



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

## Přednáška 8

### Zdroje a prevence zapálení

#### ÚROVEŇ IV

#### **Důstojník specialista**

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

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

Tato přednáška je součástí balíčku školicích materiálů. Vybrané materiály jsou k dispozici 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

Vodík je snadno zápalný, protože má mezi známými palivy nejnižší minimální zápalnou energii (MIE). Často je obtížné zjistit přesný zdroj zapálení vodíku a určit jeho konkrétní mechanismus. Tato přednáška obsahuje přehled událostí a mechanismů zapálení vodíku. Přednáška dále obsahuje popis hlavních parametrů zapálení, jako je MIE, a teplota samovznícení. V přednášce jsou podrobně popsány hlavní typy zdrojů zapálení a vysvětleny nejběžnější mechanismy zapálení vodíku. Zvláštní pozornost je věnována jevu samovznícení při náhlém úniku vodíku a faktorům, které jej ovlivňují. V této přednášce jsou také podrobně rozebrána opatření k prevenci možného zapálení vodíku a k regulaci zápalných zdrojů.

## Klíčová slova

Minimální zápalná energie (MIE), teplota samovznícení, zápalné zdroje, mechanismy zapálení, samovznícení, obrácený Jouleův-Thompsonův jev, difúzní zapálení

## Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova.....	3
<b>1. Cílové publikum.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Popis úlohy: Specialista.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Specialista.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Předchozí učení: Specialista.....</b>	<b>6</b>
2. Úvod a cíle.....	7
3. Zápalné zdroje.....	8
3.1 Zapálení elektrostatickým výbojem.....	9
3.1.1 Jiskra od izolovaného vodiče.....	10
3.1.2 Kartáčový výboj.....	11
3.1.3 Korónový výboj.....	12
3.2 Mechanické zapálení.....	13
3.3 Zapálení horkým povrchem.....	13
3.4 Adiabatické kompresní zapálení.....	14
4. Mechanismy zapálení vodíku.....	15
4.1 Zapálení a obrácený Joule-Thomsonův jev.....	16
4.2 Minimální zápalná energie (MIE).....	17
4.3 Triboelektřina.....	18
4.4 Teplota samovznícení.....	19
4.5 Difuzní zapálení.....	19
5. Samovolné vznícení náhlého úniku.....	19
5.1 Mechanismus difuzního zapálení.....	19
5.2 Fyzikální mechanismus.....	24
5.2.1 Okamžité roztržení.....	24
5.2.2 Vliv rychlosti otevírání ventilů.....	25
5.2.3 Přejít k trvalému požáru.....	26
5.2.4 Vliv oddělování plamene vírem.....	28
5.3 Samovolné vznícení v zařízení PRD tvaru T.....	30
5.3.1 Uspořádání experimentu.....	30
5.3.2 Vliv skladovacího tlaku.....	31
6. Prevence zapálení vodíku.....	36
6.1 Klasifikace zón s nebezpečím výbuchu.....	37

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

6.2	Prevence zapálení jiskrou elektrostatického výboje.....	38
6.3	Řízení tepelných a mechanických zdrojů zapálení .....	39
	Literatura a odkazy .....	41

## 1. Cílové publikum

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

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

### 1.1 Popis úlohy: Specialista

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

### 1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Specialista

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

### 1.3 Předchozí učení: Specialista

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

## 2. Úvod a cíle

Tato přednáška poskytne členům zásahových jednotek informace o možných zdrojích zapálení vodíku a souvisejících mechanismech, včetně difúzního mechanismu samovznícení při náhlém úniku vodíku. Obsahuje hlavní charakteristiky související se zapálením směsi vodíku s kyslíkem: minimální zápalnou energii, její závislost na koncentraci vodíku ve směsi, teplotu samovznícení a vliv triboelektriny. Tato přednáška dále obsahuje popis metod, které se používají k prevenci zapálení vodíku prostřednictvím pečlivého posouzení možností zapálení a odstranění jeho zdrojů.

V práci Astburyho a Hawkswortha [1] z roku 2007 je uvedena analýza statistiky případů zapálení vodíku a jsou popsány některé mechanismy, mezi něž patří vznik elektrostatického náboje, mechanické zapálení, obrácený Jouleův-Thomsonův jev, difúzní zapálení, náhlá adiabatická komprese a zapálení od horkého povrchu. Popis těchto mechanismů je uveden níže. Kromě toho je v této přednášce představena práce provedená v centru HySAFER (Ulsterská univerzita) o samovznícení při náhlém uvolnění vodíku. Dále přednáška obsahuje též preventivní opatření a popis postupů při řízení/regulaci zdrojů zapálení.

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

- rozpoznat různé typy zápalných zdrojů,
- určit mechanismy zapálení vodíku v závislosti na zápalném zdroji,
- popsat, proč je Jouleův-Thomsonův jev nepravděpodobným zdrojem zapálení vodíku,
- porovnat hodnoty minimální zápalné energie (MIE) a teploty samovznícení vodíku s hodnotami jiných obvyklých paliv,
- vysvětlit minimální zápalnou energii v závislosti na obsahu vodíku ve směsi,
- vysvětlit vliv triboelektriny na zapálení vodíku,
- posoudit fáze samovznícení při náhlém úniku vodíku,
- rozpoznat prostředky pro řízení zdrojů zapálení vodíku,
- zařadit elektrická zařízení do třídy dle Ex zóny,
- uvést hlavní preventivní opatření proti zapálení vodíku.

### 3. Zápalné zdroje

Přesné určení zdroje zapálení vodíku bývá obtížné vzhledem k jeho nízké minimální zápalné energii (MIE). Proto je často obtížné rozlišit, co přesně způsobuje zapálení vodíku a jaký byl mechanismus zapálení. Seznam možných zápalných zdrojů je uveden níže.

#### Elektrické zdroje:

- elektrické jiskry (např. z elektrických zařízení),
- elektrostatické výboje (např. v neuzemněných filtrech pevných částic),
- elektrický oblouk (spínače, elektromotory, přenosné telefony, pagery a rádia),
- výboje blesku (např. úder blesku v blízkosti ventilačního komína),
- elektrický náboj vznikající při provozu zařízení (kompresory, generátory, vozidla a další stavební zařízení),
- elektrické zkratky nebo jiná elektrická zařízení,
- elektrizované částice.

#### Mechanické zdroje:

- mechanické jiskry (z rychle se zavírajících ventilů),
- mechanický náraz nebo tření,
- zlomení kovu,
- mechanické vibrace a opakované ohýbání.

#### Tepelné zdroje:

- horké povrchy (např. topná zařízení),
- otevřený oheň,
- horké trysky,
- výfukové plyny (např. spalovací motory a výfukové komíny),
- výbušné nálože (např. nálože používané ve stavebnictví, ohňostroje nebo pyrotechnická zařízení),
- katalyzátory, výbušniny a reaktivní chemické materiály,
- rázové vlny nebo úlomky,
- odražené nebo opakované akustické a rázové vlny.

#### Další zdroje:

- ionizující záření (radioaktivita),



## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

- elektromagnetické záření,
- ultrazvukové záření,
- světlo (laserové/bleskové),
- adiabatická komprese (zvýšení tlaku).

Z analýzy, kterou provedli Astbury a Hawksworth [1], vyplývá, že jediný mechanismus není schopen vysvětlit všechny zaznamenané události. Souběžně může působit Dva nebo i více potenciálních mechanismů. Je známo, že MIE plynů a par klesá s rostoucí teplotou [2]. Rozpínající se vodík by zvyšoval svou teplotu v důsledku obráceného Jouleova-Thomsonova jevu (podrobně popsáno v části 3.1), a proto by se jeho zápalná energie snižovala. Podobně, pokud by proud unášel cizorodé částice, např. z abraze povrchu, který je ve styku s dráhou proudění, byla by energie potřebná k zapálení korónovým výbojem nižší, takže je pravděpodobné, že k zapálení vodíku by byl zapotřebí menší proud korónového výboje [3].

V několika případech se ve zprávách objevily náznaky, že příčinou zapálení vodíku mohl být elektrostatický jev. Jeden z případů se týkal pouze jemného proudu rtuti bez dalších potenciálních zápalných zdrojů uvnitř uzavřeného systému. Schopnost kapek a praskajících bublin vytvářet elektrostatický náboj předložil Blanchard [4] a schopnost náboje zapálit citlivou atmosféru ilustroval Pratt [5].

Je obecně uznávaným faktem, že čisté plyny se za normálních podmínek elektrostaticky nenabíjejí [3], ale to se obecně týká nízkých rychlostí a tlaků. Při uvolňování plynů za velmi vysokých tlaků se proudění stává zvukovým a jeho náchylnost k elektrostatickému nabíjení není známa. Je známo, že čisté plyny nemají tendenci se nabíjet, ale že částice v proudu plynu se elektrostaticky nabíjejí [3].

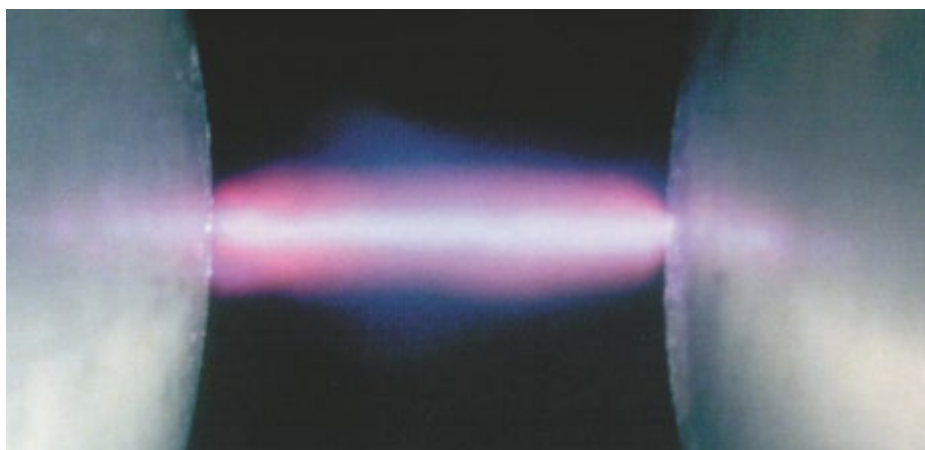
Dráha výboje by v mnoha praktických případech byla pravděpodobně spleť a nevedla by po přímce. Tato skutečnost by vyžadovala, aby se vodík vypouštěl přes ohyby, což by potenciálně umožnilo erozi materiálů na povrchu dráhy vypouštění, např. potrubí, a vytvoření částic, které by se mohly elektrostaticky nabít [3].

### 3.1 Zapálení elektrostatickým výbojem

Existují tři hlavní typy elektrostatického výboje: jiskrový, kartáčový a korónový [1]. *Jiskrovým výbojem* se rozumí jediný plazmový kanál mezi vysokonapěťovým a uzemněným vodičem. *Kartáčovým výbojem* se rozumí výboj mezi nabitým izolátorem a vodivým uzemněným bodem. *Korónovým výbojem* se rozumí tichý, obvykle kontinuální výboj obsahující proud, ale bez plazmového kanálu.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

## 3.1.1 Jiskra od izolovaného vodiče



Obrázek 1 Jiskra

Energie jiskrového výboje od izolovaného vodiče se vypočítá jako

$$E = CV^2/2 \quad (1)$$

kde  $C$  je kapacitance předmětu a  $V$  je potenciál (napětí). Například člověk má kapacitanci  $C$  přibližně 100 pF v závislosti na velikosti těla, ploše chodidel a konstrukci a tloušťce podrážky obuvi [1]. Vezmeme-li v úvahu typickou hodnotu MIE 0,29 mJ ( $E$ ) pro směsi uhlovodíků se vzduchem, například propan – vzduch, lze napětí potřebné k vytvoření jiskry o dostatečné energii pro zapálení atmosféry vypočítat takto:

$$V = \sqrt{\frac{2E}{C}} \quad (2)$$

Substitucí získáme  $V = 2\,408$  V. Dielektrická pevnost vzduchu činí přibližně 30 kV/cm. Mezera mezi nabitým vodičem a uzemněným bodem potřebná k průrazu by tedy byla přibližně  $2\,400/30 = 0,08$  cm (což odpovídá 0,8 mm neboli 800 mikrometrům).

Lidé zpravidla nedokáží pocítit elektrostatický výboj o síle menší než 1 mJ, takže by si ani nebyli vědomi možnosti zapálení směsi uhlovodíku se vzduchem [1]. Těleso, přes které přechází jiskra od člověka k zemi, mívá jen zřídka tvar elektrod s hrotem. Poloměr špičky prstu je obvykle přibližně 6 mm. Proto se špička prstu blíží rovnému uzemněnému kovovému povrchu, i když má mezeru 800 mikrometrů. Kolem místa, kterým prochází jiskra, by vznikla velká a takřka rovná plocha. Ta by měla tendenci utlumit případné zapálení. O tomto jevu, kdy jiskra nezapálí hořlavou směs mezi dvěma rovnoběžnými deskami, pojednává Metzler [6] v souvislosti s předpovědí MIE. Zhášení plamenů paralelními povrchy v těsné blízkosti zkoumal také Potter [7], který zjistil, že uhlovodíky mají zhášecí vzdálenost 2–3 mm.

Teoreticky by se tedy při takto „nizkém“ napětí 2 400 V neměl z plazmového kanálu jiskry šířit zdroj zapálení. Při průrazné síle 30 kV/cm a mezeře 2 mm, která by právě umožnila šíření plamene ve směsi uhlovodíku se vzduchem, by bylo pro vznik jiskry nutné napětí 6 kV [1].

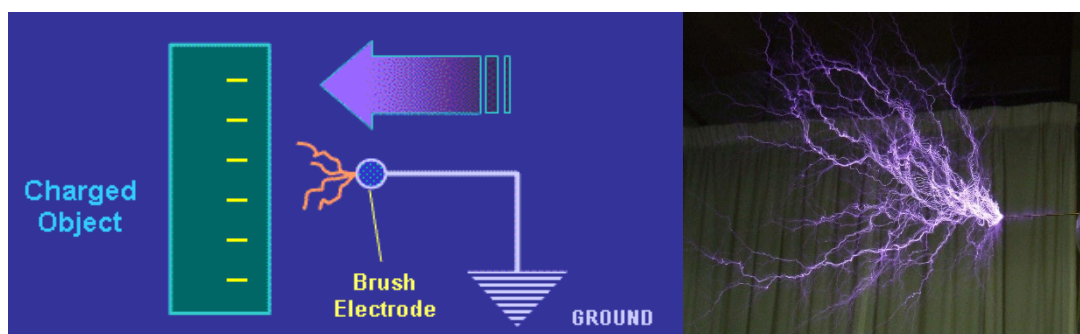
## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

Pokud nyní zvážíme vodík, jsou příslušné hodnoty napětí a mezery ve srovnání s uhlovodíky mnohem menší [1]. Dielektrická pevnost vodíkové atmosféry je pouze 17,5 kV/cm [8] a její zhašecí mezera činí pouhých 0,64 mm [9]. Změna dielektrické pevnosti v závislosti na koncentraci vodíku ve směsi se vzduchem není známa, ale v jednoduchém případě by se dalo předpokládat, že v určitém úzkém koncentračním rozsahu je lineární, takže teoretická dielektrická pevnost přibližně stechiometrické směsi 30 % obj. vodíku ve vzduchu by byla  $(0,3 \times 17,5 + 0,7 \times 30) = 26,25$  kV. Při zhašecí mezeře 0,64 mm a dielektrické pevnosti 26,25 kV/cm by průrazné napětí odpovídalo hodnotě  $26,25 \times 0,064 = 1,68$  kV, což odpovídá uložené energii  $0,5 \times [100 \times 10^{-12}] \times [1,68 \times 10^3]^2 = 1,41 \times 10^{-4}$  J, tj. 0,141 mJ. Tato energie je více než dostatečná k zapálení stechiometrické směsi vodíku se vzduchem, jejíž zapálení vyžaduje energii pouhých 0,017 mJ [3].

Ačkoli tedy elektrostatický náboj osob, které u čerpací stanice do svého vozidla doplňují benzín, vede jen zřídka k jeho zapálení, je důležité, že napětí potřebné pro zapálení vodíku je nižší než **2 kV**. Toto napětí může snadno vzniknout na člověku, který stojí na izolačním povrchu, aniž by si toho byl vědom, takže existuje možnost, že například personál velmi snadno zapálí únik vodíku, aniž by byl přítomen zjevný zdroj zapálení [1].

### 3.1.2 Kartáčový výboj

Kartáčový výboj se vyznačuje mnoha jednotlivými plazmovými kanály, které se spojují ve vodiči.



