloušťkou vrstvy a koncentrací vodíku: detonace (otevřené body); bez detonace (plné body) [22].

## 10. Režimy vodíkových požárů v interiérech

Téma vodíkových požárů bylo probráno již dříve v příslušné přednášce. V případě vodíkových požárů v interiérech, je-li požár dostatečně krátký a pokud nenarazí na stěnu nebo jiný povrch, lze pro předpověď délky plamene použít nomogram uvedený v předchozí přednášce. Práce popsaná v „Přednášce 10 – Zvládání explozí vodíku“ o účincích stěn a protipožárních konstrukcí se týká také tryskových požárů, které narážejí přímo na překážky uvnitř uzavřeného prostoru. K uvolňování vodíku do prostoru často dochází v blízkosti stěny nebo povrchu, případně podél nich, což může vést k prodloužení tryskového plamene nebo rozsahu nezapáleného proudu tím, že se sníží objem proudění vzduchu. Nebezpečné vzdálenosti se tak mohou prodloužit. Tato skutečnost je důležitá při zvažování umístění zařízení a zásobníků vodíku (zejména umístění zařízení TPRD na jakémkoli zásobníku) ve vztahu ke stěnám a k podlaze. Vlastnosti požáru závisí také na podmínkách úniku, geometrii uzavřeného prostoru a na ventilaci. Interiérové vodíkové požáry mohou být dobře ventilované a nedostatečně ventilované.

### 10.1 Dobře ventilované požáry

Pokud je uzavřený prostor vybaven ventilací, kyslík potřebný k udržení hoření vodíku se do prostoru dostává ventilačními otvory. Je-li prostor dostatečně ventilován, požár je řízen palivem a lze jej považovat za dobře ventilovaný [11].

Obecné pravidlo pro požár v interiéru s jedním horním ventilačním otvorem je následující: zvýšením rychlosti uvolňování vodíku se změní režim požáru:

- z dobře ventilovaného požáru (malé průtoky) na
- nedostatečně ventilovaný požár s vnějším plamenem (středně velké průtoky) na
- nedostatečně ventilovaný požár se samovolným uhašením (vyšší průtoky) a opět na
- nedostatečně ventilovaný požár s vnějším plamenem (velmi vysoké průtoky).

Pro pochopení základních fyzikálních jevů vodíkového požáru v interiéru byla provedena numerická studie s využitím soudobého modelu. Použitý model CFD byl popsán v dokumentech [12, 13]. Bylo provedeno sedm numerických experimentů s jedním ventilačním otvorem v plášti podobném palivovému článkům s rozměry  $D \times \check{S} \times V = 1 \times 1 \times 1$  m a s ventilačním otvorem umístěným centrálně v horní části jedné ze stěn (tabulka 1). Únik směřoval svisle vzhůru. Trubka pro únik vodíku byla dlouhá 10 cm a měla vnitřní průměr 5,08 mm, nacházela se uprostřed dna pláště, 10 cm nad podlahou. Tloušťka hliníkových stěn pláště činila 2 cm. Další podrobnosti o výpočtech jsou uvedeny v dokumentu [13].

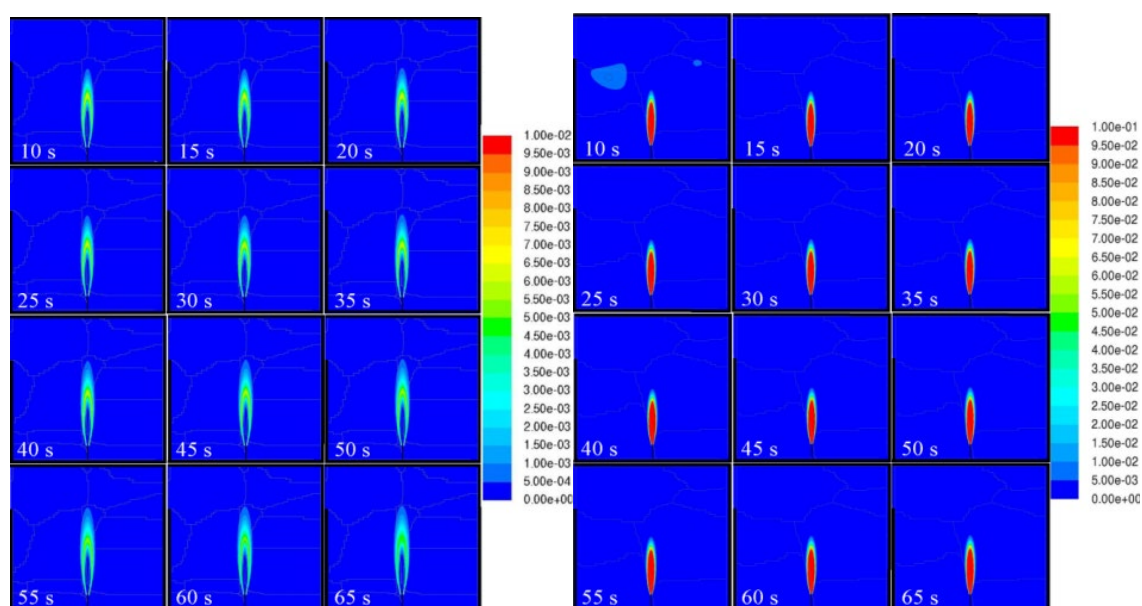
Tabulka 1. Podrobnosti o numerických experimentech [13].

Pol.	Velikost ventilačního otvoru, $V \times \check{S}$	Rychlost, m/s	Průtok, g/s	Výsledek
1	Horizontální 3×30 cm	600 m/s	1,0857	<b>Samovolné vyhasnutí</b>
2	Horizontální 3×30 cm	300 m/s	0,5486	<b>Samovolné vyhasnutí</b>
3	Horizontální 3×30 cm	150 m/s	0,2714	<b>Vnější plamen</b>
4	Vertikální 30×3 cm	600 m/s	1,0857	<b>Vnější plamen</b>
5	Vertikální 30×3 cm	60 m/s	0,1086	<b>Dobře ventilovaný</b>
6	Vertikální 13,9×3 cm	600 m/s	1,0857	<b>Samovolné vyhasnutí</b>
7	Vertikální 13,9×3 cm	300 m/s	0,5486	<b>Vnější plamen</b>

Obrázek 13 ukazuje dynamiku dobře ventilovaného vodíkového tryskového požáru numerickém experimentu č. 5 s nejnižší rychlostí úniku 60 m/s. Svislý ventilační otvor je umístěn na levé stěně. Na konci numerického experimentu se požár nacházel v kvaziustáleném stavu. Reakční zóna, která souvisí s přítomností hydroxylových radikálů OH, se mírně zvětšuje v časovém úseku od 10 s do 65 s (obrázek 13a). Z pláště nevychází prakticky žádný vodík (obrázek 13b). Molární podíl vodíku ve ventilačním otvoru je zanedbatelný, řádově  $2 \times 10^{-4}$ . To naznačuje, že v podmínkách simulace č. 5 je požár dobře ventilovaný.

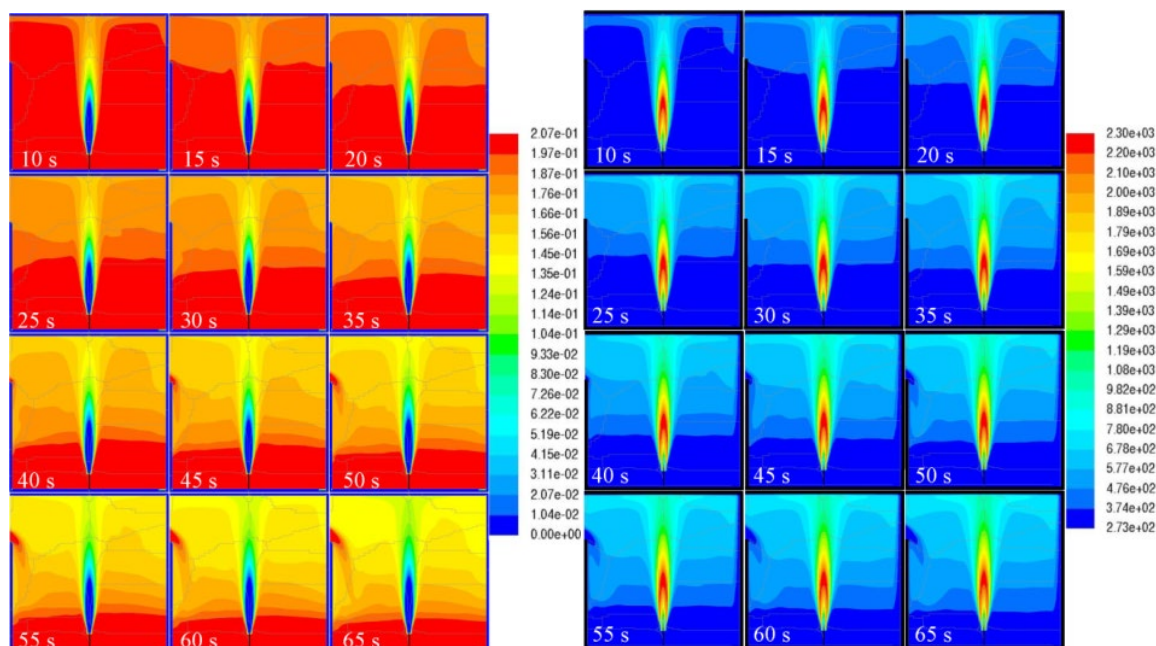
Obrázek 13c ukazuje velmi pomalé vyčerpávání počáteční vrstvy kyslíku ve spodní části pláště, což lze vysvětlit tím, že přívod kyslíku zvenčí přes spodní část ventilačního otvoru udržuje plamen (přívod vzduchu je jasně patrný na snímcích). Teplotní kontury (obrázek 13d) potvrzují přítomnost vrstvy na dně pláště, kde se zachovává počáteční teplota. V prostoru podobném místnosti by se tak vytvořily příznivé podmínky pro evakuaci osob. Je třeba poznamenat, že v

tomto modelu není zohledněno záření, které by ovlivnilo přijatelnost bezpečnostně technologické konstrukce na základě škodlivých účinků toku tepelného záření. Teplota klesá z 2 300 K v plameni na přibližně 750–1 000 K v horkém proudu pod stropem. Tato teplota je pravděpodobně nedostatečná k zapálení jakýchkoli hořlavých materiálů, zejména v přítomnosti vodní páry (molární podíl  $\text{H}_2\text{O}$  pod stropem je v rozmezí 0,11–0,13 v čase 65 s). Přesto mohou být některé komponenty v plášti FC zničeny. Jediným rozdílem numerického experimentu č. 4 je desetinásobné zvýšení průtoku uvolňovaného vodíku. Dobře ventilovaný požár je pozorován při rychlosti uvolňování vodíku 60 m/s a nedostatečně ventilovaný požár s přechodem do vnějšího plamene je pozorován při rychlosti uvolňování 600 m/s.