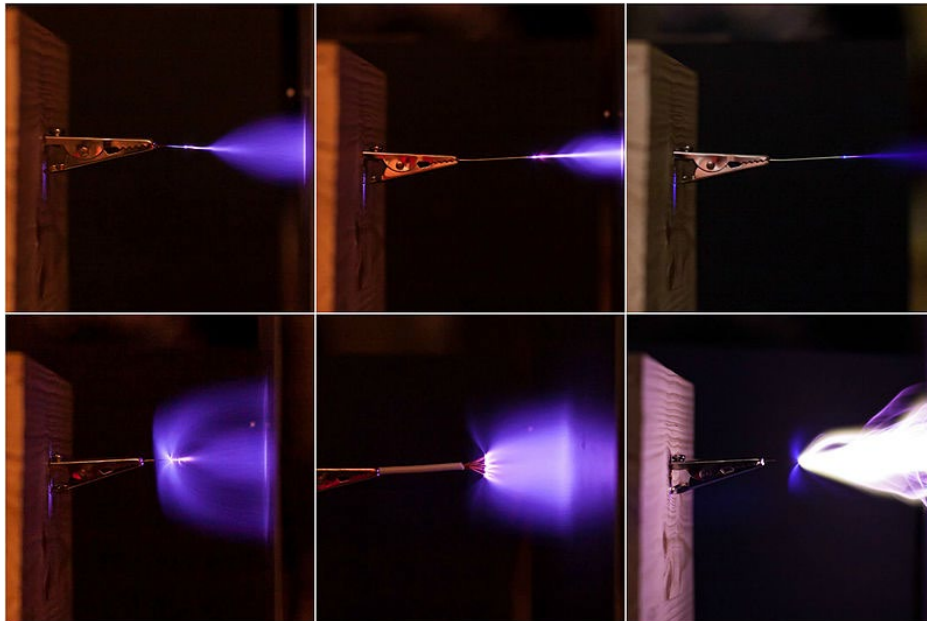
Obrázek 2 Schéma kartáčového výboje [obrázky Google]

Kartáčový výboj je uveden na obrázku 2. Protože nabitý povrch je nevodič, nelze určit jeho kapacitanci, a tudíž ani stanovit energii. V práci, kterou zveřejnili Gibson a Harper [10], byl zaveden pojem „zápalnost“ neboli ekvivalentní energie, což znamená, že pokud má kartáčový výboj schopnost zapálit atmosféru se stejnou minimální zápalnou energií jako jiskra, právě zapálí hořlavou atmosféru. Bylo zjištěno, že typická ekvivalentní energie pro kartáčové výboje z plochých polyethylenových desek činí přibližně 4 mJ. Ackroyd a Newton [11] však zjistili, že některé modernější plasty a tenké plastové povlaky na uzemněném kovu mají vyšší ekvivalentní energii.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

## 3.1.3 Korónový výboj

Korónový výboj je elektrický výboj způsobený ionizací tekutiny, například vzduchu, která obklopuje vodič s vysokým napětím. Představuje místní oblast, kde vzduch (nebo jiná tekutina) prošel elektrickým rozkladem a stal se vodivým, což umožňuje průběžné uvolňování náboje z vodiče do vzduchu. Koróna vzniká v místech, kde intenzita elektrického pole (gradient potenciálu) v okolí vodiče převyšuje dielektrickou pevnost vzduchu. Často se projevuje jako namodralá záře ve vzduchu v blízkosti špičatých kovových vodičů vedoucích vysoké napětí a vyzářuje světlo stejným způsobem jako plynová výbojka. Schéma různých forem korónového výboje z různých kovových předmětů je uvedeno na obrázku 3.



Obrázek 3 Různé formy korónového výboje z různých kovových předmětů [pojem „Corona discharge“ – Wikipedia].

Korónový výboj může zapálit směs vodíku se vzduchem, aniž by došlo ke vzniku jediné jiskry nebo jedinému výboji [1]. Napětí potřebné pro vznik koróny závisí na poloměru hrotu [12]. Cross a Jean [13] uvádějí rovnici pro určení napětí potřebného k tomu, aby koróna vycházela z daného bodu s daným poloměrem hrotu. Dříve se zapálení vodíku, který je záměrně vypouštěn do atmosféry, předcházelo použitím leštěného toroidního kroužku na konci ventilačního otvoru. Ten zajišťoval, aby účinný průměr hrotu byl co největší. V praxi jsou korozní usazeniny a nečistoty na těchto kroužcích ve skutečnosti výstupky s malým poloměrem, takže cokoli, co ovlivňuje leštěný povrch, může vytvářet výstupky s malým poloměrem, které budou mít na případný výboj stále vliv [1]. Studie provedené před mnoha lety na uvolněném vodíku ukázaly, že zapálení je vzácné za hezkého počasí, ale častější je za bouřky, krupobití, sněžení a za chladných, mrazivých nocí [1].

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

### 3.2 Mechanické zapálení

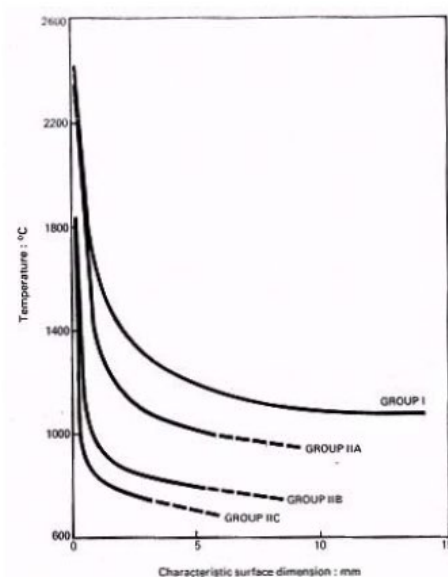
Mezi klíčové vlastnosti hořících kovových částic nebo jisker, které jsou důležité pro svoji schopnost způsobit zapálení hořlavé směsi, se řadí:

- velikost,
- materiál,
- rychlost,
- teplota,
- počet,
- rychlost a doba spalování.

Pro vznik jiskry při nárazu, tření nebo broušení jsou stanoveny prahový tlak a relativní rychlost styku mezi dvěma kovy. Nad touto prahovou hodnotou dochází k oddělování kovových částic ze slabšího z obou materiálů. Obecně platí, že částice vznikají pouze v případě, kdy relativní rychlost mezi oběma povrchy přesáhne 1 m/s [12].

### 3.3 Zapálení horkým povrchem

Tento jev je běžný pro většinu hořlavých směsí plynu a páry se vzduchem, protože okolí poskytuje dostatečně vysokou teplotu a teplo hoření se neodvádí okolními povrchy, což umožňuje průběh oxidační řetězové reakce [3]. Jedná se o obvyklou metodu stanovení teplot samovznícení, přičemž získaná hodnota závisí na použitém přístroji. Je známo, že čím vyšší je teplota, tím kratší je doba zpoždění zapálení. Nejnižší teploty zapálení jsou spojeny s velkými objemy a plochami [12]. Teplota zapálení od horkého povrchu závisí na charakteristické velikosti horkého povrchu. Jak je znázorněno na obrázku 4, vodík je reprezentován křivkou označenou jako „skupina IIC“.



Obrázek 4. Teplota zapálení od horkého povrchu v závislosti na charakteristické velikosti horkého povrchu [12].

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

Bulewicz *akol.* [14] prokázali, že na zapálení má vliv poloha horké plotny a způsob ohřevu. Autoři použili metodu pomalého zahřívání, při níž byla důležitá volná konvekce a projevila se časová prodleva mezi expozicí a zapálením v závislosti na rychlosti růstu teploty. Na zpoždění měla vliv také orientace ohřívací plochy, kdy bylo zpoždění delší, když ohřívána plocha směřovala dolů, než když ohřívána plocha směřovala nahoru. Ungut a James [15] také uvedli, že povrchy umístěné v horní části uzavřeného prostoru mají delší indukční časy. Katalytický povrch (např. Pt, platina) má zásadní vliv na zápalnou teplotu: k zapálení dochází již při teplotách 70 °C (pamatujte, že standardní teplota samovznícení je 510 °C) [12].

### 3.4 Adiabatické kompresní zapálení

U ideálního plynu by se při jeho stlačování při konstantní entropii zvýšil tlak v důsledku stlačování podle vztahu  $PV^\gamma = konst.$  Pomocí stavové rovnice pro ideální plyn lze ukázat, že platí i následující vztah  $TV^{\gamma-1} = konst.$  Například pro kompresní poměr  $V_1/V_2 = 28$  při počáteční teplotě 293,15 K ( $\gamma = 1,39$ ) by tento teoretický vztah zvýšil teplotu na  $T_2 = T_1(V_1/V_2)^{\gamma-1} = 1\,075,2$  K, tj. nárůst teploty o 782 K. V experimentech, které provedli Pan a kol., [16] byla naměřená teplota realizovaná při 28násobném kompresním poměru pouze 149 K. Na základě toho Astbury a Hawksworth [1] dospěli k závěru, že izentropická komprese se v praxi pravděpodobně nevyskytuje. Práce Caina [17] však ukazuje, že ke kompresnímu zapálení směsí vodíku, kyslíku a hélia dochází při relativně konstantní teplotě 1 050 K, při poměru zvýšení tlaku 35–70, počínaje 300 K při atmosférickém tlaku. Opačný výpočet ukazuje, že zvýšení teploty z 300 na 1 050 K by vyžadovalo poměr zvýšení tlaku  $P_2/P_1 = (T_1/T_2)^{\gamma/(\gamma-1)} = (1\,050/300)^{1,39/0,39} = 86,9$ . Mechanismus adiabatické komprese tedy vyžaduje větší poměr zvýšení tlaku, než jaký naměřil Cain [17], což naznačuje, že je přítomen jiný mechanismus zapálení [1].

## 4. Mechanismy zapálení vodíku

V roce 2007 Astbury a Hawksworth zveřejnili článek, ve kterém analyzovali statistiky případů zapálení vodíku a související mechanismy [1]. Autoři zjistili, že se objevily zprávy o úniku vysokotlakého vodíku, který se zapálil bez zjevných příčin, a bylo navrženo několik mechanismů zapálení. Bylo zdůrazněno, že ačkoli došlo ke zapálení mnoha úniků, jsou hlášeny i úniky, u nichž k zapálení nedošlo. V případech, kdy došlo k zapálení bez zjevných zdrojů zapálení, jsou navrhované mechanismy spíše spekulativní a chybí jim hlubší vědecká analýza. Tato práce odhalila nedostatky ve znalostech přesného mechanismu zapálení unikajícího vodíku. Mezi mechanismy, kterými se zabývali Astbury a Hawksworth [1], patří vytváření elektrostatického náboje, mechanické zapálení, obrácený Jouleův-Thompsonův jev, difuzní zapálení, náhlá adiabatická komprese a zapálení od horké povrchové plochy. Těmito mechanismy se budeme zabývat níže v této přednášce.

Astbury a Hawksworth [1] odhalili analýzou databáze závažných nebezpečných událostí (Major Hazard Incident Database Service of the Health and Safety Executive)<sup>1</sup> (Velká Británie) 81 událostí, při nichž došlo k úniku vodíku. Z tohoto počtu byla prodleva mezi uvolněním a zapálením hlášena pouze ve 4 případech. Autoři předpokládali, že v ostatních případech došlo k okamžitému zapálení vodíku. V 11 případech byl zdroj zapálení identifikován, ale ve zbývajících případech, tj. v 86,3 % událostí, nebyl zdroj zapálení zřejmý. Co se týče úniků jiných látek než vodíku, 1,5 % z nich se nezapálilo a 65,5 % zdrojů zapálení nebylo možno identifikovat. To potvrzuje domněnku, že existuje rozdíl ve sklonech k zapálení mezi vodíkovými a nevodíkovými plyny při jejich uvolnění. Astbury a Hawksworth [1] se zabývali mimo jiné následujícími haváriemi/nehodami. V práci, kterou provedl Nusselt v Německu, bylo zaznamenáno několik případů samovznícení vodíku při tlaku 2,1 MPa vypouštěného do atmosféry. Bylo zjištěno, že skladovací lahve obsahují množství oxidu železitého (tj. rzi), ačkoli byly zjevně suché, a nejprve se předpokládalo, že by zde mohl vzniknout elektrostatický náboj. Pokusy s vypouštěním vodíku do otevřené nálevky opatřené dlouhou trubkou však neprokázaly žádné zapálení, s výjimkou případů, kdy byla nálevka zakryta železným uzávěrem. Mechanismus však zůstal nepochopen, a proto následovaly další zkoušky. Pouze při zkouškách prováděných ve tmě byly pozorován koronový výboj. Když z příruby unikl vodík a na potrubí se poklepalo, aby se rozvířil prach, zvýšil se koronový výboj. Po poklepání došlo k zapálení. Další práce ukázaly, že při použití naostřených měděných drátů k podpoře koronových výbojů docházelo k zapálení, když byl hrot namířen proti směru proudění plynu, zatímco při použití drátu ve směru proudění k zapálení nedošlo [1].

---

<sup>1</sup> V této databázi nejsou zaznamenány úniky vodíku, které se pouze rozptýlily a nevedly k požáru, výbuchu nebo jinému závažnému nebezpečí. Skutečnost, že na stránkách je uvedeno nulové množství nezapáleného vodíku, tedy nemusí nutně znamenat, že u všech úniků došlo k zapálení vodíku.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

Další událost, o které informovali Astbury a Hawksworth [1], se týká připojení lahve s vodíkem k laboratornímu přístroji. Laboratorní technik otevřel ventil násilím (ventil praskl), aby z přípojky odstranil nečistoty, a když tak učinil, unikající plyn se okamžitě zapálil. Bond [18] v roce 1991 přisoudil toto zapálení jevu *difuzního zapálení*. Ačkoli v tomto případě není uveden tlak plynu, lze předpokládat, že se jednalo o typický tlak v plné tlakové láhvi 23 MPa. Reider a kol [19] testovali uvolnění velkého množství vodíku s cílem stanovit hladiny akustického tlaku. Plynný vodík byl uvolňován pod počátečním tlakem 23,6 MPa a počáteční rychlostí 54,4 kg/s po dobu 10 s. Plyn byl přiváděn potrubím s jmenovitým průměrem 200 mm a kulovým ventilem s průměrem 150 mm do válcové nádoby vybavené konvergentně-divergentní tryskou s odvodem do atmosféry. Při zkušebním provozu, kdy plyn záměrně nebyl zapálen, byl po dobu 10 s zavřený ventil s průměrem 150 mm a 3 s po zahájení zavírání ventilu došlo k zapálení. Zkoumaly se tři možné mechanismy zapálení: elektrifikace plynu, elektrifikace částic v plynu a obrušování kovových částic o kovovou tyč přivařenou přes ústí trysky. První z nich byla vyloučena, protože je známo, že čisté plyny mívají zanedbatelný elektrostatický náboj. Uvažovalo se o druhém mechanismu, ale systém byl před testem důkladně vyčištěn a vyfoukán. Přesto byla rychlost vypouštění plynu 1 216 m/s během běhu mnohem vyšší než dříve, takže tento potenciální mechanismus nebylo možné zcela vyloučit. Třetí mechanismus byl považován za možný, protože rychlost vypouštění byla vysoká, což mohlo vést k uvolnění částic a jejich dopadu na tyč. S tímto mechanismem je třeba rovněž počítat. Po zapálení však bylo zjištěno, že tyč byla na jednom konci uvolněná, což mohlo představovat možný zdroj zapálení, který nebyl předpokládán. Kromě toho „neočekávané“ samovznícení vodíkového úniku při rozsáhlých experimentech zaznamenali také Chaineaux a kol. (1991) [20], Groethe a kol. (2005) [21].

### 4.1 Zapálení a obrácený Joule-Thomsonův jev

Náhlé uvolnění mnoha plynů, jako jsou metan, propan a dusík, vede ke snížení teploty. U vodíku naopak teplota roste, když se vodík rozpíná při konstantní entalpii do okolí, což je způsobeno tím, že vodík má Joule-Thomsonovu inverzní teplotu. Pokud je teplota vyšší než Joule-Thomsonova inverzní teplota, stává se Joule-Thomsonův koeficient záporným a izoentaltická expanze plynu vede k oteplování namísto ochlazování. Některé literární zdroje uvádějí, že vodík je proto náchylnější k zapálení po náhlém uvolnění z tlakové nádoby. Astbury a Hawksworth [1] však Joule-Thomsonův jev jako možný mechanismus zapálení v uvažovaných experimentech nezohlednili. K tomuto závěru dospěli na základě údajů Michelse a kol. [22], podle nichž Joule-Thomsonův koeficient pro vodík, odhadnutý pro expanzi z tlaku 250 MPa a počáteční teploty 150 °C na 100 MPa, nepřesahuje 0,53 K. Zapálení tímto mechanismem je tedy při hodnotách tlaku, které se vyskytují ve většině výše uvedených událostí, velmi nepravděpodobné.

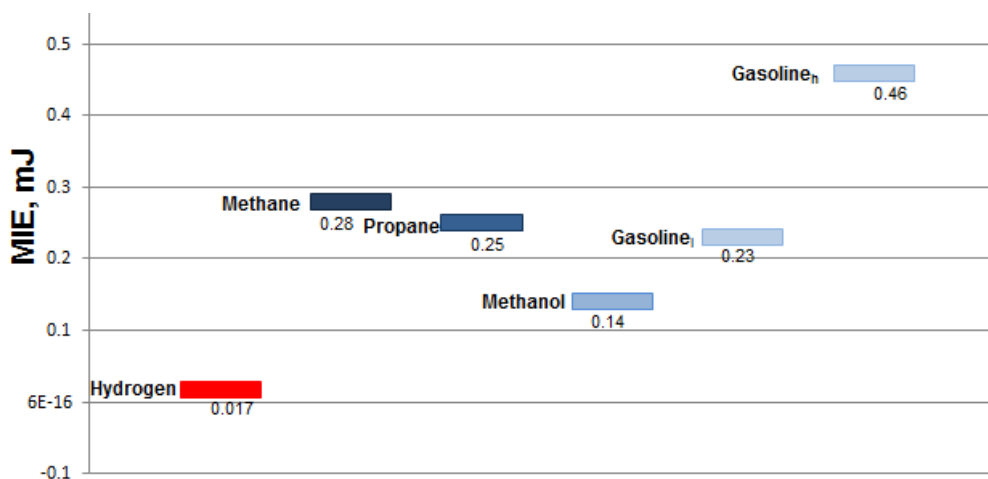


## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

## 4.2 Minimální zápalná energie (MIE)

Minimální zápalná energie (MIE) hořlavých plynů a par je minimální hodnota elektrické energie uložené ve výbojovém okruhu s co nejmenšími ztrátami ve vodičích, která (při výboji přes jiskřiště) právě zapálí klidovou směs v nejzápalnějším složení. Slabá jiskra způsobená výbojem statické elektřiny z lidského těla může plně dostačovat k zapálení některého z paliv [3]. Pro dané složení směsi je třeba změnit následující parametry výbojového obvodu, aby se dosáhlo optimálních podmínek: kapacitu, indukčnost, napětí náboje, tvar a rozměry elektrod a vzdálenost mezi elektrodami [12]. Kromě složení směsi závisí MIE i na dalších faktorech, jako jsou počáteční tlak a teplota. Vzhledem k tomu, že většina zdrojů zapálení generuje více než 10 mJ, prakticky všechna běžná paliva by se ve směsi se vzduchem vznítla, pokud by jejich koncentrace překročila dolní mez hořlavosti (LFL). Zdroje zapálení schopné vytvářet rázy, například vysokoenergetické jiskrové výboje a vysoce účinné výbušniny, mohou přímo vyvolat detonaci.

Jak ukazuje [obrázek 5](#), ve srovnání s ostatními palivy má vodík nejnižší MIE, která činí 0,017 mJ pro směs vodíku se vzduchem, resp. 0,0012 mJ pro směs vodíku s kyslíkem. (Viz přednášku „Vlastnosti vodíku z hlediska bezpečnosti“.) Jak již bylo zmíněno, MIE je funkcí koncentrace vodíku v hořlavé směsi (buď se vzduchem, nebo s jiným oxidantem). Pro danou hořlavou směs a typ zapálení existuje minimální energie, která závisí na koncentraci, pod níž nedojde ke zapálení. Na hranici hořlavosti se MIE stává nekonečnou ([obrázek 6](#)). V rozsahu hořlavosti směsí vodíku se vzduchem se zápalná energie liší takřka o tři řády.

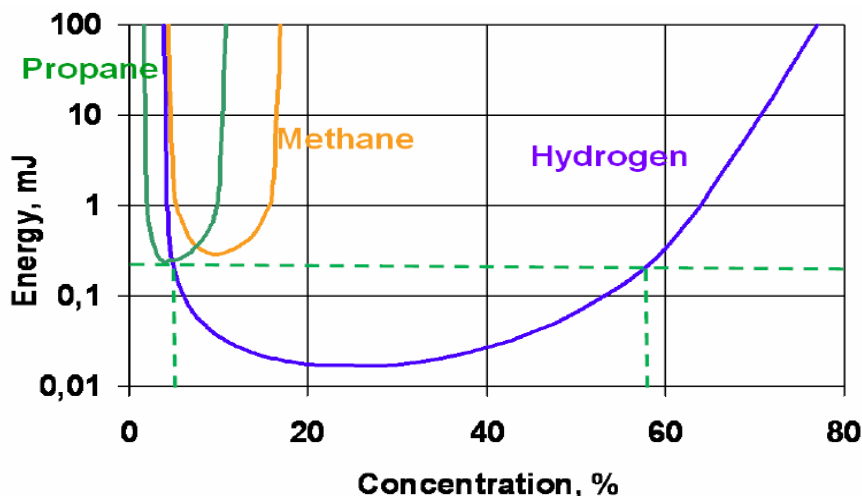


Obrázek 5. Hodnoty MIE vodíku a ostatních paliv.

Jak je znázorněno na [obrázku 6](#), zdroj se zápalnou energií 0,24 mJ nezapálí metan ani propan, ale zapálí směs vodíku se vzduchem v rozmezí koncentrací vodíku 6,5–58 % obj. Zdroj s energií 1 mJ zapálí směs vodíku se vzduchem s koncentrací vodíku 6–64 % obj. Všimněte si, že na hranici hořlavosti je zápalná energie u tří paliv do jisté míry podobná. Její hodnota je v porovnání s MIE poměrně vysoká a tuto úroveň energie by bylo schopno poskytnout mnoho

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

zápalných zdrojů. K zapálení směsi, která se blíží stechiometrickému složení, je zapotřebí méně energie.



Obrázek 6. Závislost zápalné energie na koncentraci paliva (vodíku, propanu nebo metanu) ve vzduchu [23].

Energie uložená jako statická elektřina na předmětu se mění v závislosti na jeho velikosti a kapacitní impedanci, tj. napětí, na které je nabit, a dielektrické konstantě okolního prostředí [3]. Pro modelování účinku statického výboje je člověk zvažován jako kondenzátor o velikosti 100 pikofaradů (pF), nabitý na napětí 4 000 až 35 000 V. Celková energie se pohybuje v řádu milijoulů (mJ). Větší předměty uchovávají více energie. Tato energie se obvykle vybije za méně než jednu mikrosekundu a je dostatečná k zapálení nejen takřka stechiometrických směsí, ale i směsí blízkých mezím hořlavosti. Některé izolační materiály, jako jsou dřevo, papír a některé tkaniny, obvykle vytvářejí vodivou vrstvu, která může zabránit hromadění statické elektřiny tím, že absorbuje vodu ze vzduchu v prostředí, kde je relativní vlhkost vyšší než 50 % [24].

### 4.3 Triboelektřina

Vodík je elektrický izolant v plynné i kapalně fázi. Proudění nebo míchání plynného či kapalného vodíku může vytvářet náboje statické elektřiny podobně jako u všech nevodivých kapalin nebo plynů. Z tohoto důvodu musí být všechna zařízení pro přepravu vodíku důsledně uzemněna. Teprve nad určitým kritickým „průrazným“ napětím, kdy dochází k ionizaci, se stává elektrickým vodičem [25]. Pokud proudění vodíku vysokou rychlostí doprovází uvolňování tlaku z vysokotlaké nádoby, může být tato vlastnost potenciálně zodpovědná za vznik elektrostatického náboje v částicích potrubí v důsledku triboelektřiny, což je druh kontaktní elektrifikace, při níž se určité materiály elektricky nabíjejí poté, co se dostanou do styku s jiným, odlišným materiálem a následně se od sebe opět oddělí [3]. Pravděpodobnost zapálení vodíku tímto mechanismem se zvyšuje s rostoucí se dobou uvolňování vodíku (tj. dobou potřebnou k vyprázdnění zásobníku) při shodných ostatních podmínkách.

#### 4.4 Teplota samovznícení

Teplota samovznícení je minimální teplota potřebná k zahájení spalovací reakce směsi paliva s kyslíkem bez přítomnosti vnějšího zdroje zapálení [3]. Standardní teplota samovznícení vodíku ve vzduchu je vyšší než 510 °C [25]. V porovnání s uhlovodíky s dlouhými molekulami je poměrně vysoká. Tuto teplotu samovznícení však lze snížit pomocí katalytických povrchů, jako je platina. Předměty o teplotě 500–580 °C mohou za atmosférického tlaku zapálit směsi vodíku se vzduchem nebo vodíku s kyslíkem. Vznícení mohou způsobit i podstatně chladnější předměty o teplotě přibližně 320 °C při delším kontaktu za nižšího než atmosférického tlaku [26]. Teplota vznícení proudu horkého vzduchu činí 670 °C [27].

#### 4.5 Difuzní zapálení

Fenomén difuzního zapálení vypočítali Wolanski a Wojcicki [28], kteří prokázali, že ke zapálení dochází, když se vysokotlaký vodík dostane do rázové trubice naplněné vzduchem nebo kyslíkem. Zjistili, že v takovém případě může k zapálení dojít, i když je teplota nižší než teplota samovznícení vodíku. Wolanski a Wojcicki také [28] vypočítali, že plyn složený z vodíku a dusíku (směs 3 : 1) by se ve vzduchu zapálil, pokud by rázová vlna překročila Machovo číslo 2,8násobně při teplotě 575 K. Rázová vlna by v takovém případě byla vyvolána tlakem 3,9 MPa proti směru proudění. Vypočítali také, že k zapálení dojde při nižším násobku Machova čísla, pouze 1,7, což odpovídá tlaku 1,3 MPa, když se rázová vlna odrazí od překážky. V práci Wolanského a Wojcického [28] není uvedeno, zda byla teplota samovznícení měřena při očekávaném konečném tlaku v rázové trubici, nebo při atmosférickém tlaku. Přestože při jejich pokusech s rázovou trubicí došlo k zapálení, počáteční teplota byla poměrně vysoká, 575 K (302 °C), a k dosažení jejich teploty samovznícení vodíku bylo třeba zvýšit teplotu pouze o 110 K. To znamená, že je zapotřebí dalšího výzkumu tohoto mechanismu. Astbury a Hawksworth [1] navrhli, že difuzní mechanismus zapálení je pravděpodobný pouze v případě vysoké počáteční teploty. Dále však uvádějí, že když se ventily láhve krátce otevřely přímo do atmosféry, pravděpodobně aby se z láhve odstranily případné nečistoty, došlo k zapálení. Zdá se, že efekt difuzního zapálení je reprodukovatelný v rázových trubicích nebo podobných uzavřených zařízeních. Wolanski a Wojcicki [28] tedy prováděli práci zřejmě pouze se směsí vodíku a dusíku. Od roku 2007 bylo provedeno více experimentálních a numerických prací týkajících se mechanismu difúze. Ty jsou částečně uvedeny v kapitole 4.

## 5. Samovolné vznícení náhlého úniku

### 5.1 Mechanismus difuzního zapálení

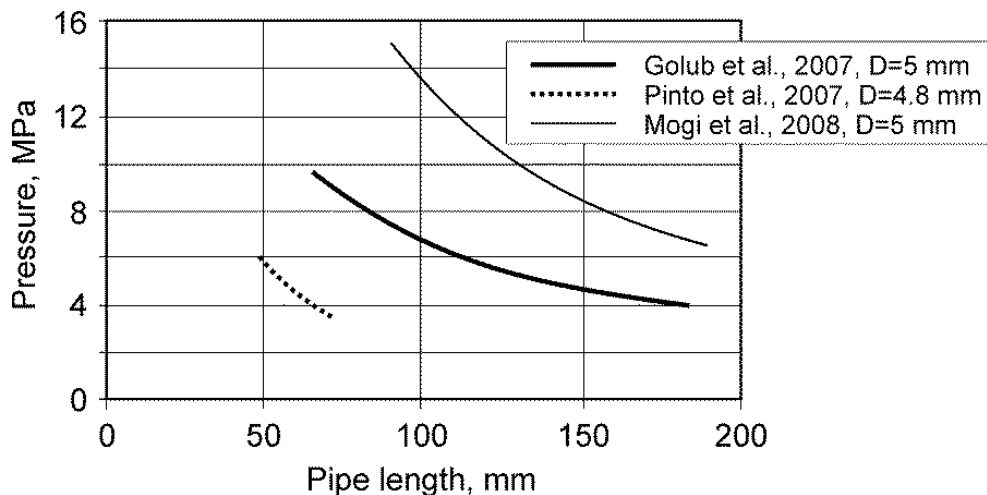
V posledních desetiletích bylo provedeno mnoho pokusů o vysvětlení samovolného vznícení náhle uvolněného vodíku, počínaje průkopnickou studií Wolanského a Wojcického [28] o takzvaném „mechanismu difuzního zapálení“, jak je popsáno v kapitole 3.5. Experimentální

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

data poskytla kritické podmínky tohoto jevu. Bohužel však nemohou poskytnout podrobný náhled do dynamiky procesu. Například přesnou polohu počátečních míst zapálení a průběh chemické reakce v potrubí za průřezným kotoučem nebo ventilem za vysokého tlaku lze sotva experimentálně stanovit [3].

Panuje shoda v názoru, že pravděpodobnost samovznícení vodíku při náhlém uvolnění z vysokotlakého zařízení je poměrně vysoká, pokud nejsou zavedena zmírňující opatření. V předpisech a normách však nejsou uvedeny žádné informace o problematice samovznícení nebo o konkrétním technickém řešení, které by mu předešlo nebo ho podpořilo, pokud jde o potrubí, skladování a používání vysokotlakých systémů se stlačeným vodíkem [3]. Regulace samovznícení při uvolňování vysokotlakého vodíku je jednou z výzev v oblasti vodíkové bezpečnosti, pro kterou existuje jen málo základních vysvětlení.

Experimentální důkaz samovznícení difuzním mechanismem při únicích z vysokotlakého zařízení do atmosféry přes potrubí získali v „řízeném laboratorním prostředí“ Dryer a kol. [29], Golub a kol. [30, 31], Pinto a kol. [32] a Mogi a kol. [33]. Při těchto pokusech byl vodík za zvýšeného tlaku oddělen od vzduchu v potrubí za atmosférického tlaku pomocí plochého průřezného disku. Pro usnadnění samovznícení byly za průřezným diskem umístěny různé prodlužovací trubice a nástavce. Obrázek 7 znázorňuje kritické podmínky pro experimentálně potvrzené samovznícení, ke kterým dospěly výše uvedené výzkumné skupiny. Údaje Dryera a kol. [29] nejsou na obrázku 7 uvedeny kvůli komplikované vnitřní geometrii armatur a použitému průřeznému disku, který snižuje minimální tlak potřebný pro samovznícení na 2,04 MPa. Ačkoli jsou údaje o samovznícení uvolňovaných látek přes skutečné armatury velmi užitečné pro technologii vodíkové bezpečnosti, vnitřní konfigurace armatur ponechává řadu nejistot při formulaci numerických experimentů a znemožňuje přímé porovnání s experimentálními výsledky jiných skupin. Experimentální výsledky odpovídají obecnému trendu poklesu kritického (mezního) tlaku s rostoucí délkou potrubí. Kritické podmínky samovznícení se však značně liší v důsledku rozdílných uspořádání testů. Citlivost samovznícení na různé dosud ne zcela objasněné faktory klade řadu otázek, které je teprve třeba najít odpovědi.



## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

Obrázek 7. Zápalný tlak vodíku v závislosti na délce potrubí při sérii zkoušek s plochými průřeznými disky [3].

Obrázek 7 ukazuje zásadní rozdíl v kritických podmínkách pro samovznícení získaných v různých studiích. Je vidět, že například při skladovaného vodíku 6 MPa v experimentech, které provedli Pinto a kol., [32] postačuje k samovznícení délka potrubí pouhých 50 mm. Při shodném skladovacím tlaku a prakticky stejném vnitřním průměru je délka kanálu postačující k samovznícení v experimentech, které provedli Golub a kol. [30, 31], 110 mm a v testech Mogiho a kol. [33] se minimální délka prodlužuje čtyřikrát na 200 mm. Jak lze tyto rozdíly vysvětlit?

Především, Golub a kol. [30, 31] zaznamenali počátek samovznícení sledováním šíření rázu a umístění záření z chemické reakce uvnitř potrubí. Proto kritické podmínky pro samovznícení v jejich experimentech představují vzdálenost od průřezného disku k místu, kde bylo vznícení zachyceno radiačním měřidlem. Mogi a kol. [33] posuzovali výskyt samovznícení na základě optického pozorování oblasti v blízkosti výstupu z potrubí do atmosféry. Ukázalo se, že v některých pokusech sice došlo k samovznícení, ale hoření bylo vyfouknuto prouděním. Pro takové úniky bohužel nebyly hlášeny žádné kritické stavy. Tato skutečnost nicméně potvrzuje, že ne všechny samovolně vznícené úniky přecházejí v trvalé tryskové požáry. To je jeden z pravděpodobných důvodů posunu kritické křivky v experimentech Mogiho a kol. [33] ve srovnání s experimenty Goluba a kol. [30, 31]. Nejpravděpodobnější důvod, který vysvětluje posun údajů Mogiho a kol. k vyšším tlakům při stejné délce potrubí, byl však naznačen v dokumentu [3]. V experimentech Mogiho a kol. [33] byl vnitřní povrch trubky mezi membránou (průřezným diskem) a výstupem do atmosféry omýván vodným roztokem  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (v koncentraci 1 %), aby bylo možné plamen zviditelnit reakcí sodíku. Toto řešení mohlo narušit proudění v hraniční vrstvě a chemii spalování vodíku a odčerpát část tepla z procesu. Při stejném počátečním tlaku se tedy proces odehrál ve vzdálenější části podél potrubí.