(a)

(b)



(c)

(d)

Obrázek 13. 2D řez podél osy pláště, simulace č. 5 (dobře ventilovaný požár) [13]: (a) molární podíl OH radikálů, (b) molární podíl H<sub>2</sub>, (c) molární podíl O<sub>2</sub> a (d) teplota.

## 10.2 Nedostatečně ventilované požáry

V případě nedostatečné ventilace se požár řídí ventilací a lze jej považovat za *nedostatečně ventilovaný*. V případě nedostatečné ventilace požáru se veškerý vodík v blízkosti úniku nespotřebuje a hoří pouze tam, kde je k dispozici kyslík, proto se u ventilačního otvoru budou nacházet jak horké spaliny, tak potenciálně vodík nebo vnější plamen [14].

Vznik horké vrstvy u stropu závisí na velikosti a umístění ventilačních otvorů (pokud existují) vzhledem k objemu úniku. V případě nedostatečné ventilace vzhledem k objemu úniku se horká vrstva zvětšuje směrem dolů v celém rozsahu pláště. Tato skutečnost představuje nebezpečí související s šířením tepelného záření, ale i nebezpečí udušení.

Se stále horší ventilací plamene se snižuje hladina kyslíku v prostoru, až do okamžiku, kdy se v blízkosti ventilačního otvoru objeví kyslík, a tím i hoření, které vyvolá vnější plamen. Ve zbytku pláště, kde se hromadí vodík, může docházet k malému nebo žádnému spalování. V tomto případě, pokud by byl únik následně zastaven (uzavřen) nebo snížen prostřednictvím postupného uvolňování tlaku, může vnější plamen prohořet zpět do pláště, kde může potenciálně existovat premixovaná hořlavá atmosféra, což může způsobit výbuch [14].

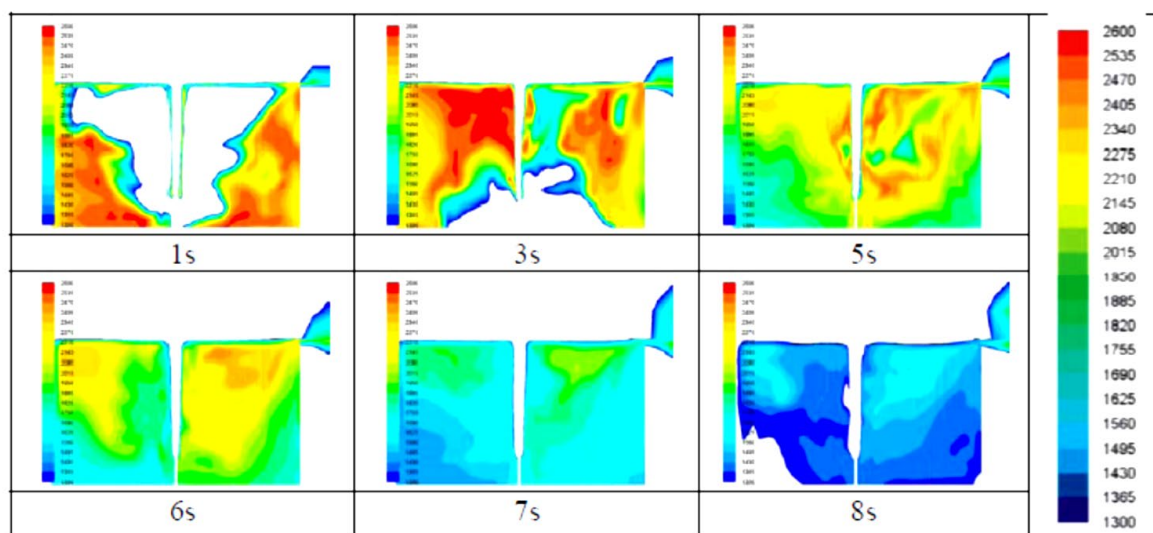
Pokud plášť nemá žádnou ventilaci, pak se do prostoru nemůže dostat kyslík, takže plamen bude spotřebovávat kyslík v prostoru, dokud se nespotřebuje palivo nebo kyslík. Následně plamen uhasne [14].

Produktem hoření vodíku je voda, a proto je možné, že v případě minimální ventilace a malého plamene může vodní pára vznikající při hoření vodíku v kombinaci s úbytkem kyslíku vést k samovolnému uhašení plamene. Pokud by došlo k samovolnému uhašení plamene a únik vodíku by nebyl zastaven v místě uhašení, došlo by k situaci, kdy by se plášť naplnil nespáleným vodíkem. Pokud by následně došlo k uzavření netěsnosti, vodík by byl vypuštěn a v plášti by vznikla premixovaná hořlavá atmosféra. Přítomnost horkého povrchu nebo podobného zdroje by mohla vést k opětovnému zapálení atmosféry a k výbuchu. Na hranici nedostatečně ventilovaného požáru existuje externí plamen na ventilačním otvoru. V případě samovolného uhašení požáru neexistuje žádný vnitřní ani externí plamen. Podrobnosti o numerických experimentech (tabulka 1) týkajících se vodíkového tryskového požáru s nedostatečnou ventilací a dynamiky samovolného uhašení požáru v uzavřeném prostoru jsou převzaty z dokumentu [13] a popsány níže.

## 10.3 Režim samovolného uhašení plamene

Uvažujme scénář s tryskovým požárem ze zařízení TPRD v malé garáži s rozměry  $D \times \check{S} \times V = 4,5 \times 2,6 \times 2,6$  m a objemem 30,4 m<sup>3</sup>. Jediný ventilační otvor, který odpovídá ploše

typické cihly  $D \times V = 25 \times 5$  cm, je umístěn v jedné rovině se stropem a vylučuje zohlednění tlakových účinků. Vodík se uvolňuje potrubím s průměrem 5,08 mm rychlostí 390 g/s. Spalováním uniklého vodíku v garáži se spotřebovává vzdušný kyslík a vzniká voda. Za krátkou dobu lze očekávat samovolné uhašení vodíku v místnosti. Numerické simulace tohoto scénáře skutečně prokázaly pokles teploty uvnitř prostoru, jak je znázorněno na obrázku 14, a vznik oblasti s hydroxylovými radikály (OH) související s reakčními zónami již po 3 s.

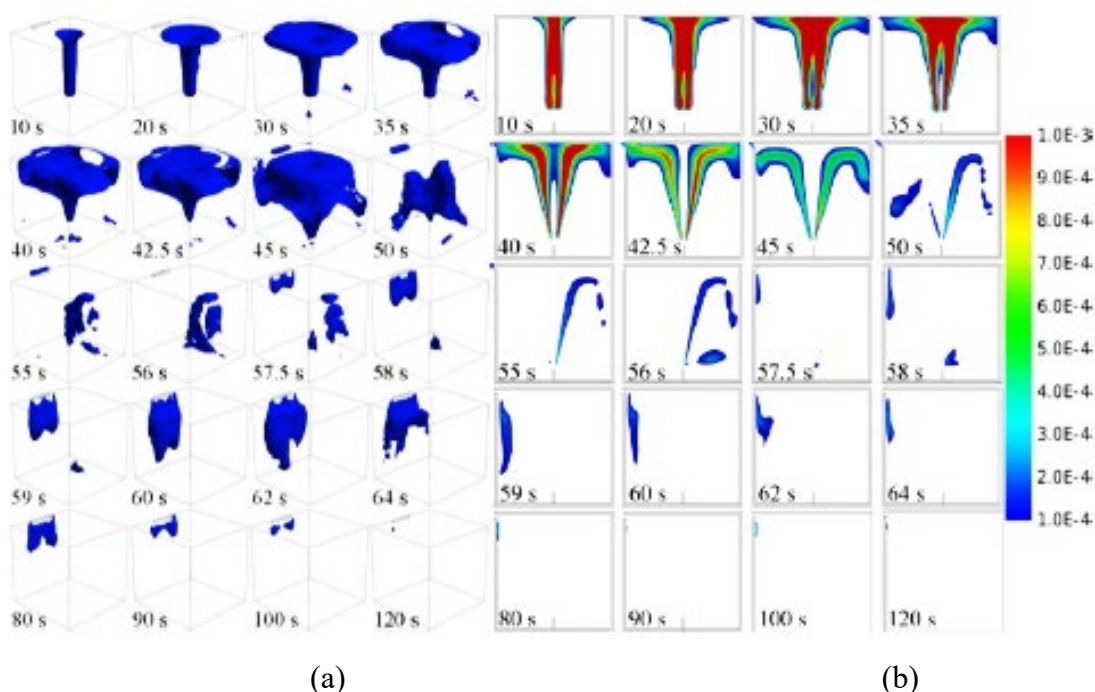


Obrázek 14. Kontury statické teploty v rozmezí 1 300 až 2 600 °C odpovídající viditelnému plameni (2D řez středem garáže) [15].

Samovolné vyhasnutí vodíkového plamene v prostoru s jedním horizontálním ventilačním otvorem umístěným v horní části jedné stěny bylo poprvé popsáno v dokumentu [12]. Analýza numerického experimentu, zejména koncentrace hydroxyly (OH), pomohla pochopit proces samovolného vyhasnutí. Použití zprůměrovaných parametrů celého objemu uzavřeného prostoru během požáru s nedostatečnou ventilací může poskytnout informace o okamžiku, kdy se hoření omezí, může však výrazně podcenit okamžik, kdy plamen zcela vyhasne. Numerické experimenty prokázaly složitý průběh proudění ventilačním otvorem v obou směrech během požáru s nedostatečnou ventilací. Úplné samovolné vyhasnutí bylo pozorováno, když byla celá plocha ventilace po určitou dobu vyplněna přívodem vzduchu do uzavřeného prostoru. Předpokládalo se, že příčinou tohoto jevu je ochlazování horkých spalin vlivem trvalého uvolňování vodíku a do jisté míry i přenosem tepla na stěny uzavřeného prostoru. Práce [13] rozšiřuje původní numerické experimenty a zaměřuje se na pochopení vodíkových požárů v uzavřeném prostoru s jedním horizontálním nebo vertikálním ventilačním otvorem umístěným v horní části jedné stěny a trvalým uvolňováním vodíku s konstantním průtokem a teplotou.