Experimentální postup, který použili Pinto a kol., [32] byl odlišný, protože vodík byl pomocí pístu ve spojení s rázovou trubicou stlačen na tlak těsně před protržením disku. Do vysokotlakého úseku rázové trubky před pístem byl vstříkovan plynný dusík, který píst tlačil směrem k plynnému vodíku, aby se vytvořil vysoký tlak vodíku, který disk protrhne. Tato komprese zjevně způsobila zahřátí vodíku ve vysokotlaké komoře a k uvolnění nedošlo při teplotě okolí, nýbrž při teplotě o něco vyšší. Protože však nejsou k dispozici ani měření teploty ve vysokotlaké komoře, ani informace o době, po kterou byl vodík stlačován, je obtížné přesně odhadnout počáteční teplotu vodíku.

Výsledky experimentů, které provedli Pinto a kol., [32] jsou plně v souladu s výsledky Baženové a kol. [34], kteří uvedli, že zvýšení počáteční teploty vodíku podporuje samovznícení, které nastává dříve a za nižšího počátečního tlaku. Vyšší počáteční teplota vodíku je nejpravděpodobnějším důvodem, proč k samovznícení vodíku v experimentech, které provedli Pinto a kol. [32]. při daném tlaku stačila kratší trubice v porovnání s experimenty Goluba a kol. [30, 31] a Mogiho a kol. [33].

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

Způsob, jakým se průtržný disk roztrhne, je pravděpodobně nejdůležitějším faktorem pro samovznícení, protože ovlivňuje mísení vodíku se vzduchem [29]. V experimentech, o kterých pojednávali Golub a kol., [30, 31] byly průtržné disky nařízány ve tvaru kříže, aby se usnadnilo ostré otevření „lístku“ při předem stanoveném tlaku, zatímco v experimentech jiných autorů bylo pozorováno širší stochastické rozložení tlaku při roztržení průtržného disku. Stochastická povaha protržení disku vyrobeného ve vlastní režii způsobuje změny ve struktuře a síle vytvořené rázové vlny, a to i za konstantního tlaku při protržení, a samozřejmě může ovlivnit opakovatelnost experimentálních údajů. Velmi dobrou opakovatelnost experimentů uvádějí Golub a kol. [30, 31] jak v naměřeném tlaku za vytvořenou rázovou vlnou, tak v minimálním počátečním tlaku, který by zajistil samovolné vznícení při pevné délce trubky.

Pinto a kol. [32] porovnávali výsledky hladkých a závitových trubek. Bylo zjištěno, že stejný počáteční tlak, který způsobí samovolné vznícení v hladké trubce, nezpůsobí samovolné vznícení v případě závitové trubky. Toto pozorování je však v rozporu s názorem Dryera a kol. [29], kteří zjistili, že při pokusech s několika spojenými trubkami došlo ke vznícení, zatímco u jediné trubky (bez spojů) nikoliv, a to při stejném počátečním tlaku, vnitřním průměru a celkové délce trubky. Tato pozorování zdůrazňují, že interakce vznikající mezní vrstvy s drsností stěn v části trubky za protrženým diskem může samovolné vznícení buď podpořit, nebo naopak oddálit [3].

Dryer a kol. [29] uvedli, že samovolné vznícení je statisticky rozloženo v úzkém rozmezí tlaků mezi 2,04 a 2,21 MPa, s nulovou pravděpodobností selhání membrány při tlaku nižším než 2,04 MPa a s jistým vznícením z důvodu selhání při tlaku vyšším než 2,21 MPa. Experimentální studie Goluba a kol. [35] dokládá možnost samovolného vznícení v kanálu tvaru T při počátečním tlaku vodíku v rozmezí 1,2–2,9 MPa. Dryer a kol. [29] spekulují o významu počáteční fáze protržení membrány na proces mísení a následného samovolného vznícení. Dospěli k závěru, že při nízkém tlaku se limitujícím faktorem stává doba chemického vznícení, zatímco při vysokém tlaku omezuje proces doba mísení pro dosažení významného objemu hořlavé směsi. Fyzikální podstatu samovolného vznícení je třeba objasnit, aby bylo možné je vhodným způsobem regulovat.

Existuje také řada experimentů [36–47], které se zabývaly samovolným vznícením vysokotlakého vodíku při jeho náhlém uvolnění. Některé výzkumy se zaměřily na ovlivňující faktory, např. Mogi a kol. [36] a Lee a kol. [37] použili ve svých experimentech trubky o různých délkách a vodík se uvolňoval z různých hodnot skladovacího tlaku. Výzkumné kolektivy zjistily, že k samovolnému vznícení dochází při dostatečně vysokém skladovacím, a to i navzdory použití kratší trubky. S rostoucí délkou trubky klesal minimální tlak potřebný pro samovolné vznícení. Dostatečně vysoký skladovací tlak poskytuje dostatek energie k vytvoření rázové vlny s vysokou intenzitou, která ohřívá vzduch před sebou na vysokou teplotu. Kromě toho je nutné, aby trubka měla dostatečnou délku, a proto se v důsledku vícerozměrného odrazu rázu a interakcí mezi rázem a rázovou vlnou vytváří směšovací zóna. Pokud se však trubka prodlouží nad kritickou délku, tj. 1,2 m, jak tvrdí Kitabayashi a kol. [38], mohlo by v trubce

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

dojít k samovolnému vznícení směsi. Golovastov a kol. [39] použili fotonásobič a světelnou diodu k registraci rychlosti protržení disku a okamžiku samovolného vznícení. Ukázalo se, že na samovznícení vodíku v důsledku vysokého tlaku má vliv jak počáteční tlak vodíku, tak rychlost protržení disku. Vyšší rychlost protržení disku snižuje minimální skladovací tlak potřebný pro samovolné vznícení. Kaneko a kol. [40] použili ve svých výzkumech různé materiály (měď, hliník a mosaz), průtržné kotouče s různou tloušťkou (0,2–0,5 mm) a číselná skóre. Uvedli, že podmínky prasknutí průtržného disku jsou jedním z hlavních faktorů ovlivňujících samovznícení vodíku pod vysokým tlakem. Studie Sunovy skupiny na Čínské univerzitě vědy a techniky [41–43] zkoumaly vliv geometrie navazujících trubek (ve tvaru písmene omega a trubek s různými úhly ohybu) na samovolné vznícení vodíku pod vysokým tlakem. Výsledky ukázaly, že různá vnitřní geometrie navazujících trubek vyvolá v trubce výrazný odraz rázové vlny. Rázový přetlak je ve srovnání s rovnými trubkami vyšší. U ohnutých trubek je navíc rázový přetlak vyšší u trubek s menším úhlem. Proto je pravděpodobnější, že samovolnému vznícení dojde v trubce s menším úhlem. Samovolné vznícení ovlivňují též podmínky prasknutí průtržného disku. Bylo zjištěno, že k samovznícení nemůže dojít, pokud je poměr prasknutí průtržného disku menší než 0,5, i když průtržný tlak činí až 9,0 MPa [44]. Kromě toho se s rostoucími rozměry trubky ( $D/P$ ) snižuje minimální tlak potřebný k samovolnému vznícení [45]. Kimet a kol. [46] použili poprvé ke zkoumání mechanismů samovolného vznícení trubku se dvěma bočními průřazy. Vizualizační studie ukázala, že k samovolnému vznícení původně došlo na mezní vrstvě trubky za předním středem směšovací oblasti a poté se plamen šířil proti proudu a po proudu podél mezní vrstvy. Samovolné vznícení bylo doprovázeno komplexním mísením vyvolaným vícerozměrným odrazem rázové vlny a vzájemnou interakcí rázů. V mezní vrstvě existovala kritická mez statického tlaku, při níž docházelo k samovznícení. Yamashita a kol. [47] zjistili, že první jádro se objevilo v blízkosti stěny. Další jádro se vytvořilo u vnější strany stěny trubky a jádra se postupně objevovala v celé délce trubky. Nakonec se tyto plameny spojily a vytvořily uvnitř trubky velkou oblast plamene.

Byly provedeny i numerické studie [48–57]. Wen a kol. [48] uvedli, že při samovolném vznícení hrál velmi důležitou roli proces konečného roztržení průtržného disku, který vyvolal významné promíchání vodíku se vzduchem na kontaktním povrchu prostřednictvím odrazu rázové vlny a vzájemné interakce mezi rázy. Byly provedeny také parametrické studie, které zkoumaly vliv rychlosti protržení, skladovacího tlaku, délky trubky a průměru trubky na samovolné vznícení. Tyto studie poskytly obdobné závěry. Studie téže skupiny [49,50] se numericky zabývaly vlivem vnitřní geometrie a překážkové desky na samovolné vznícení vodíku. Výsledky ukázaly, že přítomnost vnitřní geometrie výrazně zvyšuje možnost samovolného vznícení a přítomnost překážkové desky uhasí plamen po samovznícení. Bragin a kol. [51,52] simulovali samovolné vznícení vodíku pod vysokým tlakem pomocí modelu LES a úspěšně reprodukovali oddělení plamene vně trubky. Simulace protržení membrány ukázala, že podél mezní vrstvy existuje vrstva směsi vodíku se vzduchem, kde následně dochází k samovznícení. Jediný 3D model CFD a simulace provedené Ulsterskou univerzitou [51,52]

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

byly ověřeny na základě experimentů se samovznícením. Terashima a kol. [53] použili ve své simulaci různé počáteční tvary membrány a zjistili, že u značně deformované membrány byla uvnitř trubky identifikována tři vznícení. Lee a kol. [54,55] zjistili, že existuje významná souvislost mezi vlastnostmi vznícení a podmínkami protržení. Yamada a kol. [56,57] předložili myšlenku, že tvar kontaktní plochy se postupně mění z kulového na plochý. Poté se plochá kontaktní plocha změnila na kulovou s velkým zakřivením. Kromě toho byly v trubce zjištěny tři víry, které mohou mít významný vliv na míchání vodíku se vzduchem.

Další výzkumníci se zabývali vlivem různých plynů přimíchávaných do vodíku na výskyt samovolného vznícení. Rudy a kol. [58,59] vypouštěli vysokotlaké směsi vodíku s metanem a vodíku s dusíkem do trubky naplněné vzduchem. Bylo zjištěno, že již 5% přídavek metanu může zvýšit minimální skladovací tlak, při kterém se směs může vznítit. V porovnání s minimálním zásobním tlakem čistého vodíku je to 2,67násobek. Co se týče přídavků dusíku, 5% a 10% přídavek  $N_2$  může zvýšit minimální skladovací tlak, při kterém došlo k samovznícení, na 2,12násobek až 2,85násobek. Golovastov a kol. [60] zkoumali vliv příměsí metanu na zpoždění samovolného vznícení vysokotlakého vodíku. Ukázalo se, že přídavek 18 % (mol.) metanu vede k šestinásobnému prodloužení zpoždění vznícení. Navzdory výše uvedenému výzkumu stále chybí experimentální údaje o vlivu přimíchávání plynů do vzduchu na výskyt vysokotlakého samovznícení vodíku. O vlastnostech rázové vlny a podmínkách samovolného vznícení v této situaci je známo poměrně málo. Tato experimentální studie se snaží prozkoumat vliv přidávání vodíku na samovolné vznícení vysokotlakého vodíku, což je užitečné pro lepší pochopení fyziky a rizika uvolňování vysokotlakého vodíku a samovolného vznícení. V článku Gongga a kol. [61] byl zkoumán vliv přidávání vodíku na samovznícení vysokotlakého vodíku uvolněného do směsi vodíku se vzduchem. Před náhlým uvolněním vysokotlakého vodíku se v trubce smísí vodík se vzduchem o různých objemových koncentracích (0 %, 5 %, 10 %, 15 % a 20 %  $H_2$ ). K detekci rázových vln, odhadu střední rychlosti rázové vlny a záznamu přetlaku rázové vlny byla použita tlaková čidla. Ke zjištění výskytu samovolného vznícení vysokotlakého vodíku v trubce byly použity světelné senzory. Zachycení šíření plamene vně trubky zajistila vysokorychlostní kamera. Bylo zjištěno, že již 5% přídavek vodíku dokáže výrazně snížit minimální tlak potřebný pro samovznícení ze 4,37 MPa na 2,78 MPa. Po přidání 10 % nebo 15 % vodíku do vzduchu se minimální skladovací tlak sníží na 2,81 MPa, resp. 1,85 MPa. Při zvýšení přídavku vodíku na 20 % dochází k samovznícení již při tlaku protržení pouhých 1,79 MPa uvnitř rovné trubky.

## 5.2 Fyzikální mechanismus

### 5.2.1 Okamžité roztržení

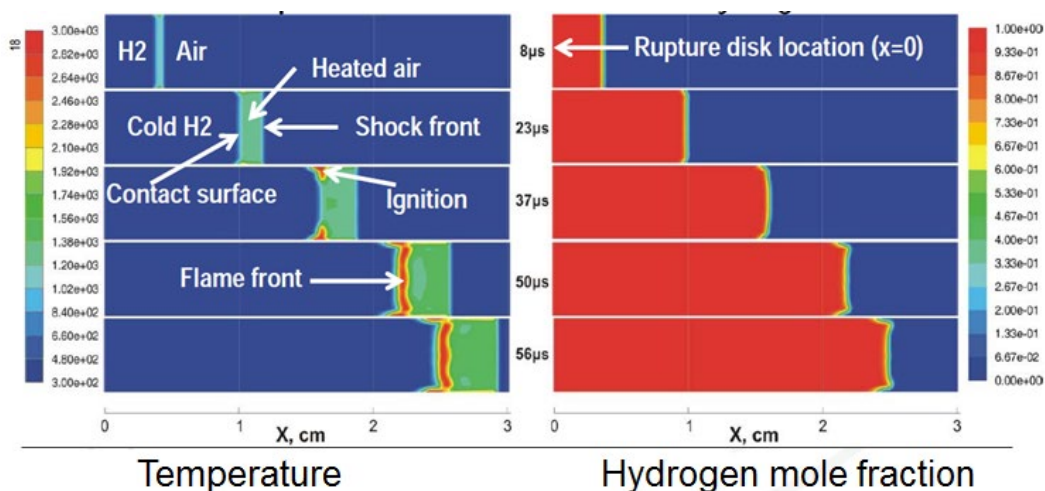
Mechanismus samovolného vznícení pomocí difuzního mechanismu je znázorněn na obrázku 8. Pro zjednodušení byly simulace provedeny pro případ okamžitého roztržení průřezného disku oddělujícího vodík od vzduchu při stejné počáteční teplotě, ale při různých hodnotách počátečního tlaku (vodík při 9,6 MPa a vzduch při 0,1 MPa) [12].



## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

Obrázek 8 znázorňuje dynamiku teploty (vlevo) a molárního podílu vodíku (vpravo) během prvních 56  $\mu\text{s}$  po okamžitém roztržení průtržného disku (neinerciální průtržný disk). V počátečním okamžiku ( $t=0$ ) se hranice průtržného disku, která odděluje vysokotlaký vodík od atmosférického vzduchu a která se nachází v bodě  $x=0$ , okamžitě zanikne a do vzduchu se rozšíří rázová vlna, která jej v důsledku působení komprese ohřívá. Po rázové vlně následuje oddělení studeného vodíku od ohřátého vzduchu kontaktní plochou. Je vidět, že tloušťka vrstvy ohřátého vzduchu mezi čelem rázu a kontaktní plochou se s časem zvětšuje [3].

Rázová vlna se šíří podél trubky mimo mezní vrstvu jako rovinná vlna bez zakřivení. Tvar kontaktní plochy se zpočátku mění z roviny na mírně vypouklou v důsledku neklouzavých podmínek na stěnách potrubí. Nejvyšší teplota je pozorována v mezní vrstvě v důsledku poklesu rychlosti (stagnační podmínky). V důsledku protichůdné difúze vodíku a vzduchu na kontaktním povrchu a následné difúze tepla z horkého vzduchu do studeného vodíku přes kontaktní povrch dochází k samovolnému vznícení, jakmile je dosaženo kritických podmínek pro chemickou reakci. Chemická reakce se šíří ve směru od stěny k ose trubky, jak se kontaktní plocha šíří ve směru proudění. Po 45  $\mu\text{s}$  od začátku procesu a ve vzdálenosti 20 mm od místa neinerciálního „průtržného disku“ zabírá hoření již celou plochu průřezu trubky. Zahájení chemických reakcí v mezní vrstvě urychluje šíření čela reakce podél stěny ve srovnání s axiální částí, což vede ke změně konvexního tvaru kontaktní plochy ve většině průřezu trubky na mírně konkávní [3].



Obrázek 8. Dynamika samovolného vznícení: teplota (vlevo) a molární podíl vodíku (vpravo) [62].

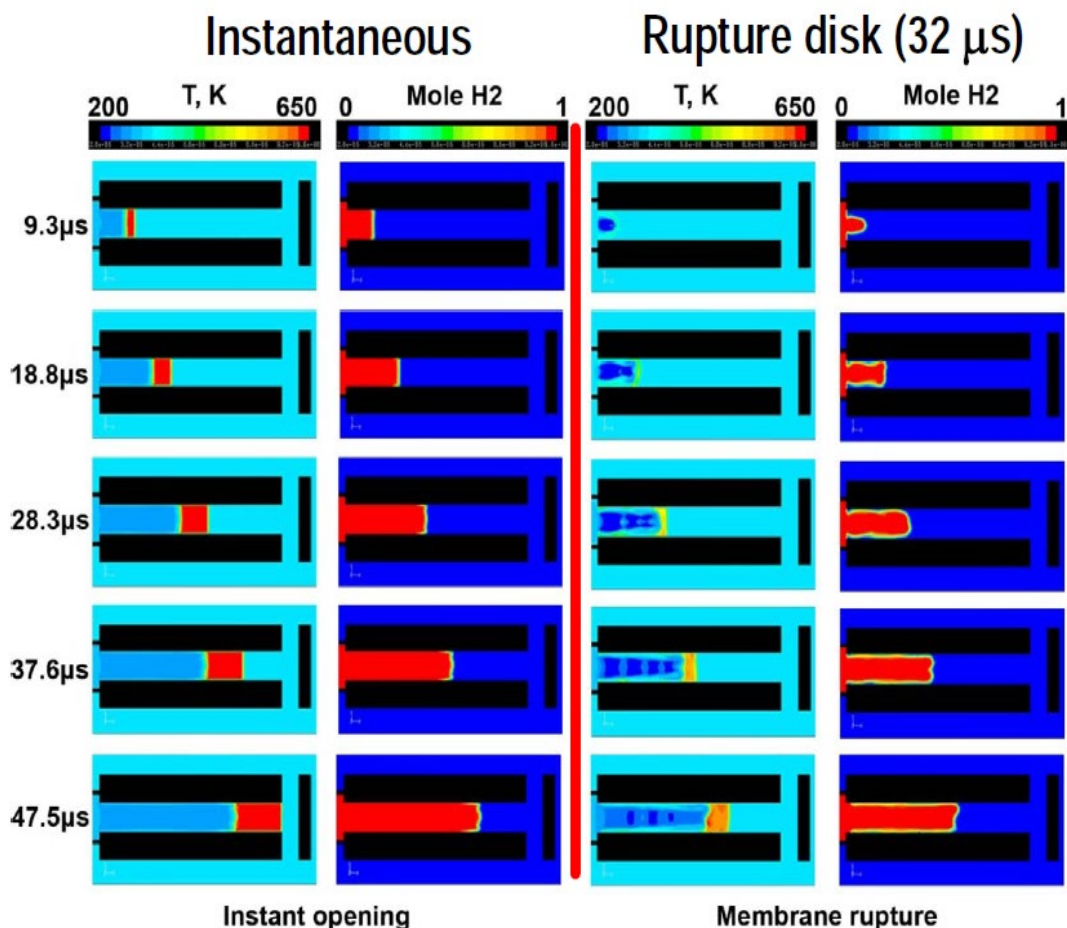
### 5.2.2 Vliv rychlosti otevírání ventilů

Obrázek 9 ukazuje dynamiku teploty a molárního podílu vodíku v počáteční fázi uvolňování vodíku do vzduchu v maketě zařízení PRD s okamžitým otevřením (vlevo) a s otevřením (vpravo) inerčního průtržného disku při počátečním tlaku 1,35 MPa ve vysokotlaké komoře [63]. Otevření inerčního průtržného disku je doprovázeno vznikem nedostatečně roztržitého proudu z otevřené plochy disku, která se časem zvětšuje. V případě otevření inerční membrány je patrná soudkovitá struktura (obrázek 9 vpravo). Protřžení inerčního disku má za následek nižší teplotu a jiný tvar rozhraní vodík-vzduch v porovnání s okamžitým

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

otevřením membrány, což Bragina a kol. [63] vedlo k závěru, že „pomalé otevírání i v případě rychlých ventilů“ někdy eliminuje vznícení.

Model inerciálního disku měl 10 radiálních oddílů a jeho roztržení bylo modelováno postupným otevíráním každého z 10 oddílů průtržného disku, čímž se měnil průměr hlavně na větší a teplotní pole se podobalo vícenásobnému kosočtverci, který je pro tento rozsah tlaků charakteristický. V případě okamžitého otevření imaginární neinerciální membrány je nárazem ohřátá zóna ve vzduchu (červená barva) téměř třikrát mocnější než v případě protržení inerciální membrány ve stejném časovém okamžiku. Je zřejmé, že při otevření inerciální membrány dochází k intenzivnějšímu mísení vodíku se vzduchem, a to i v okrajové vrstvě na stěnách axiálního kanálu. Maximální teplota ve vzduchu ohřátém rázem je v případě otevření inerciální membrány o 50 K nižší. Modelování otevření inerciálního průtržného disku je proto důležitou součástí prediktivních simulací samovolného vznícení ve složitých geometriích [3].



Obrázek 9. Dynamika teploty a molárního podílu vodíku v počáteční fázi po okamžitém otevření průtržného disku (vlevo) a po otevření inerciálního, desetioddílového průtržného disku (vpravo) v případě vysokotlaké komory s tlakem 1,35 MPa [3].

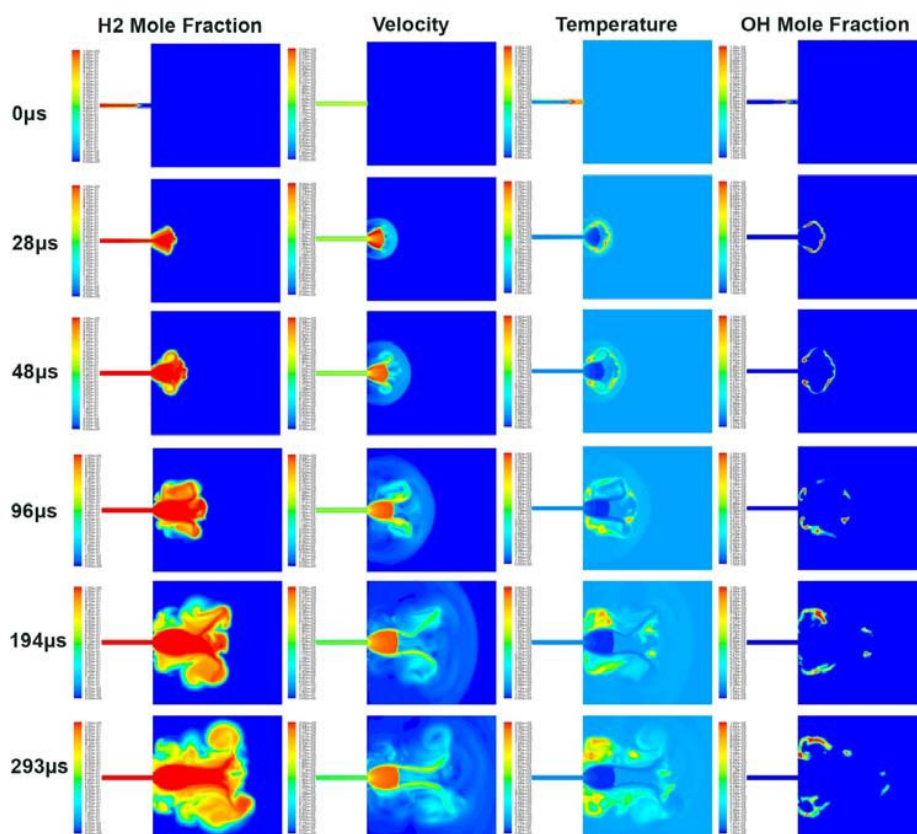
### 5.2.3 Přejít k trvalému požáru

V sérii simulací, kterou provedli Bragin a Molkov [64], se pozornost přesunula od řešení samovolného vznícení vodíku k přechodu od vznícení uvnitř potrubí k hoření mimo potrubí v

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

atmosféře. V této studii je plamen identifikován dle molárního podílu hydroxylových skupin OH. Koncentrace hydroxyly ve spojení s vysokou teplotou je obecně považována za známku probíhajícího hoření. Bragin a Molkov [64] identifikovali viditelný plamen podle molárního podílu hydroxylových skupin vyššího než 0,001.

Obrázek 10 ukazuje dynamiku teploty, rychlosti, molárních podílů vodíku ( $H_2$ ) a hydroxyly (OH) v simulacích uvolnění vysokotlakého vodíku z potrubí do volné atmosféry [64]. Počáteční tlak vodíku zvolený do numerické experimentální simulace byl 9,7 MPa, délka potrubí činila 145 mm, průměr potrubí 5 mm. Zorné pole na všech numerických snímcích zůstává konstantní, přičemž zobrazená délka kanálu odpovídá 66,5 mm a vnější plocha vůči potrubí je dlouhá 148 mm a široká 130 mm. Všechny snímky představují 2D průřez podél osy potrubí. Maximální a minimální hodnoty v každé sérii byly pevně stanoveny, aby byl ve všech snímcích zachován vztah mezi barvami a příslušnými parametry. Minimální a maximální hodnoty v každé sadě snímků byly stanoveny na 0–2 400 K v případě teploty, 0–3 000 m/s v případě rychlosti, 0–1 pro molární podíl vodíku a 0,001–0,01 pro molární podíl hydroxyly. Pokud se hodnoty vymknou těmito mezím, jsou probarveny podle barvy mezních hodnot: červeně pro hodnoty nad horní mezí a modře pro hodnoty pod dolní mezí [3].



Obrázek 10. Dynamika rychlosti, teploty a molárních podílů vodíku a hydroxyly ve 2D řezu podél osy potrubí [64].

Výsledný hrot čela plamene se dostane za rázovou vlnu asi 7 mm od konce trubky. Šířka čela plamene činí v blízkosti osy trubky asi 3 mm, zatímco v blízkosti stěny dosahuje délky až 35 mm. Hoření je výraznější v blízkosti stěn a má širší oblasti s vysokou teplotou. První snímek v

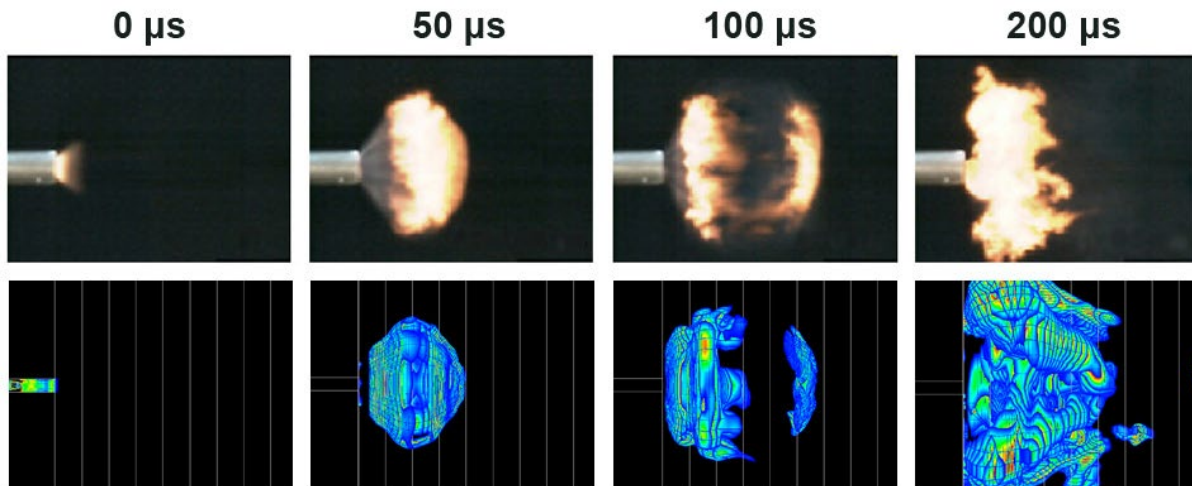
## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

časové řadě odpovídá času 131,5  $\mu\text{s}$  od chvíle okamžitého otevření „průtržného disku“. Pro snazší interpretaci procesu přechodu byl v tomto okamžiku referenční čas nastaven na 0  $\mu\text{s}$  (viz obrázek 10) [3].

Obrázek 10 ukazuje, že při výstupu rázové vlny z potrubí dochází k jejímu rozptylu a transformaci z rovinného tvaru na tvar polokulový. Ráz se šíří směrem ven a rychle ztrácí na síle. Za ním následuje čelo plamene tlačené expandujícím vodíkem. Jakmile vodík opustí potrubí, začne expanze a čelo plamene následuje expanzi. Krátce poté se začne formovat Machův disk (viz rámeček „28  $\mu\text{s}$ “ na obrázku 10) a expanze vodíku je zadržována, čímž se zvětšuje vzdálenost mezi předním rázem a kontaktní plochou. Náhlé zpomalení vodíku podporuje turbulentní míchání a kontaktní plocha se stává turbulentní [64].

### 5.2.4 Vliv oddělování plamene vírem

Souběžně s formováním Machova disku se na jeho okraji vytváří vnější anulární proudění. Vlivem viskózních sil vytváří toto nadzvukové anulární proudění rozsáhlý vír, který obrací proudění zpět k výstupu z potrubí. Vznik víru rozdělí hořící plyn na dvě části: část směřující po proudu a část směřující proti proudu – viz snímky 48  $\mu\text{s}$  na obrázku 10. Molární podíl radikálu OH (který slouží jako indikátor reakce hoření) a srovnání s experimentálními snímky na obrázku 11 níže, který ukazuje srovnání experimentálních a simulovaných snímků. Numerické šíření plamene lze vztáhnout k experimentálním rozměrům pomocí svislých čar, které jsou od sebe vzdáleny 10 mm. Mezitím se hlaveň rázu ještě nestabilizovala. Oblast hoření v horní části proudění je zatlačena zpět hrotem víru (96  $\mu\text{s}$ ), zatímco oblast hoření v dolní části proudění v blízkosti osy trysky je vytlačena ven. Jakmile se vír napřímí, přívod vodíku do recirkulační oblasti ustane a snížení rychlosti proudění umožní potřebný indukční čas k zintenzivnění spalování. Je vidět, že spalování ovlivňuje dynamický vývoj proudění plynu, a vede k tomu, že za Machovým diskem (194  $\mu\text{s}$ ) je proudění do určité míry asymetrické vůči ose. Hlaveň rázu se stabilizuje okolo času 200  $\mu\text{s}$ . Anulární vír se zvětšuje a rozšiřuje se společně se vzdáleností od osy, kde se vyskytuje vodík. V okamžiku posledního snímku na obrázku 10 (293  $\mu\text{s}$ ) je spalování ve směru proudění od víru zcela ukončeno (žádné radikály OH), zatímco spalování v horní části proudění v recirkulační zóně pokračuje.



Obrázek 11. Fotografie ze záznamu experimentu z vysokorychlostní kamery (nahore) [33] a numerické 3D snímky (dole) [64].

Sekvenci snímků pořízených vysokorychlostní videokamerou, která ukazuje plamen vycházející z potrubí, kde došlo k samovolnému vznícení, publikovali Mogi a kol. [33] a jsou reprodukovány na obrázku 11. Tato sekvence snímků ukazuje hoření samovolně vzniklé směsi vodíku se vzduchem, která vzniká venku a stabilizuje se v blízkosti výstupu z potrubí. Autoři pozorovali, že jakmile plamen vystoupí z potrubí, stabilizuje se v blízkosti trysky a působí jako pilotní plamen a následně zapálí/udrží tryskový oheň. Proto lze numericky simulovanou „stabilizaci“ plamene v blízkosti výstupu z potrubí [64] považovat za indikaci přechodu od samovolného vznícení k trvalému tryskovému požáru.

Z obrázku 11 je patrné, že vzniklé proudění v potrubí vystupuje do atmosféry v čase 0  $\mu\text{s}$ . Poté se rozvíjí se do kokonu hořící směsi (50  $\mu\text{s}$ ). Krátce nato dojde k rozpadu kokonu na horní a dolní oblast hoření (100  $\mu\text{s}$ ) v důsledku anulárního víru, který zde není patrný (viz obrázek 10). Jakmile se dolní oblast hoření rozplyne, horní oblast hoření se stabilizuje v blízkosti výstupu z potrubí (200  $\mu\text{s}$ ). Rozměry v této oblasti jsou však v simulacích větší. Tato skutečnost může mít tři různé příčiny. Zaprvé, zvolená hranice pro numerickou vizualizaci čela plamene 0,001 OH (často se bere jako 0,01 OH). Zadruhé, v experimentu a simulacích jsou různé podmínky pro sání vzduchu. Simulace uvolňování vodíku totiž nebyly prováděny na potrubí s vnitřním průměrem 5 mm a tloušťkou stěny 4 mm, ale na kanálu s průměrem 5 mm ve stěně s „nekonečným“ rozměrem. Třetím důvodem odchylky v rozměrech stabilizovaného plamene by mohlo být smáčení vnitřního povrchu trubice mezi protrženým diskem a výstupem do atmosféry vodným roztokem  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (1 %), aby bylo možné plamen vizualizovat. Toto řešení mohlo narušit přenos tepla a chemii hoření vodíku a zmenšit viditelné rozměry plamene [3].