V numerickém experimentu č. 1 s horizontálním ventilačním otvorem (tabulka 1) bylo simulováno také samovolné vyhasnutí vodíkových plamenů v interiéru [12]. Uvažujme dynamiku samovolného vyhasnutí pozorovanou v simulaci č. 2 (rychlost uvolňování 300 m/s) a porovnejme ji se simulací č. 1 (rychlost uvolňování 600 m/s). Obrázek 15 ukazuje dynamiku

molárního podílu OH pro simulaci č. 2 ve 3D (obrázek 15a) a 2D (obrázek 15b). Reakční obrys (izopovrch molární zlomek OH  $1 \times 10^{-4}$ ) ukazuje místo spalování plamenem a přemísť se mimo uzavřený prostor přibližně v čase 30 s. Tato reakční zóna vně uzavřeného prostoru se odděluje od reakční zóny uvnitř uzavřeného prostoru v čase 45 s a existuje až do přibližně 56 s. Velikost této vnější malé reakční zóny nepřesahuje dvojnásobek výšky ventilačního otvoru. Přibližně ve stejnou dobu, tj. v čase 56–57 s, dochází k průniku vzduchu do uzavřeného prostoru, který podporuje slabou reakci v místě těsně pod ventilačním otvorem. Tato vnitřní reakční zóna prakticky zaniká přibližně v čase 120 s. Na rozdíl od experimentu č. 4 s externím plamenem, v simulaci č. 2 se samovolným uhašením plamene zaniká hoření v proudu nejprve na levé straně, která je blíže k ventilačnímu otvoru, a to v čase 55–56 s. To lze vysvětlit a je to v souladu s přítomností o něco většího množství kyslíku v této době ve spodní části na pravé straně proudu (obrázek 15a).

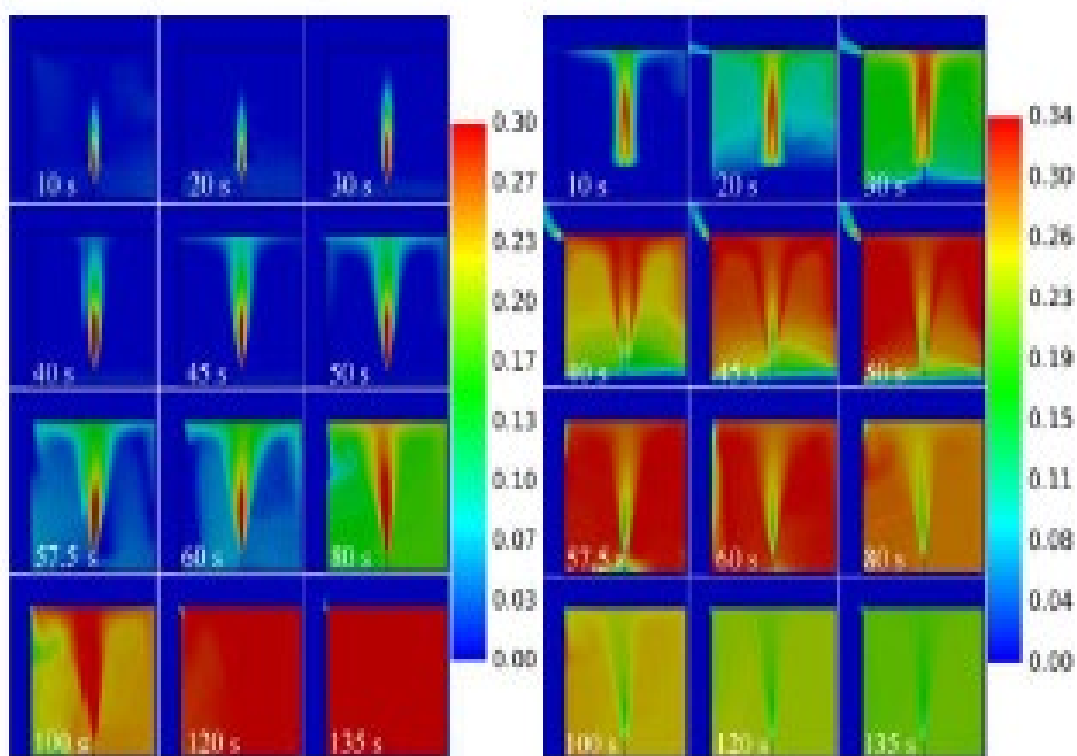


Obrázek 15. Molární podíl hydroxyly OH v uzavřeném prostoru s rozměry  $1 \times 1 \times 1$  m, simulace č. 2 (samovolné uhašení vodíkového proudového požáru) [13]: (a) 3D pohled na izopovrch OH  $1 \times 10^{-4}$ , (b) 2D řez podél středové linie uzavřeného prostoru.

Malou velikost reakční zóny vně uzavřeného prostoru v čase 30–56 s lze vysvětlit analýzou koncentrací látek uvedenou na obrázku 16. Během tohoto období totiž koncentrace vodíku v proudu vystupujícím z uzavřeného prostoru nepřekročí přibližně 7–10 % obj., koncentrace vody se zvyšuje z přibližně 15 na více než 34 % obj. a koncentrace kyslíku klesá z přibližně 10 % obj. na 0 % obj. Z grafu hořlavosti vyplývá, že tato směs se vzduchem se nachází přímo na hranici hořlavé oblasti [16]. V simulaci č. 2 tato směs reaguje se vzduchem za podmínek, kdy je teplota směsi poměrně vysoká a teprve na konci tohoto období klesne na přibližně 800 K.

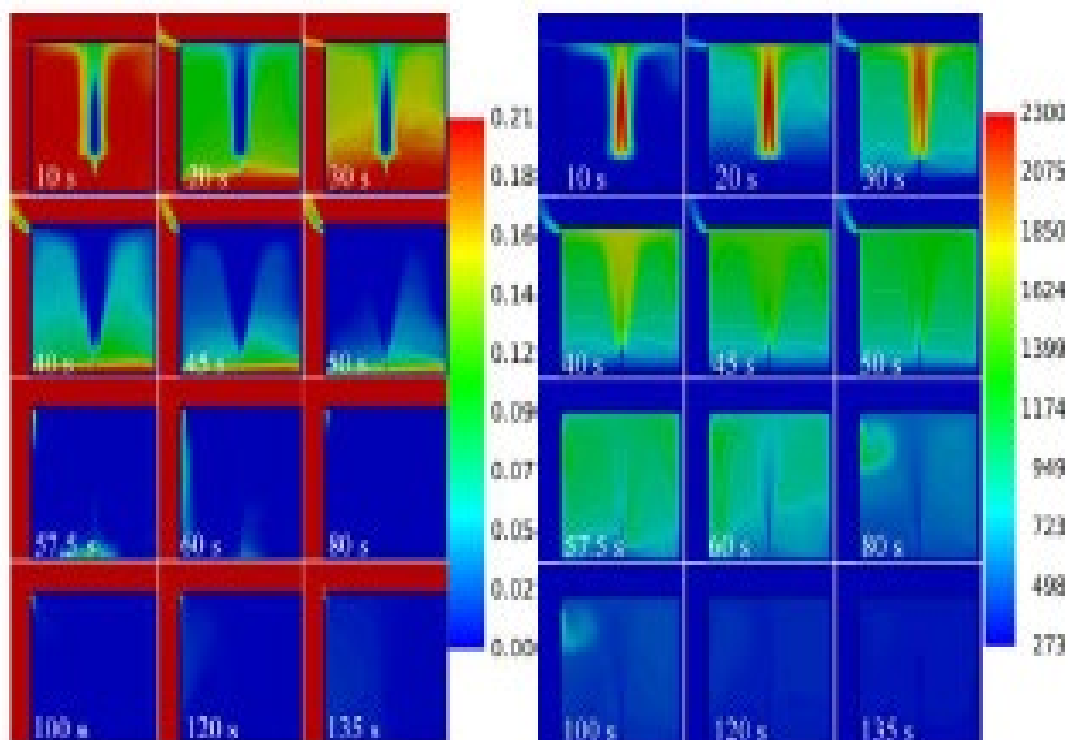


Jak vyplývá z obrázku 16, proudění ven z uzavřeného prostoru ustává po 50 s a poté proudí již pouze vzduch do prostoru (viz snímky odpovídající 57,5 s až 120 s). Ve shodě se simulací č. 1 musí tedy pro samovolné vyhasnutí uplynout delší časový úsek, kdy po počáteční fázi vnitřního spalování a následném ochlazení horkých spalin „studeným“ vodíkem dochází k sň9 vzduchu přes celou plochu ventilačního otvoru do uzavřeného prostoru.



(a)

(b)



(c) (d)  
 Obrázek 16. 2D řez podél osy uzavřeného prostoru v simulaci č. 2 (samovolné uhašení vodíkového tryskového požáru) [13]: (a) molární zlomek  $H_2$ , (b) molární zlomek  $H_2O$ , (c) molární zlomek  $O_2$  a (d) teplota.

Z obrázku 16 (a) je patrné, že po uplynutí 2 minut od zahájení úniku je uzavřený prostor naplněn vodíkem s molárním podílem nad stechiometrickou hodnotou  $>0,30$ . Podobně jako u simulace č. 4 se svislým ventilačním otvorem je proud mírně nakloněn směrem ke stěně s ventilačním otvorem. Maximální molární zlomek vody je pozorován v čase 50–60 s. V čase 40–50 s dochází k výrazné „stratifikaci“ kyslíku, přičemž nahoře je takřka nulová koncentrace a dole je prakticky počáteční koncentrace kyslíku 20,7 % obj. Teplota klesne na přibližně 100 stupňů nad počáteční teplotu po 2 minutách od zapáleného úniku. Tento výsledek lze použít jako údaj o době požární odolnosti součástí uvnitř palivového článku.

Předchozí závěr, že k samovolnému vyhasnutí dochází vždy po uplynutí určité doby, kdy je do prostoru přiváděn vzduch přes celou plochu ventilačního otvoru, se potvrdil v experimentu odpovídajícím podmínkám simulace č. 6 (tabulka 1) se svislým ventilačním otvorem s nejmenší plochou. Na podporu tohoto pravidla je třeba uvést, že v simulaci č. 7 (externí plamen) taková doba nenastala.