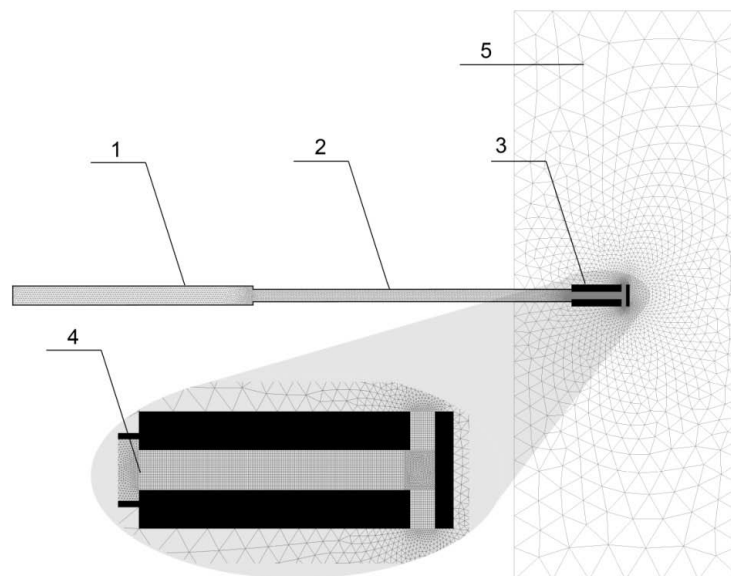
Na základě experimentálních pozorování a numerických simulací se předpokládá, že přechod k trvalému tryskovému požáru je do značné míry závislý na počáteční fázi tvorby proudění, kdy rozvíjející se anulární vír vytlačuje hořící směs proti směru proudění do recirkulační zóny. Jakmile se plamen v blízkosti výstupu z potrubí ustálí, může později fungovat jako pilotní plamen pro tryskový požár [3].

### 5.3 Samovolné vznícení v zařízení PRD tvaru T

#### 5.3.1 Uspořádání experimentu

Geometrie experimentální sestavy, včetně kanálu ve tvaru T napodobujícího zařízení PRD, je převzata od Goluba a kol. [35] a je znázorněna na obrázku 12. Vysokotlaký systém se skládá z 210 mm dlouhé trubky s vnitřním průměrem (ID) 16 mm, za níž následuje 280 mm dlouhá trubka s ID = 10 mm, na jejímž konci je umístěn plochý průřezný disk z mědi nebo hliníku s řezy usnadňujícími protržení, následovaný maketou zařízení PRD (kanál ve tvaru T) otevřenou do atmosféry.

Zařízení PRD je vybaven 48 mm dlouhým axiálním kanálem o průměru 6,5 mm s plochým koncem a dvěma radiálními kanály na protilehlých stranách axiálního kanálu pro odvod vodíku do atmosféry. Každý radiální kanál má délku 6,25 mm a ID 4 mm (vzdálenost od konce směřujícího do atmosféry jednoho radiálního kanálu ke konci druhého činí 19 mm). Radiální kanály jsou zarovnané s čelní stěnou axiálního kanálu a umístěny tak, aby se okraj každého radiálního kanálu dotýkal tangenciálně ploché čelní stěny axiálního kanálu. Golub a kol. [35] odhadli otevření průřezného disku na přibližně deset mikrosekund, což vytváří podmínky pro lepší mísení vodíku se vzduchem během otevírání v porovnání s nerealistickým okamžitým otevřením. Pro registraci samovolného vznícení byl podél osy radiálních kanálů zařízení PRD instalován světelný senzor. Teplota za rázovou vlnou odraženou od ploché čelní stěny byla autory odhadnuta jako více než dvakrát vyšší než teplota za dopadající rázovou vlnou. Golub a kol. [35] uvádějí, že pokud počáteční tlak ve vysokotlaké komoře nepřesáhl 1,2 MPa, světelný senzor nezaznamenal žádný signál a při tlaku 2,9 MPa bylo zaznamenáno vznícení.



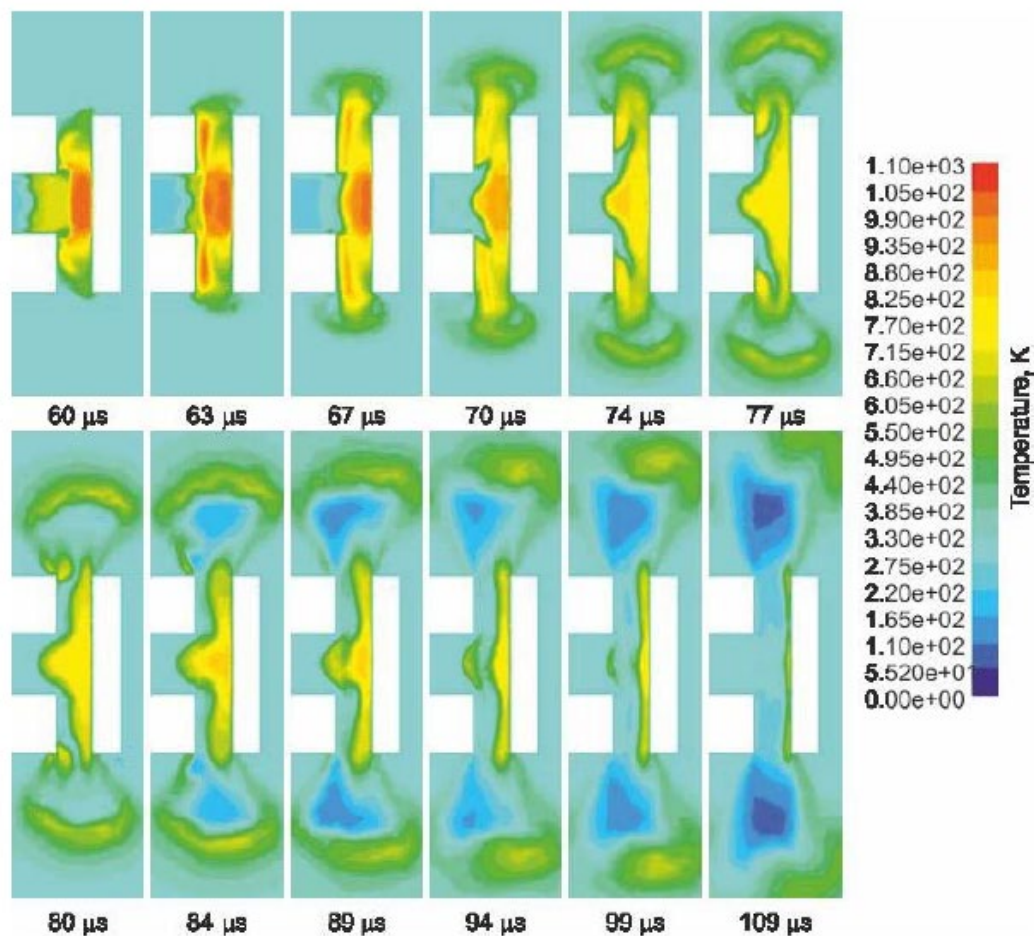
Obrázek 12. Geometrie a výpočetní oblast: 1 a 2 – vysokotlaké trubky, 3 – maketa zařízení PRD (kanál ve tvaru T), 4 – průřezný disk, 5 – vnější výpočetní oblast.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

### 5.3.2 Vliv skladovacího tlaku

#### 5.3.2.1 Výsledky simulace při tlaku 1,35 MPa (bez samovolného vznícení)

Na obrázku 13 je znázorněn průběh proudění. Obrázek současně poskytuje náhled na proces uvolňování vodíku ze zásobníku při tlaku 1,35 MPa kanálem tvaru T, který simuluje zařízení PRD. V tomto případě nebylo vznícení pozorováno. První snímek označený „60  $\mu$ s“ ukazuje kontaktní plochu mezi vodíkem o teplotě blízké pokojové teplotě (světle modrá barva) a vzduchem ohřátým tlakovou vlnou (zelenožlutá barva) v horizontálním axiálním kanálu. Kontaktní plocha se v tomto okamžiku nachází uvnitř axiálního kanálu a je narušena Rayleighovou-Taylorovou nestabilitou. V blízkosti plochého konce axiálního kanálu se nachází množství vzduchu, který je dále ohříván odraženým rázem (červeně). Na dalším snímku „63  $\mu$ s“ jsou vidět nové oblasti ohřátého vzduchu (červeně) v radiálních kanálech spolu s rostoucím objemem horkého vzduchu na konci axiálního kanálu. Vznik těchto nových oblastí je pravděpodobně způsoben druhým odrazem od stěny radiálního kanálu, která je umístěna naproti plochému konci axiálního kanálu. V čase 67  $\mu$ s začne „studený“ vodík opouštět axiální kanál a proudit podél jedné strany radiálního kanálu. Teplota horkého vzduchu před vodíkem se snižuje (viz snímky od „67  $\mu$ s“ do „77  $\mu$ s“). Při výstupu horkého vzduchu z radiálního kanálu do atmosféry dochází k poklesu teploty ohřátého vzduchu. Odražená rázová vlna je při skladovacím tlaku 1,35 MPa slabá a horký vzduch v proudění po odražené tlakové vlně nemůže vstoupit do axiálního kanálu (pouze v malé míře v ose axiálního kanálu). V čase rovném 77  $\mu$ s začne vodík vystupovat do atmosféry a jeho teplota během této expanze dále klesá (tmavě modrá barva) [12].

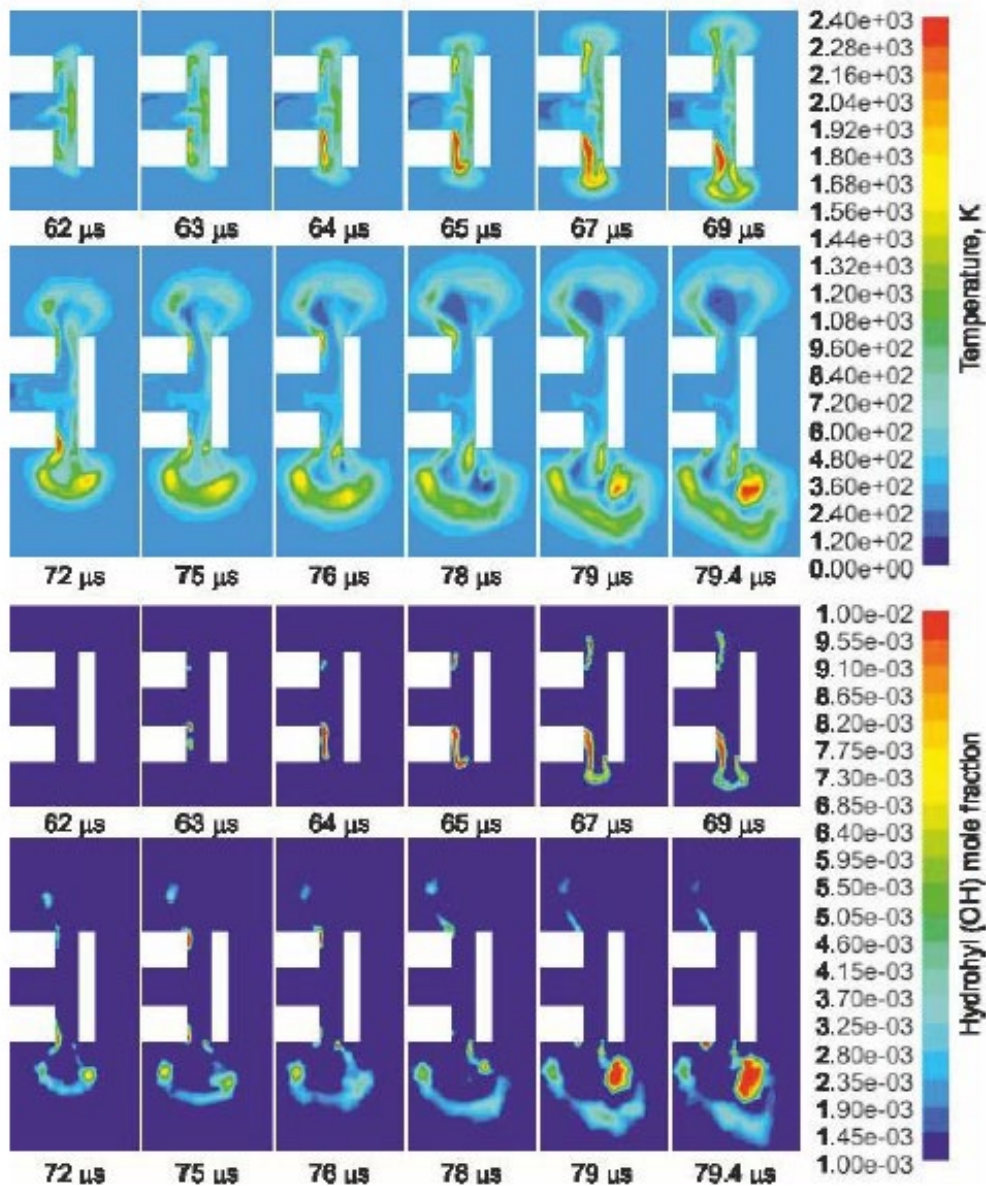


Obrázek 13. Dynamika teploty při uvolňování vodíku do kanálu ve tvaru T při skladovacím tlaku 1,35 MPa – bez vznícení (žlutá – vzduch ohřátý rázovou vlnou; červená – vzduch ohřátý odraženou rázovou vlnou; světle modrá v trubce – proudící vodík; tmavě modrá – vodík ochlazovaný při expanzi do atmosféry) [12].

### 5.3.2.2 Výsledky simulace pro 2,9 MPa (vznícený vodík) a pro 2,43 MPa

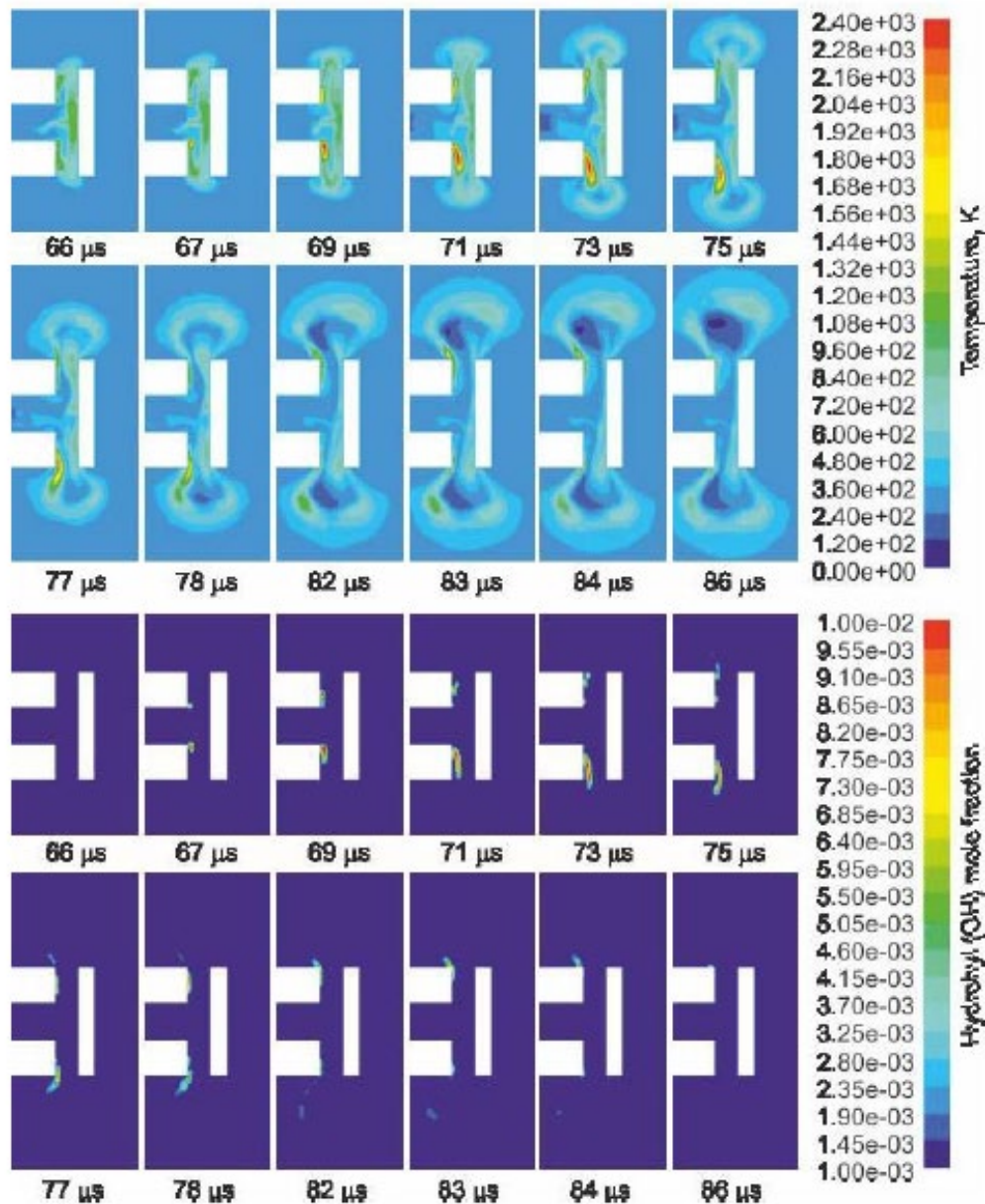
Teplotní profily a profily molárního podílu hydroxylů v axiálním průřezu pro případ s počátečním tlakem 2,9 MPa ve vysokotlaké komoře jsou uvedeny na obrázku 14. Obrázek 15 navíc ukazuje profily teploty a molární podíly hydroxylů v axiálním průřezu pro případ s počátečním tlakem vodíku 2,43 MPa ve vysokotlaké komoře.