#### 10.4 Režim externího plamene

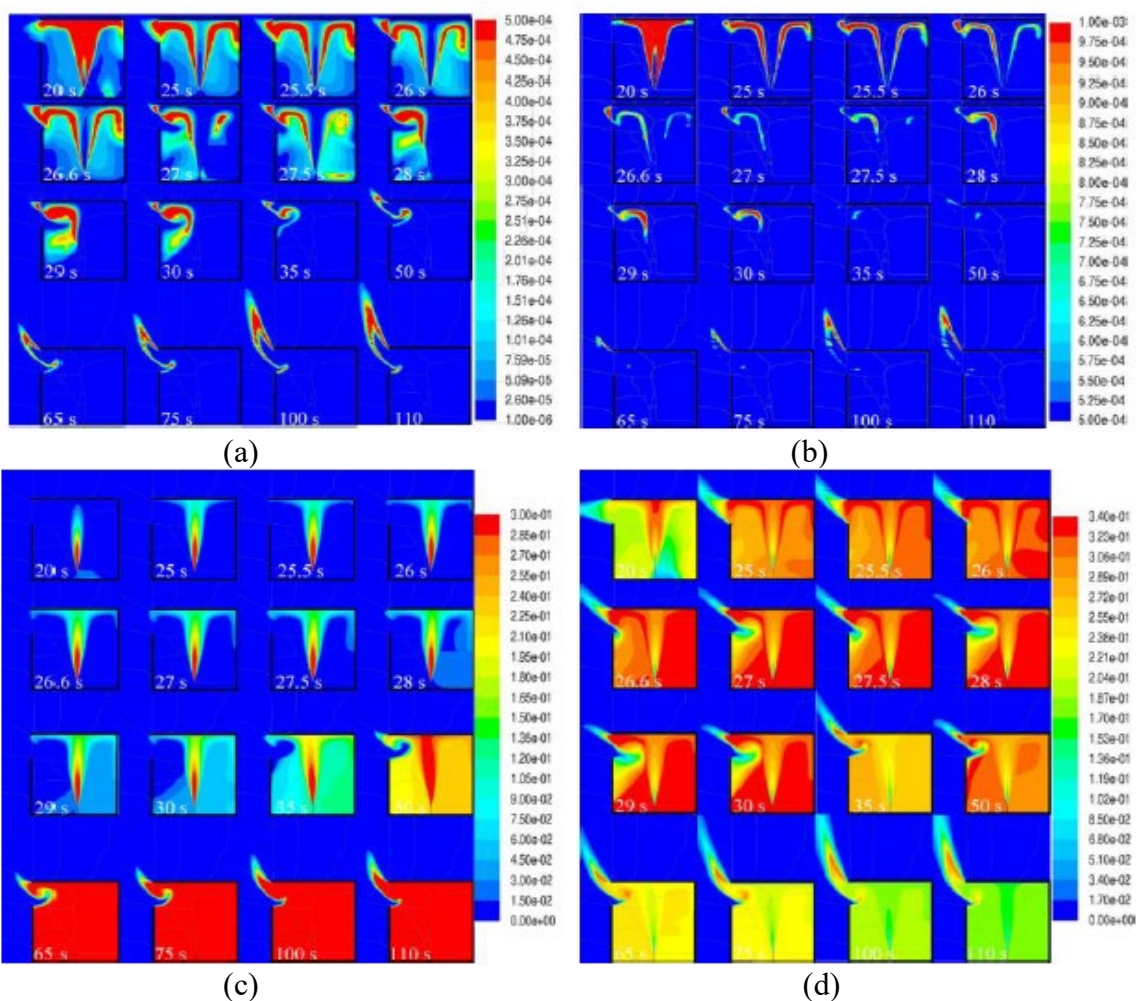
Obrázek 17 ukazuje výsledky simulace č. 4 pro uvolnění s rychlostí 600 m/s, kdy dochází k přechodu interního tryskového požáru v uzavřeném prostoru do režimu externího plamene. Molární zlomek hydroxylů v plameni v čase 10 s je roven 0,01, což je charakteristické pro hoření za normálních atmosférických podmínek. Poté se maximální molární zlomek OH snižuje spolu se zmenšováním zóny, kde je nejvyšší molární zlomek OH. Předpokládá se, že tento jev je způsoben ředěním tryskového plamene unášenými spaliny. Maximální molární zlomek OH nepřekročí  $7,5 \times 10^{-3}$  v čase 20 s.

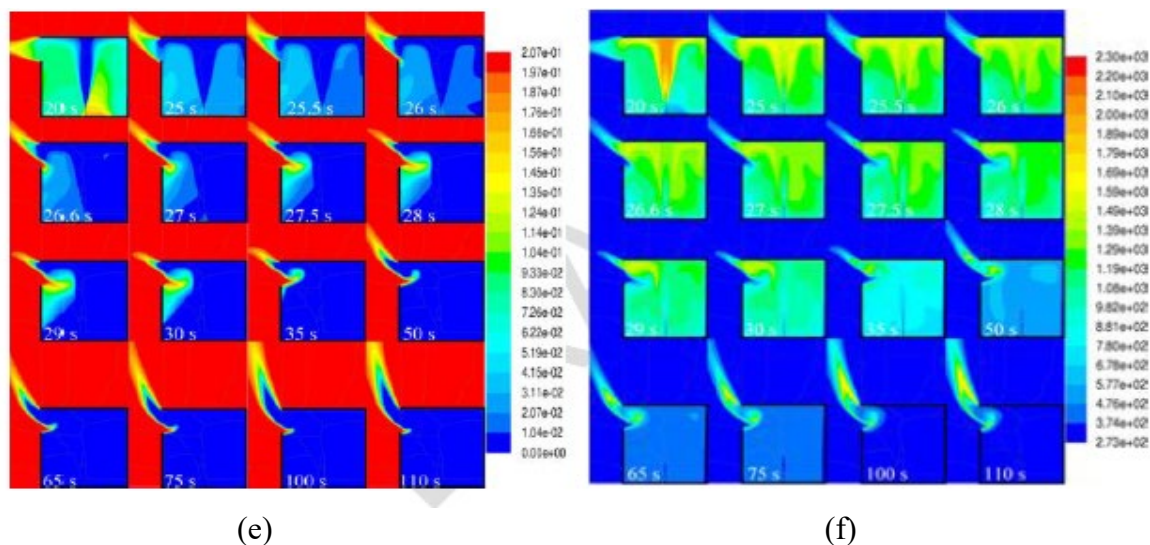
Obrázek 17a ukazuje vývoj reakční zóny při přechodu od vnitřního spalování k externímu plameni pomocí vizualizace molárního podílu OH v rozsahu od  $1 \times 10^{-6}$  do  $5 \times 10^{-4}$ , zatímco obrázek na obrázku 17b odpovídá rozsahu  $5 \times 10^{-4}$ – $1 \times 10^{-3}$ . Do času 20 s nedochází k žádné nebo jen velmi malé reakci vně uzavřeného prostoru. Zatímco rychlost hoření uvnitř uzavřeného prostoru se po uplynutí 20 s snižuje, reakční zóna se začíná přesouvat ven z uzavřeného prostoru ventilačním otvorem, přičemž externí plamen je viditelný nad uzavřeným prostorem po uplynutí 50 s. Obrázky 17a a 17b jasně ukazují, že reakce ustává nejprve na straně tryskového plamene, která je protilehlá k ventilačnímu otvoru, jenž se nachází v horní části levé stěny. Obrázek 17b ukazuje, že na obou stranách ventilačního otvoru se nachází souvislá reakční zóna. Tato zóna spojuje vnitřní reakci v oblasti, kde do uzavřeného prostoru vstupuje čerstvý vzduch, s externím plamenem ve směsi vodíku a spalin proudících do atmosféry ven z uzavřeného prostoru. Tyto dva protichůdné proudy skrz ventilační otvor vytvářejí reakční vír,

který se usazuje v prostoru v blízkosti ventilačního otvoru a stabilizuje spodní okraj plamene. Horní okraj externího plamene je připojen k hornímu okraji ventilačního otvoru.

Vývoj molárního podílu vodíku v uzavřeném prostoru je znázorněn na obrázku 17c. Požár probíhá v dobře ventilovaném režimu přibližně do času 20 s, kdy z uzavřeného prostoru neuniká žádný vodík v důsledku jeho úplného spalování uvnitř. Akumulace vodíku je poněkud vyšší na straně trysky protilehlé ke stěně s ventilačním otvorem. Dochází k určitému náklonu proudění směrem k ventilačnímu otvoru (viz snímek v čase 50 s). Molární zlomek vodíku je v čase 65 s prakticky v celém prostoru nad 0,30, avšak s výjimkou malé oblasti v blízkosti ventilačního otvoru, kam vstupuje vzduch. Molární podíl vodíku v čase 110 s činí 0,48 až 0,50 u podlahy, resp. u stropu.

Maximální množství vodní páry je pozorováno v čase 27–30 s (obrázek 17d), podobně jako v simulaci č. 1 s horizontálním ventilačním otvorem o stejné ploše uvedené v dokumentu [12]. Poté se molární podíl vody časem monotónně snižuje v důsledku vtažování vody do trvalého proudění vodíku a jeho vypouštění z uzavřeného prostoru (jako součást hořlavé směsi).





Obrázek 17. 2D řez podél osy uzavřeného prostoru, simulace č. 4 (režim externího vodíkového tryskového plamene) [13]: (a) molární zlomek OH, rozsah  $1 \times 10^{-6}$ – $5 \times 10^{-4}$ , (b) molární zlomek OH, rozsah  $5 \times 10^{-4}$ – $1 \times 10^{-3}$ , (c) molární zlomek H<sub>2</sub>, (d) molární zlomek H<sub>2</sub>O, (e) molární zlomek O<sub>2</sub> a (f) teplota.

V kritickém časovém bodě „přežití“ plamene přibližně v čase 50 s, kdy začíná přechod k externímu plameni, se molární podíl vodíku v odtoku zvýší přibližně na 0,2 a molární podíl vody (ředidla) klesne na 0,2–0,3. Toto složení směsi se považuje za hořlavé podle diagramu hořlavosti pro směs vodíku, vzduchu a ředidla při atmosférickém tlaku a teplotě, pokud se nedbá na vliv teploty. Dostupnost hořlavé směsi proudící ven z uzavřeného prostoru a přítomnost reakce (zdroje zapálení) tak vytváří podmínky pro přechod hoření mimo uzavřený prostor.

Obrázek 17e ukazuje, že molární podíl kyslíku v prostoru postupně klesá a v čase 35 s se prakticky rovná nule, s výjimkou malé oblasti v blízkosti ventilačního otvoru. Vzduch, který vstupuje do uzavřeného prostoru částečně shoří a je okamžitě vtahován do proudu vodíku a spalin, které proudí ven z uzavřeného prostoru horní částí ventilačního otvoru. Dynamika teploty uvnitř a vně uzavřeného prostoru je znázorněna na obrázku 17f. Snímek odpovídající 50 s ukazuje důležitou roli reakčního víru, který vzniká ve smykové vrstvě mezi směsí vystupující z uzavřeného prostoru a vzduchem vstupujícím do uzavřeného prostoru, na udržitelnost plamene a přechod z nedostatečně ventilovaného vnitřního požáru do režimu externího plamene.

U horizontálního ventilačního otvoru se shodnou plochou byl vznik externího plamene pozorován v simulaci č. 3 při nižší rychlosti vodíku, 150 m/s. Stejná rychlost úniku jako v simulaci č. 4 (vertikální ventilace), tj. 600 m/s, vedla u horizontální ventilace k samovolnému vyhasnutí plamene (simulace č. 1). Samovolné vyhasnutí bylo pozorováno i při rychlosti 300 m/s (simulace č. 2). Hranice rychlosti oddělující režim externího plamene a režim samovolného vyhasnutí se tedy pro danou geometrii uzavřeného prostoru pohybuje mezi 150 m/s a 300 m/s.

Vnější plamen je pozorován v simulaci č. 7 s vertikálním ventilačním otvorem se nejmenší plochou a při rychlosti úniku 300 m/s. Zvýšení rychlosti úniku na 600 m/s (simulace č. 6) vedlo k samovolnému vyhasnutí. Je třeba poznamenat, že charakteristickým rysem jevu samovolného vyhasnutí je existence období, kdy dochází k přívodu vzduchu do uzavřeného prostoru přes celou plochu ventilačního otvoru (nikoliv pouze částí jeho plochy).

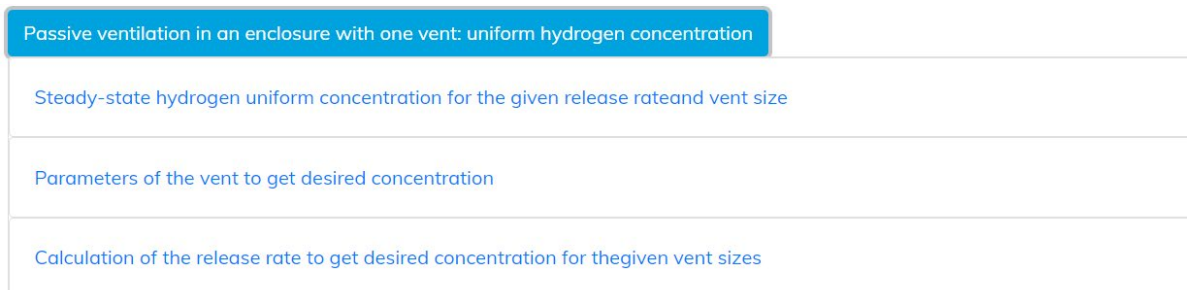
## 11. Využití e-Laboratoře

### 11.1 Pasivní ventilace uzavřeného prostoru jedním ventilačním otvorem: homogenní koncentrace vodíku

Tento nástroj obsahuje tři možnosti, které umožňují výpočet následujících tří funkcí:

1. ustálený stav homogenní koncentrace vodíku pro danou rychlost uvolňování a velikost ventilačního otvoru,
2. parametry ventilačního otvoru k získání požadované koncentrace pro daný únik,
3. rychlost uvolňování k dosažení požadované koncentrace při dané velikosti ventilačních otvorů.

Jednotlivé teorie jsou uvedeny v části 5 této přednášky. Pro použití nástroje, jak je znázorněno na obrázku 18, je prvním krokem výběr modelu, který má být použit pro konkrétní problematiku.



Obrázek 18 Výběr vhodného modelu pro konkrétní problematiku

#### **Problematika 1: Ustálený stav homogenní koncentrace vodíku pro danou rychlost uvolňování a velikost ventilačního otvoru.**

Vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 2 a snímek obrazovky s nastavením nástroje je na obrázku 19.

Tabulka 2 Vstupní parametr pro problematiku 1

Název parametru	Symbol	Jednotka	Limity (min–max)	Výchozí hodnoty
Hmotnostní průtok vodíku	$\dot{m}_{H_2}$	kg/s	0,0001–1	0,001
Okolní tlak	$p_2$	Pa	33 700–107 900	101325

Okolní teplota	$T_2$	K	240–350	293
Výška ventilačního otvoru	$H$	m	0,001–10	2
Šířka ventilačního otvoru	$W$	m	0,001–10	1
Koeficient uvolňování	$C_D$	-	0,4–1	0,6

### Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Steady-state hydrogen uniform concentration for the given release rate and vent size

Ambient pressure

$p_{atm}$  101325 Pa

Ambient temperature

$T_{atm}$  293 K

Hydrogen mass flow rate

$\dot{m}_{H_2}$  0.00001 kg/s

Discharge coefficient

$C_D$  0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W 0.2 m

Calculate Reset

Obrázek 19. Nastavení nástroje pro problematiku 1

Výstupním parametrem je objemový zlomek vodíku. Příklad výstupního parametru je uveden na obrázku 20, který ukazuje, že pro danou hodnotu vstupních parametrů na obrázku 19 činí vypočtený objemový zlomek vodíku v uzavřeném prostoru 0,048377.

### Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Steady-state hydrogen uniform concentration for the given release rate and vent size

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	$T_{atm}$	293	K
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	$C_D$	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Obrázek 20. Výstup nástroje pro problematiku 1



## Problematika 2: Parametry ventilačního otvoru k dosažení požadované koncentrace vodíku.

Tento nástroj umožňuje vypočítat parametry ventilačního otvoru, např. šířku nebo výšku, pro případné únik, aby nebyla překročena požadovaná úroveň koncentrace vodíku, např. 25 % dolní meze hořlavosti 4 % (LFL).

Vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 3 a snímek obrazovky s nastavením nástroje je na obrázku 21. Za pozornost stojí, že v tomto případě je třeba zadat buď výšku ventilačního otvoru  $H$ , nebo šířku ventilačního otvoru  $W$ , a to tak, že zadáte hodnotu  $H$  nebo  $W$  a nepotřebný parametr ( $H$ , nebo  $W$ ) ponecháte prázdný. Například pokud je jako vstupní parametr použita výška  $H$ , musí být nastavení  $W$  ponecháno prázdné a naopak.

Tabulka 3 Vstupní parametr pro problematiku 2

Název parametru	Symbol	Jednotka	Limity (min–max)	Výchozí hodnoty
Hmotnostní průtok vodíku	$\dot{m}_{H_2}$	kg/s	0,0001–1	0,001
Okolní tlak	$p_2$	Pa	33 700–107 900	101 325
Okolní teplota	$T_2$	K	240–350	293
Výběr výšky, nebo šířky	$H/W$	m	0,001–10	2
Koeficient uvolňování	$C_D$	-	0,4–1	0,6
Požadovaný molární podíl vodíku	$X$	-	0–1	0,04

## Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Parameters of the vent to get desired concentration

Ambient pressure

$P_{atm}$  101325 Pa

Ambient temperature

$T_{atm}$  293 K

Hydrogen mass flow rate

$\dot{m}_{H_2}$  0.00001 kg/s

Volume fraction of hydrogen

X 0.04837701757210591

Discharge coefficient

$C_D$  0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W m

Calculate Reset

Obrázek 21. Nastavení nástroje pro problematiku 2

Výstupním parametrem je buď výška, nebo šířka ventilačního otvoru při daném hmotnostním průtoku. Příklad výstupního parametru je uveden na obrázku 22, který ukazuje, že pro danou hodnotu vstupních parametrů na obrázku 21 je požadovaná šířka ventilačního otvoru 0,2 m, pokud je výška ventilačního otvoru nastavena na 0,2 m.

## Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Parameters of the vent to get desired concentration

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	$P_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	$T_{atm}$	293	K
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	$C_D$	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Obrázek 22. Výstup nástroje pro problematiku 2

### Problematika 3: Rychlost uvolňování k dosažení požadované koncentrace při dané velikosti ventilačních otvorů

Tento nástroj umožňuje vypočítat hmotnostní průtok, který může být povolen při konkrétních parametrech ventilace, aby nebyla překročena požadovaná úroveň koncentrace vodíku, např. 25 % dolní meze hořlavosti 4 % (LFL).



Vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 4 a snímek obrazovky s nastavením nástroje je na obrázku 23.

Tabulka 4 Vstupní parametr pro problematiku 3

Název parametru	Symbol	Jednotka	Limity (min–max)	Výchozí hodnoty
Okolní tlak	$p_2$	Pa	33 700–107 900	101 325
Okolní teplota	$T_2$	K	240–350	293
Výška ventilačního otvoru	$H$	M	0,001–10	2
Šířka ventilačního otvoru	$W$	m	0,001–10	1
Koeficient uvolňování	$C_D$	-	0,4–1	0,6
Požadovaný molární podíl vodíku	$X$	-	0–1	0,04

### Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Calculation of the release rate to get desired concentration for the given vent sizes

Ambient pressure

$P_{atm}$  101325 Pa

Ambient temperature

$T_{atm}$  293 K

Volume fraction of hydrogen

$X$  0.04837701757210591

Discharge coefficient

$C_D$  0.6

Vent height

$H$  0.2 m

Vent width

$W$  0.2 m

Calculate Reset

Obrázek 23. Nastavení nástroje pro problematiku 3

Výstupním parametrem je požadovaný hmotnostní průtok vodíku. Příklad výstupního parametru je uveden na obrázku 24, který ukazuje, že pro danou hodnotu vstupních parametrů na obrázku 23 činí požadovaný hmotnostní průtok vodíku  $1e-5 \text{ kg s}^{-1}$ .

## Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Calculation of the release rate to get desired concentration for the given vent sizes

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	$T_{atm}$	293	K
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	$C_D$	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Obrázek 24. Výstup nástroje pro problematiku 3

### 11.2 Jev tlakové špičky pro nezapálené úniky

Tento nástroj obsahuje dvě možnosti, které umožňují řešit následující problematiky:

1. jev tlakové špičky při konstantním hmotnostním průtoku,
2. jev tlakové špičky s poklesem tlaku v nádrži.

Teorie jevu tlakové špičky (PPP) byla podrobně popsána v části 6 této přednášky. Pro použití nástroje, jak je znázorněno na obrázku 25, je prvním krokem výběr modelu, který má být použit pro konkrétní problematiku. Popis modelu by se měl zobrazit po stisknutí příslušného tlačítka na úvodní obrazovce nástroje.