Obrázek 14. Teplota (nahore) a molární podíl hydroxylů (dole) při skladovacím tlaku vodíku 2,9 MPa.

V počáteční fázi uvolňování vodíku je nejvyšší teploty dosaženo v místě vedoucího odrazu rázu na plochem konci axiálního kanálu, viz snímky 62  $\mu\text{s}$  a 63  $\mu\text{s}$  na obrázku 14. Je však zřejmé, že vznícení v této oblasti není možné, protože vodík do ní zatím neproudí. Jakmile se proud vodíku rozptýlí kolem okraje z axiálního kanálu do radiálních kanálů, začne se mísit se vzduchem ohřátým rázy. Tím jsou zajištěny nezbytné podmínky „požárního trojúhelníku: (tj. palivo – oxidant – vysoká teplota) pro vznícení směsi vodíku se vzduchem. Je vidět, že chemická reakce se zahájí jak v případě tlaku 2,9 MPa (obrázek 14), tak v případě tlaku 2,43 MPa (obrázek 15) v radiálním kanálu v místě blízko stěny v blízkosti horní části proudu a je indikována nenulovým hydroxylovým molárním podílem, který začíná růst od 63  $\mu\text{s}$ , resp. 67  $\mu\text{s}$ .



Obrázek 15. Teplota (nahore) a molární podíl hydroxyly (dole) při skladovacím tlaku vodíku 2,43 MPa.

U skladovacího tlaku 2,9 MPa (obrázek 14) lze pozorovat rozsáhlé oblasti vysokých teplot ve srovnání s tlakem 2,43 MPa (obrázek 15). Rozdíl je zřejmý, když je hořící směs vytlačena ven. Při tlaku 2,9 MPa se vně zařízení PRD vytvoří polokulovitý kokon z hořlavé směsi vodíku se vzduchem zahřáté na kritické podmínky, který je následován expandujícím vodíkem. Hoření je zahájeno v několika místech kokonu (jak je patrné ze snímků teploty a molárního podílu OH v čase 79 μs). Koncentrace vodíku v těchto místech mimo zařízení PRD a těsně před zapálením se pohybuje v rozmezí 29 až 36 % obj. (na obrázku není znázorněno). Lze tedy vyvodit závěr, že k zapálení difuzním mechanismem dochází v nejvíce reagujících, takřka stechiometrických směsích vodíku se vzduchem [12].

Při skladovacím tlaku 2,43 MPa (obr. 15) je hoření ve srovnání s tlakem 2,9 MPa poměrně slabé a reagující směs je strhávána sousedním proudem vodíku, což vede k prodloužení

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

hořících oblastí. Při výstupu z radiálních kanálů zařízení PRD dochází k expanzi proudu a zániku vysokoteplotních oblastí, čímž se reakce a koncentrace OH zastaví, a to včetně ochlazovací role expandujícího proudu čistého vodíku na hořlavou směs [12]. Celý proces od zahájení hoření až po samovolné vyhasnutí (tj. zánik oblasti vysokých teplot a molárních frakcí OH, obr. 15) trvá o něco déle než 10  $\mu$ s. Tato doba je dostatečná k registraci chemické reakce pomocí světelného senzoru při pokusech. To vysvětluje nejistotu při interpretaci experimentálních pozorování Goluba a kol. [35]. Při tlaku 2,9 MPa je hoření skutečně poměrně výrazné, ale při tlaku 2,43 MPa je místo samovznícení slabé a ztrácí se v důsledku samovolného vyhasnutí. Světelné senzory však zaznamenaly signál i během samovolného vznícení. Simulace tak v plném souladu s experimentálním pozorováním potvrdily samovolné vznícení při skladovacím tlaku 2,43 MPa (vznícení však není trvalé) [12].

Obrázky 14 a 15 ukazují, že proces je asymetrický, tj. vznícení v horním radiálním kanálu je slabší než ve spodním kanálu. Při tlaku 2,9 MPa přetrvá vznícení expanzi pouze ze spodního radiálního kanálu, zatímco horní část vyhasne. To je způsobeno asymetrickým otevřením průtržného disku v simulacích. Výsledky podporují předchozí závěry o citlivosti samovznícení na proces protržení disku, který by měl být dále zkoumán společně s účinky dalších faktorů, jako je vlhkost vzduchu atd. [12]. Podrobnější informace o samovznícení v zařízení PRD tvaru T lze nalézt v dokumentu [3].

## 6. Prevence zapálení vodíku

Zápalné zdroje je třeba vhodným způsobem eliminovat nebo izolovat a provoz na zařízeních FCH by měl probíhat tak, jako by se v nich mohly vyskytnout nepředvídané zdroje zapálení. Měly by být zavedeny účinné metody uzemnění, aby se minimalizovalo riziko statického výboje a ve venkovním prostředí i možnost úderu blesku. Materiály vybrané k použití ve vodíkovém prostředí by měly být posouzeny z hlediska schopnosti odvádět statickou elektřinu. Izolační materiály, jako jsou dřevo, papír a některé tkaniny, obvykle vytvářejí vodivou vrstvu, která může zabránit hromadění statické elektřiny tím, že absorbuje vodu ze vzduchu v prostředí, kde je relativní vlhkost vyšší než 50 %. Doporučené postupy pro metody uzemnění, které předcházejí elektrostatickým výbojům, lze nalézt v různých národních a mezinárodních normách, které se týkají instalace elektrických zařízení v prostředí s nebezpečím výbuchu. Elektrická zařízení vybraná k použití ve vodíkovém prostředí mohou být také zdrojem jisker nebo tepla, a proto je třeba dbát na dodržování příslušných národních a mezinárodních elektrotechnických norem pro instalaci.

Existuje několik způsobů, jak eliminovat nebo alespoň snížit riziko zapálení. Britský úřad pro BOZP Health and Safety Executive sestavil seznam následujících preventivních opatření [65]:


- použití vyhovujícího elektrického zařízení (tj. zařízení klasifikovaného pro zónu, ve které se nachází), podobným způsobem by mělo být vybráno i mechanické vybavení,
- uzemnění všech zařízení pomocí technických prostředků,
- eliminace povrchů s teplotou vyšší, než je teplota samovznícení skladovaných/používaných hořlavých materiálů,
- zajištění ochrany proti úderu blesku,
- výběr vhodných vozidel/spalovacích motorů, které mohou pracovat v oblastech s klasifikací výbušné zóny,
- výběr vhodných zařízení, aby se předešlo zdrojům elektromagnetického záření vysoké intenzity, např. omezení příkonu optických vláken, nepoužívání silných laserů či zdrojů infračerveného záření,
- zákaz kouření/používání zápalek nebo zapalovačů,
- řízené používání běžných vozidel,
- řízení činností, které vytvářejí dočasné prostředí s nebezpečím výbuchu, např. napouštění/vypouštění cisteren,
- řízení činností údržby, které mohou způsobit vznik jisker, horkých či žhavých povrchových ploch nebo otevřeného ohně, prostřednictvím systému povolenek k provedení pracovní činnosti,

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

- opatření k omezení rizika tvorby pyroforických usazenin, které zpravidla souvisejí s tvorbou sulfidu železa uvnitř technologického zařízení.

### 6.1 Klasifikace zón s nebezpečím výbuchu

Popis klasifikace zařízení do zón s nebezpečím výbuchu a četnost úniků (v hodinách za rok) jsou uvedeny v tabulce 1. Zařízení používaná v zóně 0 musí být jiskrově bezpečná. Zařízení musí být kontrolováno certifikačním subjektem, aby získalo příslušné označení. Aby zařízení zůstalo jiskrově bezpečné, je nutná pravidelná údržba.

Tabulka 1. Klasifikace zón s nebezpečím výbuchu  .

Zone	Description	Frequency
0	An area where an explosive gas atmosphere is present continuously or for long periods	>1000 h/a
1	An area where an explosive gas atmosphere is likely to occur in normal operation	>10 h/a but <1000 h/a
2	An area where an explosive gas atmosphere is not likely to occur during normal operation, or if it occurs will only exist for a short period	<10 h/a
No zone	Safe area	No Ex-Atmosphere present at any time

Elektrická zařízení mohou být zdrojem zapálení. Hlavní zásadou prevence je omezit přítomnost zdrojů zapálení v místech/prostorech s nebezpečím výbuchu. Pokud to není možné, používají se tři základní metody ochrany, které zajišťují bezpečnost a dodržování předpisů:

1. Uzavření výbuchu. Tato metoda umožňuje vznik požáru nebo výbuchu, ale omezuje je na přesně vymezený prostor. Cílem je zabránit šíření nebezpečných jevů do okolní atmosféry. Je možné použít:
  - Kryt odolný vůči výbuchu, kdy výbuch zůstane omezen v krytu speciálně navrženém tak, aby odolal přetlaku. Platí pro zařízení umístěná v zónách 1 a 2, nikoli však v zóně 0 a označuje se symbolem Ex „d“.
2. Oddělení. Cílem této metody je fyzicky oddělit nebo izolovat elektrické části nebo horké povrchy od výbušné směsi. Je možné použít:
  - Metodu ochrany přetlakem, kdy je uvnitř krytu umístěn ochranný plyn, aby se udržoval tlak o něco vyšší než ve vnější atmosféře. Platí pro zařízení umístěná v zónách 1 a 2, nikoli však v zóně 0 a označuje se symbolem Ex „p“.
  - Metodu ochrany zapouzdřením, kdy se k oddělení elektrických částí používá pryskyřice. Platí pro zařízení umístěná v zónách 1 a 2, nikoli však v zóně 0 a označuje se symbolem Ex „m“.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

- Metoda ochrany ponořením do oleje, kdy jsou všechny elektrické části ponořeny do oleje. Platí pouze pro zařízení umístěná v zónách 1 a 2, nikoli však v zóně 0 a označuje se symbolem Ex „o“.
  - Metoda ochrany práškovou náplní, kdy se k oddělení elektrických částí používá práškový materiál (obvykle křemenný prášek). Platí pouze pro zařízení umístěná v zónách 1 a 2, nikoli však v zóně 0 a označuje se symbolem Ex „q“.
3. Prevence. Jedná se o metodu, která omezuje energetickou hodnotu, elektrickou i tepelnou, na bezpečnou úroveň jak za běžného provozu, tak v případě poruchy. Je možné použít:
- Metodu zvýšené bezpečnostní ochrany, kdy je elektrický přístroj navržen tak, aby za běžných podmínek předcházel vzniku nadměrných teplot, elektrických oblouků a jisker uvnitř i vně přístroje. Platí pouze pro zařízení umístěná v zónách 1 a 2, nikoli však v zóně 0 a označuje se symbolem Ex „e“.
  - Metoda jiskrové bezpečnosti. Energie uložená v elektrickém obvodu je omezená, takže není schopna vytvářet elektrické oblouky, jiskry nebo tepelné jevy, které by mohly způsobit výbuch směsi vodíku se vzduchem, a to jak za běžného provozu, tak v případě konkrétních poruchových stavů. Druh ochrany označený jako Ex „ia“ se vztahuje na zařízení umístěná v zónách 0, 1 a 2, zatímco druh ochrany označený jako Ex „ib“ pouze na zařízení v zónách 1 a 2, nikoli však v zóně 0 [66].

### 6.2 Prevence zapálení jiskrou elektrostatického výboje

Vodík patří do skupiny hořlavých plynů IIC. Evropský Výbor pro normalizaci v elektrotechnice [67] omezuje šířky úzkých materiálů (trubek, plášťů kabelů atd.) v závislosti na zónách a kategoriích plynů, které jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2. Omezení CENELEC týkající se šířky úzkých materiálů.

Zóna	Maximální šířka v cm		
	Skupina IIA	Skupina IIB	Skupina IIC
0	0,3	0,3	0,1
1	3,0	3,0	2,0
2	Bez omezení	Bez omezení	Bez omezení

Výbor CENELEC rovněž stanovil omezení nabíjených ploch v závislosti na zónách a kategoriích plynu, která jsou uvedena v tabulce 3. Tento dokument omezuje oblasti izolačních materiálů, které se mohou nabít, a omezuje maximální náboj, který může být přenesen z povrchu ve formě kartáčového výboje (maximální přípustný přenesený náboj činí u vodíku 10 nC).

Tabulka 3. Omezení CENELEC týkající se nabíjené povrchové plochy.

Zóna	Maximální plocha v cm <sup>2</sup>		
	Skupina IIA	Skupina IIB	Skupina IIC
0	50	25	4
1	100	100	20
2	Bez omezení	Bez omezení	Bez omezení

Předejít zapálení vodíku, který je záměrně vypouštěn do atmosféry, lze použitím leštěného toroidního kroužku na konci ventilačního otvoru. V praxi jsou korozní usazeniny a nečistoty na těchto kroužcích ve skutečnosti výstupky s malým poloměrem [12]. Regulace elektrostatického náboje může vyžadovat změnu materiálu kombinéz zaměstnanců a použití antistatické obuvi. Kromě toho se za potenciální zdroje zapálení považují také zařízení napájená z baterií, jako jsou rádia, mobilní telefony a fotoaparáty [12].

Různé pokyny, například [68] a [69], popisují metody prevence vzniku a hromadění náboje, jakož i prevenci elektrostatického výboje, jak to vyžaduje norma ATEX [70]. Patří mezi ně:

- Prevence nebo omezení vzniku náboje: u nevodivých kapalin, jako je kapalný vodík, se doporučuje nepřekračovat přepravní rychlost 1 m/s zvětšením průměru potrubí nebo snížením průtoku.
- Odstranění nebo omezení akumulace náboje: toho lze docílit nepoužíváním izolačních materiálů a také uzemněním a vodivým propojením instalačních prvků.
- Organizační měření: regulace statické elektřiny závisí na školení zúčastněných zaměstnanců, jak je uvedeno v normě ATEX 137 [70].

### 6.3 Řízení tepelných a mechanických zdrojů zapálení

Zapálení směsi vodíku se vzduchem může být způsobeno horkým povrchem. V případě vodíku nesmí teplota horkých povrchů nebo horkých míst překročit 585 °C ani na několika mm<sup>2</sup> podle experimentů provedených v rámci evropského projektu MECHEX (upozorňujeme, že teplota samovznícení vodíku, 510 °C, je stále nižší, než je uvedeno výše).

Je proto vhodné zajistit fyzické oddělení vodíku od zápalných zdrojů, jako jsou svařování, plameny nebo práce vyžadující vysoké teploty. Další klasifikace elektrických zařízení je založena na maximální povrchové teplotě přístroje při atmosférickém tlaku, která je uvedena v [tabulce 4 \[71\]](#). V hořlavé směsi vodíku se vzduchem lze použít jakýkoli typ přístroje od T1 do T6.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

Tabulka 4. Klasifikace elektrických přístrojů v závislosti na jejich maximální povrchové teplotě [71].

Teplotní třída	Maximální povrchová teplota ve °C
T1	450
T2	300
T3	200
T4	135
T5	100
T6	85

Mechanické zapálení bývá obecně důsledkem mechanického namáhání za abnormálních nebo poruchových podmínek (tj. tření, broušení a náraz nebo kombinace těchto faktorů) a obvykle se skládá ze tří kroků: vzniku tepla, přenosu tepla do okolní výbušné atmosféry, a nakonec samotného zapálení [66]. Prevence mechanického zapálení vyžaduje vysokou míru pečlivosti při konstrukci zařízení a lze k ní využít například následující opatření:

- omezení otáček,
- zajištění dostatečné vzdálenosti mezi pevnými a rotujícími částmi,
- použití teplotních čidel.

Energie pouhých několik joulů vzniklá při nárazu může plně postačovat k zapálení směsi vodíku se vzduchem. Aby se předešlo zapálení v důsledku nárazem, je nutné dodržet následující opatření [66]:

- používat vhodné nejiskřící nástroje,
- vyfouknutí vodíku před jakýmkoli zásahem,
- prevence styku hliníku s ocelí.

Práce vyžadující vysoké teploty jsou podobné jako mechanické zapálení. Vysoké teploty zde však nevznikají v důsledku mechanické poruchy procesu, nýbrž v důsledku lidské činnosti. Je nutné zabránit jakékoli havárii/nehodě, která z ní vyplývá [66]:

- systém vystavování „povolení k pracovní činnosti za vysokých teplot“,
- vhodné školení příslušných pracovníků,
- zajištění odpovídajícího protipožárního vybavení,
- vypnutí přívodu plynu po dobu zásahu,
- vyfouknutí zařízení před zásahem.