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

Constant mass flow rate

Tank blowdown

Obrázek 25. Výběr vhodného modelu pro konkrétní problematiku PPP

#### Problematika 1: Jev tlakové špičky při konstantním hmotnostním průtoku.

Vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 5 a snímek obrazovky s nastavením nástroje je na obrázku 26.

Tabulka 5 Vstupní parametr pro problematiku 1 PPP (nezapálený únik)

Název parametru	Symbol	Jednotka	Limity (min–max)	Výchozí hodnoty
Atmosférický tlak	$p_{atm}$	Pa	101 325– 90 000 000	101 325
Teplota uzavřeného prostoru	$T_{encl}$	K		293,15
Objem uzavřeného prostoru	$V_{encl}$	m <sup>3</sup>		30,42
Výška ventilačního otvoru	$H_{vent}$	m		0,05
Šířka ventilačního otvoru	$W_{vent}$	m		0,25

Hmotnostní průtok vodíku	$\dot{m}_{H_2}$	kg/s		0,39
Koeficient uvolňování	$C_D$	-		0,6
Časový krok integrace	$\Delta t$	s		1
Počet časových kroků pro integrace	$n_{last}$	-	500–100 000	1 000

## Pressure peaking phenomenon for unignited releases

### » Constant mass flow rate

Atmospheric pressure

$P_{atm}$  101325 Pa

Enclosure temperature

$T_{encl}$  293.15 K

Enclosure volume

$V_{encl}$  30.42 m<sup>3</sup>

Vent height

$H_{vent}$  0.05 m

Vent width

$W_{vent}$  0.25 m

Hydrogen mass flow rate

$\dot{m}_{H_2}$  0.39 kg/s

Coefficient of discharge

$C_D$  0.6

Time step for integration

$\Delta t$  1 s

Number of time steps for integration

$n_{maz}$  1000

Calculate Reset

Obrázek 26. Vstupní parametry pro problematiku 1 PPP (nezapálený únik)

Po dokončení výpočtu by měl být vykreslen graf závislosti tlaku  $p_{g\_encl}$  (osa Y) na čase  $t$  (osa X) v jevu tlakové špičky. Tlaková osa by měla mít název osy s ohledem na jednotky tlaku zvolené na začátku, např. Tlak (bar/Pa/kPa atd.). Příklad výstupního parametru je uveden na obrázku 27.

## Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Constant mass flow rate

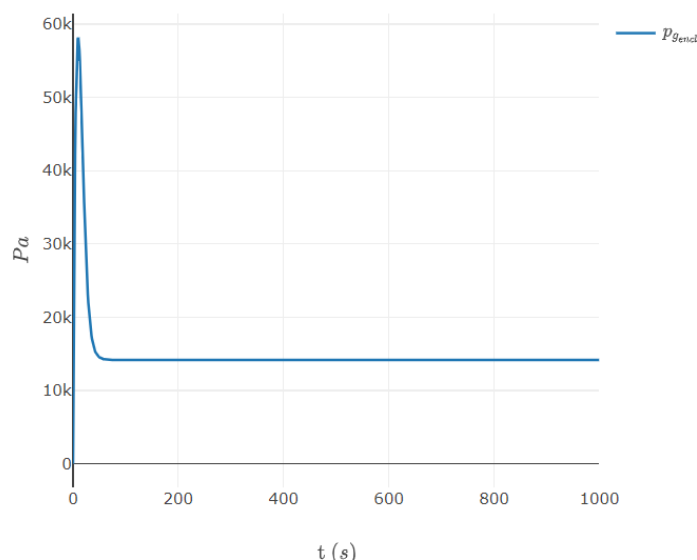
Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	$T_{encl}$	293.15	K
Enclosure volume	$V_{encl}$	30.42	m <sup>3</sup>
Vent height	$H_{vent}$	0.05	m
Vent width	$W_{vent}$	0.25	m
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	0.39	kg/s
Coefficient of discharge	$C_D$	0.6	
Time step for integration	$\Delta t$	1	s
Number of time steps for integration	$n_{max}$	1000	
Time	t	<a href="#">view</a>	s
Mass of gases in enclosure	$m_{encl}$	<a href="#">view</a>	kg
Vent mass flow rate	$\dot{m}_{vent}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Overpressure	$p_{g_{encl}}$	<a href="#">view</a>	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Obrázek 27. Výstup nástroje pro problematiku 1 PPP (nezapálený únik)

Graf závislosti tlaku na čase je znázorněn na obrázku 28.



Obrázek 28. Graf závislosti tlaku na čase problematiky 1 PPP (nezapálený případ)

### Problematika 2: Jev tlakové špičky s poklesem tlaku v nádrži.

Vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 6 a snímek obrazovky s nastavením nástroje je na obrázku 29.

Tabulka 6 Vstupní parametr pro problematiku 2 PPP (nezapálený únik)

Název parametru	Symbol	Jednotka	Limity (min–max)	Výchozí hodnoty
Atmosférický tlak	$p_{atm}$	Pa	101 325–90 000 000	101 325
Teplota uzavřeného prostoru	$T_{encl}$	K		
Objem uzavřeného prostoru	$V_{encl}$	m <sup>3</sup>		
Výška ventilačního otvoru	$H_{vent}$	m		
Šířka ventilačního otvoru	$W_{vent}$	m		
Koeficient uvolňování	$C_D$	-		0,6
Počáteční tlak vodíku v nádrži	$p_{res}^0$	Pa		
Počáteční teplota vodíku v nádrži	$T_{res}$	K		
Objem nádrže	$V_{res}$	m <sup>3</sup>		
Průměr ústí	$d_3$	m		
Počáteční odhad doby integrace	$t_{f0}$	s		
Počet časových kroků pro integrace	$i_{last}$	-		

## Pressure peaking phenomenon for unignited releases

### » Tank blowdown

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m<sup>3</sup>

Vent height

 m

Vent width

 m

Coefficient of discharge

H2 pressure in reservoir

 Pa

H2 temperature in reservoir

 K

Reservoir volume

 m<sup>3</sup>

Orifice diameter

 m

Initial guess for integration time

 s

Number of time steps for integration

Obrázek 29. Vstupní parametry pro problematiku 2 PPP (nezapálený únik)

Po dokončení výpočtu se vykreslí graf závislosti tlaku  $p_{g\_encl}$  (osa Y) na čase  $t$  (osa X) jevu tlakové špičky. Tlaková osa by měla mít název osy s ohledem na jednotky tlaku zvolené na začátku, např. Tlak (bar/Pa/kPa atd.). Příklad výstupního parametru je uveden na obrázku 30.

## Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Tank blowdown

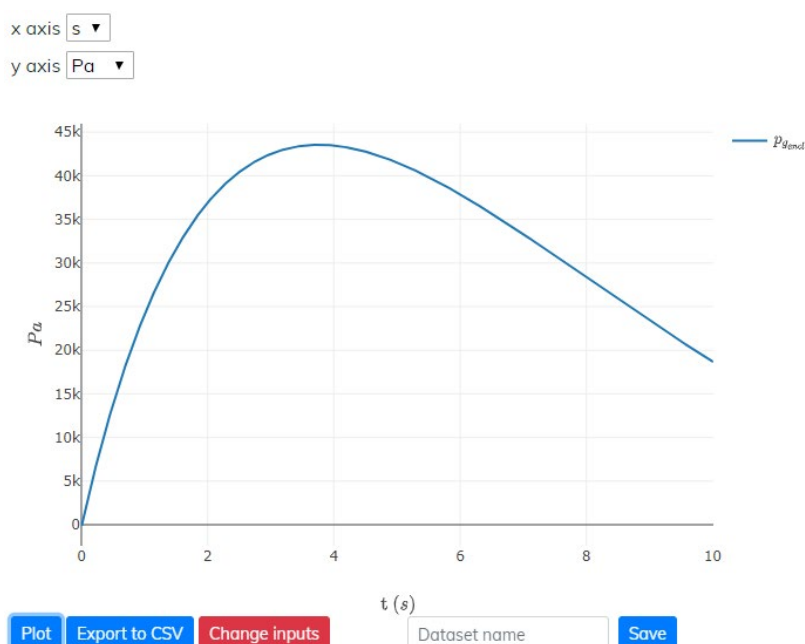
Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	$T_{encl}$	293.15	K
Enclosure volume	$V_{encl}$	30.42	m <sup>3</sup>
Vent height	$H_{vent}$	0.05	m
Vent width	$W_{vent}$	0.25	m
Coefficient of discharge	$C_D$	0.6	
H2 pressure in reservoir	$p_{res}$	8.45344e+5	Pa
H2 temperature in reservoir	$T_{res}$	114.878	K
Reservoir volume	$V_{res}$	0.196	m <sup>3</sup>
Orifice diameter	$d_3$	0.0095	m
Initial guess for integration time	$t_{f_0}$	10	s
Number of time steps for integration	$n_{maz}$	1000	
Time	t	<a href="#">view</a>	s
H2 mass in reservoir	$m_{H_2}$	<a href="#">view</a>	kg
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Density in notional nozzle	$\rho_4$	<a href="#">view</a>	kg/m <sup>3</sup>
Velocity in notional nozzle	$V_4$	<a href="#">view</a>	m/s
Notional nozzle diameter	$d_4$	<a href="#">view</a>	m
Mass of gases in enclosure	$m_{encl}$	<a href="#">view</a>	kg
Vent mass flow rate	$\dot{m}_{vent}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Overpressure	$p_{gend}$	<a href="#">view</a>	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Obrázek 30. Výstup nástroje pro problematiku 2 PPP (nezapálený únik)

Graf závislosti tlaku na čase je znázorněn na obrázku 31.



Obrázek 31. Graf závislosti tlaku na čase problematiky 2 PPP (nezapálený případ)

### 11.3 Jev tlakové špičky pro zapálený únik

Podobně jako u jevu tlakové špičky (PPP) při nezapáleném úniku obsahuje i nástroj pro výpočet PPP při zapáleném úniku dvě možnosti.

Nejprve je třeba v uvedených nástrojích e-Laboratoře vybrat nástroj s názvem Pressure peaking phenomenon for ignited release (Jev tlakové špičky pro zapálený únik). Poté je třeba vybrat možnost Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate) (Jev tlakové špičky pro zapálený únik (konstantní hmotnostní průtok)) pro řešení problematiky 1, nebo Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown) (Jev tlakové špičky pro zapálený únik (pokles tlaku v nádrži)) pro řešení problematiky 2, jak je znázorněno na obrázku 32.



Obrázek 32. Výběr vhodného nástroje pro konkrétní problematiku.

#### Problematika 1: Jev tlakové špičky při konstantním hmotnostním průtoku.

Vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 7 a snímek obrazovky nastavení nástroje na obrázku 33. Rozdíl mezi vstupními parametry v případě zapáleného úniku spočívá v požadavku na dodatečný parametr,  $C_I$ .

Tabulka 7 Vstupní parametr pro problematiku 1 PPP (zapálený únik)

Název parametru	Symbol	Jednotka	Limity (min–max)	Výchozí hodnoty
Atmosférický tlak	$p_{atm}$	Pa	101 325– 90 000 000	101 325
Teplota uzavřeného prostoru	$T_{encl}$	K		293,15
Objem uzavřeného prostoru	$V_{encl}$	m <sup>3</sup>		30,42
Výška ventilačního otvoru	$H_{vent}$	m		0,05
Šířka ventilačního otvoru	$W_{vent}$	m		0,25
Hmotnostní průtok vodíku	$\dot{m}_{H_2}$	kg/s		0,39
Koeficient uvolňování	$C_D$	-		0,6
Časový krok integrace	$\Delta t$	s		1
Počet časových kroků pro integrace	$n_{last}$	-		1000
Koeficient zapáleného úniku	$C_I$	-		1



**Poznámka:** Vstupní hodnota pro  $C_I$  zvýrazněná žlutě by se měla zobrazit pouze v případě zapáleného úniku.

## Pressure peaking phenomenon for ignited releases

### » Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)

Atmospheric pressure

$P_{atm}$  101325 Pa

Enclosure temperature

$T_{encl}$  293.15 K

Enclosure volume

$V_{encl}$  30.42 m<sup>3</sup>

Vent height

$H_{vent}$  0.05 m

Vent width

$W_{vent}$  0.25 m

Hydrogen mass flow rate

$\dot{m}_{H_2}$  0.017 kg/s

Coefficient of discharge

$C_D$  0.6

Sought factor

$\alpha_c$  22

Time step for integration

$\Delta t$  1 s

Number of time steps for integration

$n_{max}$  1000

Calculate Reset

Obrázek 33. Vstupní parametry problematiky 1 PPP (zapálený únik)

Snímek obrazovky s výstupními parametry a příklad grafu tlaku v závislosti na čase jsou uvedeny na obrázcích 34 a 35.

## Pressure peaking phenomenon for ignited releases

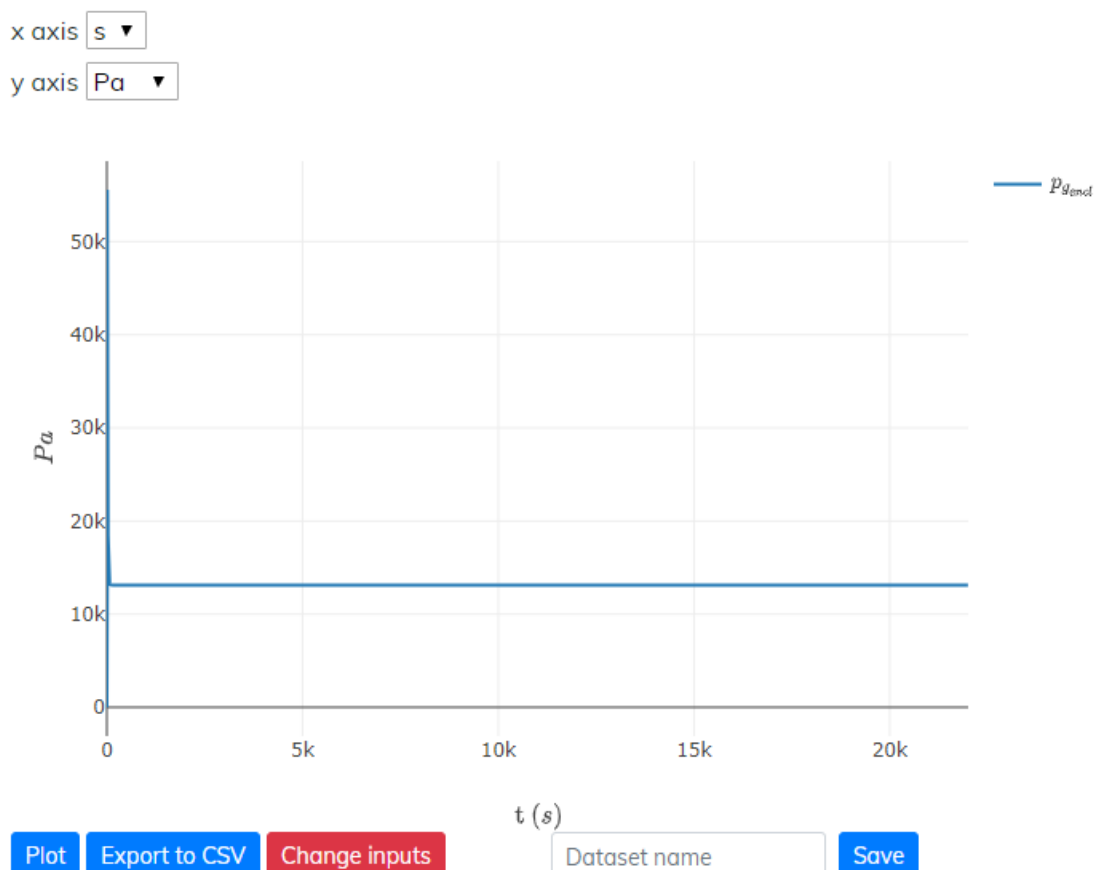
» Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	$P_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	$T_{encl}$	293.15	K
Enclosure volume	$V_{encl}$	30.42	m <sup>3</sup>
Vent height	$H_{vent}$	0.05	m
Vent width	$W_{vent}$	0.25	m
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	0.017	kg/s
Coefficient of discharge	$C_D$	0.6	
Sought factor	$\alpha_c$	22	
Time step for integration	$\Delta t$	1	s
Number of time steps for integration	$n_{max}$	1000	
Time	t	<a href="#">view</a>	s
Mass of gases in enclosure	$m_{encl}$	<a href="#">view</a>	kg
Vent mass flow rate	$\dot{m}_{vent}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Overpressure	$P_{gend}$	<a href="#">view</a>	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Obrázek 34. Výstup nástroje pro problematiku 1 PPP (zapálený únik)



Obrázek 35. Graf závislosti tlaku na čase problematiky 1 PPP (zapálený únik)

### Problematika 2: Jev tlakové špičky s poklesem tlaku v nádrži.

Vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce 8 a snímek obrazovky nastavení nástroje na obrázku 36.

Tabulka 8 Vstupní parametr pro problematiku 2 PPP (zapálený únik)

Název parametru	Symbol	Jednotka	Limity (min–max)	Výchozí hodnoty
Atmosférický tlak	$p_{atm}$	Pa	101325–90 000 000	101325
Teplota uzavřeného prostoru	$T_{encl}$	K		
Objem uzavřeného prostoru	$V_{encl}$	m <sup>3</sup>		
Výška ventilačního otvoru	$H_{vent}$	m		
Šířka ventilačního otvoru	$W_{vent}$	m		
Koeficient uvolňování	$C_D$	-		0,6
Počáteční tlak vodíku v nádrži	$p_{res}^0$	Pa		
Počáteční teplota vodíku v nádrži	$T_{res}$	K		
Objem nádrže	$V_{res}$	m <sup>3</sup>		
Průměr ústí	$d_3$	m		
Počáteční odhad doby integrace	$t_{f0}$	s		
Počet časových kroků pro integrace	$i_{last}$	-		
Koeficient zapáleného úniku	$C_I$	-		1

## Pressure peaking phenomenon for ignited releases

### » Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)

Atmospheric pressure

$P_{atm}$  101325 Pa

Enclosure temperature

$T_{enc}$  293.15 K

Enclosure volume

$V_{enc}$  30.42 m<sup>3</sup>

Vent height

$H_{vent}$  0.05 m

Vent width

$W_{vent}$  0.25 m

Coefficient of discharge

$C_D$  0.6

Sought factor

$\alpha_c$  22

H2 pressure in reservoir

$P_{res}$  20500000 Pa

H2 temperature in reservoir

$T_{res}$  288 K

Reservoir volume

$V_{res}$  0.196 m<sup>3</sup>

Orifice diameter

$d_s$  0.0095 m

Initial guess for integration time

$t_{f0}$  10 s

Number of time steps for integration

$n_{max}$  1000

[Calculate](#) [Reset](#)

Obrázek 36. Vstupní parametry problematiky 2 PPP (zapálený únik)

Snímek obrazovky s výstupními parametry a příklad grafu tlaku v závislosti na čase jsou uvedeny na obrázcích 37 a 38.

## Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	$p_{atm}$	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	$T_{encl}$	293.15	K
Enclosure volume	$V_{encl}$	30.42	m <sup>3</sup>
Vent height	$H_{vent}$	0.05	m
Vent width	$W_{vent}$	0.25	m
Coefficient of discharge	$C_D$	0.6	
Sought factor	$\alpha_c$	22	
H2 pressure in reservoir	$p_{res}$	8.45344e+5	Pa
H2 temperature in reservoir	$T_{res}$	114.878	K
Reservoir volume	$V_{res}$	0.196	m <sup>3</sup>
Orifice diameter	$d_3$	0.0095	m
Initial guess for integration time	$t_{f_0}$	10	s
Number of time steps for integration	$n_{maz}$	1000	
Time	t	<a href="#">view</a>	s
H2 mass in reservoir	$m_{H_2}$	<a href="#">view</a>	kg
Hydrogen mass flow rate	$\dot{m}_{H_2}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Density in notional nozzle	$\rho_4$	<a href="#">view</a>	kg/m <sup>3</sup>
Velocity in notional nozzle	$V_4$	<a href="#">view</a>	m/s
Notional nozzle diameter	$d_4$	<a href="#">view</a>	m
Mass of gases in enclosure	$m_{encl}$	<a href="#">view</a>	kg
Vent mass flow rate	$\dot{m}_{vent}$	<a href="#">view</a>	kg/s
Overpressure	$p_{g_{encl}}$	<a href="#">view</a>	Pa

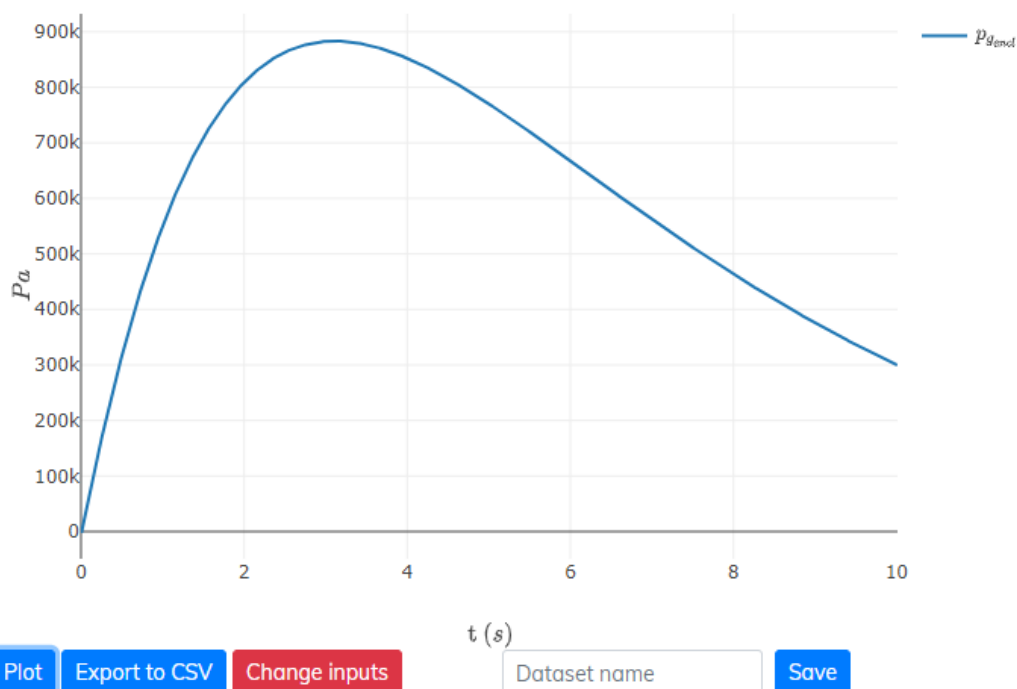
[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Obrázek 37. Výstup nástroje pro problematiku 2 PPP (zapálený únik)

x axis s ▼

y axis Pa ▼



Obrázek 38. Graf závislosti tlaku na čase problematiky 2 PPP (zapálený únik)

## Poděkování

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

## Literatura a odkazy

1. Projekt HyIndoor. K dispozici na adrese <https://hydrogeneurope.eu/project/hyindoor>. [přístup k datu 07.12.2020]
2. Projekt HyResponder, výstup D1.1 – Zpráva o bezpečnostních aspektech vodíkových technologií, systémů a infrastruktury (2020). Výstup bude veřejně k dispozici na adrese: <https://hyresponder.eu/deliverables/> po schválení
3. Saffers, J-B a Molkov, V (2014). Hydrogen safety engineering framework (Rámec vodíkového bezpečnostního inženýrství). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 39, s. 6268–6285.
4. Projekt HyIndoor, výstup D5.1 – Všeobecně přijímané pokyny pro instalaci a použití palivových článků v interiéru (2015) K dispozici na adrese: [http://www.hyindoor.eu/wp-content/uploads/2014/06/HyIndoor-Guidelines\\_D5.1\\_Final-version3a.pdf](http://www.hyindoor.eu/wp-content/uploads/2014/06/HyIndoor-Guidelines_D5.1_Final-version3a.pdf) [přístup k datu 07.12.2020].
5. Karlsson, B a Quintiere, J (2000). Enclosure fire dynamics (Dynamika požáru v uzavřeném prostoru). CRC Press.
6. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering (Základy bezpečnostního vodíkového inženýrství), části I a II. K dispozici na adrese: [www.bookboon.com](http://www.bookboon.com), e-kniha k bezplatnému stažení.
7. Brennan, S a Molkov, V (2013). Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation (Posouzení bezpečnosti nezapáleného úniku vodíku z palubních zásobníků v garážích s nízkou úrovní přirozené ventilace). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 38, s. 8159–8166.
8. ISO/TR 15916 (2004). Základní hlediska bezpečnosti vodíkových systémů. Mezinárodní organizace pro normalizaci. Technická komise ISO 197, Vodíkové technologie. Mezinárodní organizace pro normalizaci, Ženeva.
9. Baker, WE, Cox, PA, Westine, PS, Kulesz, JJ a Strehlow, RA (1983). Explosion hazards and evaluation (Nebezpečí výbuchu a jeho hodnocení). Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co, Nizozemsko.
10. Molkov, V, Shentsov, V a Quintiere, J (2014). Passive ventilation of a sustained gaseous release in an enclosure with one vent (Pasivní ventilace trvalého úniku plynů v prostoru s jedním ventilačním otvorem). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Sv. 39 (15), s. 8158–8168

11. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D, Hydrogen non-premixed combustion in enclosure with one vent and sustained release: Numerical experiments (Spalování premixovaných vodíkových směsí při stabilním úniku v uzavřeném prostoru: numerické experimenty) *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy*, svazek 39, číslo 20, 3. července 2014, s. 10788–10801
12. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S a Makarov, D (2013). Dynamics of Hydrogen Flame Self-Extinction in a Vented Enclosure (Dynamika samovolného vyhasnutí vodíkového plamene v uzavřeném prostoru s ventilací). Sborník příspěvků ze 7. mezinárodního semináře o nebezpečí požáru a výbuchu, 5.–10. května 2013, Providence, RI, USA.
13. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S a Makarov, D (2013). Hydrogen non-premixed combustion in enclosure with one vent and sustained release: numerical experiments (Spalování nepremixovaných vodíkových směsí při stabilním úniku v uzavřeném prostoru: numerické experimenty). Sborník ICHS 2013, 9.–11. září 2013, Brusel, Belgie.
14. Projekt HyTunnel, výstup D3.1 – Podrobný program výzkumu vodíkových požárů v uzavřených konstrukcích (2019). K dispozici na adrese: [https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS\\_D3.1\\_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf](https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS_D3.1_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf) [přístup k datu 07.12.2020].
15. Molkov, V, Bragin, M, Brennan, S, Makarov, D a Saffers, J-B (2010). Hydrogen Safety Engineering: Overview of Recent Progress and Unresolved Issues (Vodíkové bezpečnostní inženýrství: přehled nejnovějšího pokroku a nevyřešených otázek). Mezinárodní symposium o dynamice spalování a požáru, říjen 2010, Santander, Španělsko.
16. Trevino, C a Mauss, F (1992). Kapitola 10 „Structure and Extinction of Non-Diluted Hydrogen-Air Diffusion Flames“ (Struktura a zhášení neředěných difúzních plamenů směsí vodíku se vzduchem), publikováno v Peters, N., Rogg, B., *Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems* (Redukované kinetické mechanismy pro aplikace ve spalovacích soustavách). Lecture Notes in Physics, svazek m15. Springer-Verlag, 1992.
17. 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 07.12.2020].
18. Brennan, S, Makarov, D a Molkov, V (2010). Dynamics of flammable hydrogen-air mixture formation in an enclosure with a single vent (Dynamika tvorby hořlavé směsí vodíku se vzduchem v uzavřeném prostoru s jedním ventilačním otvorem). Sborník



- příspěvků ze 6. mezinárodního semináře o nebezpečí požáru a výbuchu, Leeds, duben 2010.
19. SAE J2579 (2009). Technická informační zpráva o palivových systémech pro vozidla s palivovými články a jiná vozidla na vodík, SAE International, Detroit, Michigan, USA, leden 2009.
  20. Emmons, DD (1995). Vent flows (Průtok ventilačním otvorem), SFPE Handbook, ed. P. J. Di Nenno, (2. vydání). Society of Fire Protection Engineers (Společnost technologů protipožární ochrany), Boston, MA, USA.
  21. Brennan, S a Molokov, V (2013). Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation (Posouzení bezpečnosti nezapáleného úniku vodíku z palubních zásobníků v garážích s nízkou úrovní přirozené ventilace). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 38, s. 8159–8166.
  22. Kuznetsov, M., Grune, J., Friedrich, A., Sempert, K., Breitung, W., Jordan, T. (2011) Hydrogen-air deflagrations and detonations in a semi-confined flat layer (Deflagrace a detonace směsí vodíku se vzduchem v polouzavřené ploché vrstvě). Uvedeno v: Nebezpečí požáru a výbuchu, sborník příspěvků 6. mezinárodního semináře (redakce D. Bradley, G. Makhviladze a V. Molokov), 125–136.
  23. Alekseev, V.I., Kuznetsov, M.S., Yankin, Yu., G., Dorofeev, S.B. (2001) Experimental study of flame acceleration and DDT under conditions of transverse venting (Experimentální studie zrychlení plamene a přechodu DDT za podmínek příčné ventilace). Časopis J. Loss Prev. Proc. Ind. (Prevence ztrát ve zpracovatelském průmyslu), 14/6:591–596.
  24. Dorofeev, S.B., Kuznetsov, M.S., Alekseev, V.I., Efimenko, A.A., Breitung, W. (2001) Evaluation of limits for effective flame acceleration in hydrogen mixtures (Posuzování mezních hodnot účinného urychlení plamene ve vodíkových směsích). Časopis J. Loss Prev. Proc. Ind. (Prevence ztrát ve zpracovatelském průmyslu), 14 (6):583–589.
  25. Friedrich, A., Grune, J., Jordan, T., Kotchourko, A., Kotchourko, N., Kuznetsov, M., Sempert, K., Stern, G. (2007) Experimental study of hydrogen-air deflagrations in flat layer (Experimentální studie deflagrací plochých vrstev směsí vodíku se vzduchem). Uvedeno v: Sborník příspěvků 2. mezinárodní konference ICHE o vodíkové bezpečnosti. 11.–13. září 2007, San Sebastian – ŠPANĚLSKO, příspěvek 1.3.106, 1–12.
  26. Spojené státy, Ministerstvo energetiky.  
[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/current\\_technology.html](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/current_technology.html).
  27. Brennan, S, Makarov, D a Molokov, V Dynamics of flammable hydrogen-air mixture formation in an enclosure with a single vent (Dynamika tvorby hořlavé směsi vodíku se vzduchem v uzavřeném prostoru s jedním ventilačním otvorem). Uvedeno v: Sborník



příspěvků 6. mezinárodního semináře o nebezpečí požáru a výbuchu. Anglie: Research Publishing; červenec 2011. ISBN 978-981-08-7724-8.

28. S. Brennan, V. Molokov. Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation (Posouzení bezpečnosti nezapáleného úniku vodíku z palubních zásobníků v garážích s nízkou úrovní přirozené ventilace). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38: 8159–8166.
29. H. Hussein, S. Brennan, V. Molokov. Dispersion of hydrogen release in a naturally ventilated covered car park (Rozptyl vodíku v krytém parkovišti s přirozenou ventilací). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45: 23882–23897.