## Literatura a odkazy

1. Astbury, GR a Hawksworth, SJ (2007). Spontaneous ignition of hydrogen leaks: A review of postulated mechanisms (Samovolné vznícení vodíkových úniků: přezkum předpokládaných mechanismů). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy. Svazek 32, s. 2178–2185.
2. Moorehouse, J, Williams, A a Maddison TE (1974). An investigation of the minimum ignition energies of some C1 to C7 hydrocarbons (Zkoumání minimální zápalné energie některých uhlovodíků C1 až C7). Combustion and Flame (Spalování a plamen). Svazek 23, s. 203–213.
3. 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.
4. Blanchard, DC (1963). Electrification of the atmosphere by particles from bubbles in the sea (Elektrifikace atmosféry částicemi z mořských bublin). Progress in Oceanography. Svazek 1, s. 71–202.
5. Pratt, TH (1993). Electrostatic ignitions in enriched oxygen atmospheres: a case history (Elektrostatické zapálení atmosféry obohacené kyslíkem: historie případů). Process Safety Progress. Svazek 12, s. 203–205.
6. Metzler, AJ (1952). Minimum ignition energies of six pure hydrocarbon fuels (Minimální zápalné energie šesti čistých uhlovodíkových paliv). Zpráva NACA RM E52 F27.
7. Potter, AE (1960). Flame quenching (Vyhasínání plamene). Progress in Combustion Science and Technology (Pokrok ve vědě a technologii spalování). Svazek 1, s. 145–181.
8. Cassutt, L, Biron, D a Vonnegut B (1962). Electrostatic hazards associated with the transfer and storage of liquid hydrogen (Nebezpečnost statické elektřiny v souvislosti s přepravou a ukládáním kapalného vodíku). Advances in Cryogenic Engineering (Pokroky v kryogenních technologiích). Svazek 7, s. 327–35.
9. ISO/TR 15916 (2004). Základní hlediska bezpečnosti vodíkových systémů. Mezinárodní organizace pro normalizaci. Technická komise ISO 197, Vodíkové technologie. Mezinárodní organizace pro normalizaci, Ženeva.
10. Gibson, N a Harper, DJ (1988). Parameters for assessing electrostatic risk from non-conductors - a discussion (Parametry pro posuzování elektrostatických rizik souvisejících s nevodivými materiály – diskuse). Journal of Electrostatics (Časopis o elektrostatice). Svazek 21, s. 27–36.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

11. Ackroyd, GP a Newton, SG (2003). An investigation of the electrostatic ignition risks associated with a plastic coated metal (Zkoumání rizik elektrostatického zapálení v souvislosti s kovy s plastovou povrchovou úpravou). *Journal of Electrostatics* (Časopis o elektrostatice). Svazek 59, s. 143–51.
12. Projekt HyFacts. Kapitola IM. Mechanismy zapálení vodíku. Prevence a zmírnění následků zapálení. K dispozici na adrese: <https://www.h2euro.org/hyfacts/2014/06/26/training-material/> [přístup k datu 23.11.2020].
13. Cross, S a Jean, A (1987). *Electrostatics principles, problems and applications* (Principy, problematika a aplikace elektrostatiky). Bristol: Adam Hilger.
14. Bulewicz, EM, a kol. (1977). Zaplon mieszaniny wodorowo-tlenowej od goracej powierzchni (Vznícení směsí vodíku se vzduchem od horkého povrchu). *Archiwum Termodynamiki i Spalania*. Svazek 8(1), s. 85–93.
15. Ungut, A a James, H (2001). Autoignition of gaseous fuel-air mixtures near a hot surface (Samovolné vznícení plynné směsi paliva se vzduchem v blízkosti horkého povrchu). *Série symposií Institutu chemických technologů* (Institution of Chemical Engineers). Svazek 148, s. 487–502.
16. Pan, L, Fisher, SA, Jayanti, S a Hewitt, GF (1995). Measurement and prediction of temperature rise following sudden compression in a high-pressure pipeline (Měření a předpověď růstu teploty po náhlé kompresi ve vysokotlakém potrubí). *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*. Svazek 73 (část B), s. 18–20.
17. Cain, TM (1997). Autoignition of hydrogen at high pressure (Samovolné vznícení vodíku při vysokém tlaku). *Combustion and Flame* (Spalování a plamen). Svazek 111, s. 124–32.
18. Bond, J (1991). *Sources of ignition: flammability characteristics of chemicals and products* (Zdroje zapálení: hořlavost chemických látek a výrobků). Oxford: Butterworth Heinemann.
19. Reider, R, Otway, HJ a Knight HT (1965). An unconfined large volume hydrogen/air explosion (Velkoobjemový výbuch směsi vodíku se vzduchem ve volném prostoru). *Pyrodynamics*. Svazek 2, s. 249–261.
20. Chaineaux, J, Mavrothalassitis, G a Pineau, J (1991). Modelization and validation of the discharge in air of a vessel pressurized by flammable gas (Modelování a ověřování vypouštění do vzduchu z nádoby natlakované hořlavým plynem). *Progress in Astronautics and Aeronautics* (Pokrok v astronautice a aeronautice). Svazek 134, s. 104–137.
21. Groethe, M, Merilo, E, Colton, J, Chiba, S, Sato, Y a Iwabuchi, H (2005). Large-scale hydrogen deflagrations and detonations (Rozsáhlé vodíkové deflagrace a detonace), *Sborník z 1. mezinárodní konference o vodíkové bezpečnosti*, 8.–10. září 2005, Pisa, příspěvek 120105.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

22. Michels, A, de Graaf, W a Wolkers GJ (1963). Thermodynamic properties of hydrogen and deuterium between 175°C and 150°C and at pressures up to 2500 atmospheres (Part A) (Termodynamické vlastnosti vodíku a deuteria při teplotách od 175 °C do 150 °C a při tlaku do 2 500 atmosfér (část A)). Applied Science Research (Aplikovaný vědecký výzkum). Svazek 12, s. 9–32.
23. Schmidchen, U (2009). Hydrogen safety facts and myths (Fakta a pověry o vodíkové bezpečnosti). 3. mezinárodní krátký kurz a seminář pro pokročilé výzkumníky „Pokrok v oblasti vodíkové bezpečnosti“, Belfast, 27. dubna až 1. května 2009, Severní Irsko, Spojené království.
24. ISO/TR 15916 (2004). Základní hlediska bezpečnosti vodíkových systémů. Mezinárodní organizace pro normalizaci. Technická komise ISO 197, Vodíkové technologie. Mezinárodní organizace pro normalizaci, Ženeva.
25. BRHS, Dvouletá zpráva o bezpečnosti vodíku (2009). Evropská síť excelence „Bezpečnost vodíku jako nosiče energie“ (NoE HySafe). K dispozici na adrese: [www.hysafe.org](http://www.hysafe.org) [přístup k datu 23.11.2020].
26. Baratov, AN, Korolčenko, AY a Kravčuk, GN (Eds.) (1990). Nebezpečí požáru a výbuchů látek a materiálů. Moskva: Khimia. 496 s., ISBN 5-7245-0603-3 část 1, ISBN 5-7245-0408-1, 2. část (v ruském jazyce).
27. NASA (1997). Bezpečnostní norma pro vodík a vodíkové systémy. Pokyny pro konstrukci vodíkových systémů, výběr materiálů, provoz, skladování a přepravu. Technická zpráva NSS 1740.16, Úřad pro bezpečnost a zajištění misí, Washington. K dispozici na adrese: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf> zrušeno dne 25. července 2005 [přístup k datu 13.05.2014].
28. Wolanski, P a Wojcicki, S (1972). Investigation into the mechanism of the diffusion ignition of a combustible gas flowing into an oxidizing atmosphere (Zkoumání mechanismu difuzního zapálení hořlavého plynu proudícího do oxidující atmosféry). Sborník ústavu Combustion Institute. Svazek 14, s. 1217–1223.
29. Dryer, FL, Chaos, M, Zhao, Z, Stein, JN, Alpert JY a Homer, CJ (2007). Samovolné vznícení tlakových úniků vodíku a zemního plynu do ovzduší. Odborný časopis Věda a technologie spalování. Svazek 179, s. 663–694.
30. Golub, VV, Baklanov, DI, Bazhenova, TV, Bragin, MV, Golovastov, SV, Ivanov, MF a Volodin, VV (2007). Hydrogen auto-ignition during accidental or technical opening of high pressure tank (Samovolné vznícení vodíku při náhodném nebo technologickém otevření vysokotlaké nádrže). Časopis o prevenci vzniku škod ve zpracovatelském průmyslu Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Svazek 20(4–6), s. 439–446.
31. Golub, VV, Baklanov, DI, Golovastov, SV, Ivanov, MF, Laskin, IN, Saveliev, AS, Semin, NV a Volodin, VV (2008). Mechanisms of high-pressure hydrogen gas self-ignition in

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

- tubes (Mechanismy samovolného vznícení vysokotlakého plynného vodíku v potrubí). Časopis o prevenci vzniku škod ve zpracovatelském průmyslu *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Svazek 21(2), s. 185–198.
32. Pinto, D, Aizawa, K, Liu, YF, Sato, H, Hayashi, AK a Tsuboi, N (2007). Auto-ignition of high pressure hydrogen release (Samovolné vznícení při uvolňování vysokotlakého vodíku). Sborník z 21. mezinárodního kolokvia o dynamice výbuchů a reaktivních soustav, 23.–27. července 2007, Poitiers, Francie.
  33. Mogi, T, Kim, D, Shiina, H a Horiguchi, S (2008). Self-ignition and explosion during discharge of high-pressure hydrogen (Samovznícení a výbuch při uvolnění vysokotlakého vodíku). Časopis o prevenci vzniku škod ve zpracovatelském průmyslu *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Svazek 21(2), s. 199–204.
  34. Bazhenova, TV, Bragin, MV, Golub, VV a Ivanov, MF (2006). Self-ignition of a fuel gas upon pulsed efflux into an oxidative medium (Samovolné vznícení plynného paliva při pulzním výtoku do oxidačního média). *Technical Physics Letters*. Svazek 32(3), s. 269–271.
  35. Golub, VV, Volodin, VV, Baklanov, DI, Golovastov, SV a Lenkevich, DA (2010). Uvedeno v: *Physics of Extreme States of Matter (Fyzika extrémních stavů hmoty)*, ISBN 978-5-901675-96-0, Černogolovka, 2010, s. 110–113.
  36. Mogi T, Wada Y, Ogata Y, Hayashi AK (2009). Self-ignition and flame propagation of high-pressure hydrogen jet during sudden discharge from a pipe (Samovolné vznícení vysokotlakého vodíkového proudění a šíření plamene při náhlém uvolnění z potrubí). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 34:5810–5816.
  37. Lee HJ, Kim YR, Kim S-H, Jeung I-S (2011). Experimental investigation on the self-ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk through tubes (Experimentální zkoumání samovolného vznícení tlakového vodíku uvolněného při poruše průtržného disku v potrubí). *Proc Combust Inst* 33:2351–2358.
  38. Kitabayashi N, Wada Y, Mogi T, Saburi T, Hayashi AK (2013). Experimental study on high pressure hydrogen jets coming out of tubes of 0.1e4.2 m in length (Experimentální studie vysokotlakých vodíkových proudů vycházejících z potrubí o délce 0,1–4,2 m). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 38:8100–8107.
  39. Golovastov S, Bocharnikov V (2012). The influence of diaphragm rupture rate on spontaneous self-ignition of pressurized hydrogen: experimental investigation (Vliv rychlosti protržení membrány na samovolné vznícení vodíku pod tlakem: experimentální zkoumání). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 37:10956–10962.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

40. Kaneko W, Ishii K (2016). Effects of diaphragm rupturing conditions on self-ignition of high-pressure hydrogen (Vliv podmínek protržení membrány na samovolné vznícení vysokotlakého vodíku). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy 41:10969–10975.
41. Duan Q, Xiao H, Gao W, Gong L, Sun J (2016). Experimental investigation of spontaneous ignition and flame propagation at pressurized hydrogen release through tubes with varying cross-section (Experimentální zkoumání samovolného vznícení a šíření plamene při uvolňování vodíku pod tlakem potrubím s různým průřezem). Časopis o nebezpečnosti hmot 320:18–26.
42. Gong L, Duan Q, Sun Q, Jin K, Sun J (2017). Effects of the geometry of downstream pipes with different angles on the shock ignition of high-pressure hydrogen during its sudden expansion (Vliv geometrie navazujících potrubí s různými úhly na rázové vznícení vysokotlakého vodíku při jeho náhlé expanzi). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy 42:8382–8391.
43. Gong L, Duan Q, Jiang L, Jin K, Sun J (2016). Experimental study on flow characteristics and spontaneous ignition produced by pressurized hydrogen release through an Omega-shaped tube into atmosphere (Experimentální studie vlastností proudění a samovolného vznícení při uvolňování vodíku pod tlakem přes trubku ve tvaru písmene omega do atmosféry). Fuel (Palivo) 184:770–779.
44. Gong L, Duan Q, Liu J, Li M, Jin K, Sun J (2019). Effect of burst disk parameters on the release of high-pressure hydrogen (Vliv parametrů průtržného disku na uvolňování vysokotlakého vodíku). Fuel (Palivo) 235:485–494.
45. Duan Q, Xiao H, Gong L, Jin K, Gao W, Chai H a kol. (2018). Experimental study on spontaneous ignition and subsequent flame development caused by high-pressure hydrogen release: coupled effects of tube dimensions and burst pressure (Experimentální studie samovolného vznícení a následného rozvoje plamene způsobeného vysokotlakým uvolňováním vodíku: společný vliv rozměrů potrubí a tlaku při výbuchu). Fire Saf J (žurnál Požární bezpečnost) 97:44–53.
46. Kim YR, Lee HJ, Kim S, Jeung I-S (2013). A flow visualization study on self-ignition of high pressure hydrogen gas released into a tube (Studie vizualizace proudění při samovolném vznícení vysokotlakého plynného vodíku uvolňovaného do potrubí). Proc Combust Inst 34:2057–2064.
47. Yamashita K, Saburi T, Wada Y, Asahara M, Mogi T, Hayashi AK (2017). Visualization of spontaneous ignition under controlled burst pressure (Vizualizace samovolného vznícení při řízeném tlaku pro roztržení). Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy 42:7755–7760.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

48. Wen JX, Xu BP, Tam VHY (2009). Numerical study on spontaneous ignition of pressurized hydrogen release through a length of tube (Numerická studie samovolného vznícení při uvolňování vodíku pod tlakem přes potrubí). *Combust Flame* 156:2173–2189.
49. Xu BP, Wen JX (2014). The effect of tube internal geometry on the propensity to spontaneous ignition in pressurized hydrogen release (Vliv vnitřní geometrie potrubí na tendenci k samovolnému vznícení při uvolňování vodíku pod tlakem). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 39:20503–20508.
50. Xu BP, Wen JX, Tam VHY (2011). The effect of an obstacle plate on the spontaneous ignition in pressurized hydrogen release: a numerical study (Vliv překážkové desky na samovolného vznícení při uvolňování vodíku pod tlakem: numerická studie). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 36:2637–2644.
51. Bragin MV, Molkov VV (2011). Physics of spontaneous ignition of high-pressure hydrogen release and transition to jet fire (Fyzika samovolného vznícení při uvolňování vysokotlakého vodíku a přechodu do tryskového požáru). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 36:2589–2596.
52. Bragin M, Makarov D, Molkov V (2013). Pressure limit of hydrogen spontaneous ignition in a T-shaped channel (Tlaková mez samovolného vznícení vodíku v kanálu ve tvaru T). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 38:8039–8052.
53. Terashima H, Koshi M, Miwada C, Mogi T, Dobashi R (2014). Effects of initial diaphragm shape on spontaneous ignition of high pressure hydrogen in a two-dimensional duct (Vliv počátečního tvaru membrány na samovznícení vysokotlakého vodíku ve dvourozměrném potrubí). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 39:6013–6023.
54. Lee BJ, Jeung I-S (2009). Numerical study of spontaneous ignition of pressurized hydrogen released by the failure of a rupture disk into a tube (Numerická studie samovolného vznícení tlakového vodíku uvolněného při poruše průtržného disku do trubky). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 34:8763–8769.
55. Lee HJ, Park JH, Kim SD, Kim S, Jeung I-S (2015). Numerical study on the spontaneous-ignition features of high-pressure hydrogen released through a tube with burst conditions (Numerická studie vlastností samovolného vznícení vysokotlakého vodíku uvolňovaného potrubím za podmínek protržení). *Proc Combust Inst* 35:2173–2780.
56. Yamada E, Kitabayashi N, Hayashi AK, Tsuboi N (2011). Mechanism of high-pressure hydrogen auto-ignition when spouting into air (Mechanismus samovolného vznícení vysokotlakého vodíku při výronu do vzduchu). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 36:2560–2566.

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

57. Yamada E, Watanabe S, Hayashi AK, Tsuboi N (2009). Numerical analysis on auto-ignition of a high pressure hydrogen jet spouting from a tube (Numerická analýza samovolného vznícení vysokotlakého vodíkového proudu při výronu z potrubí). *Proc Combust Inst* 32:2363–2369.
58. Rudy W, Dabkowski A, Teodorczyk A (2014). Experimental and numerical study on spontaneous ignition of hydrogen and hydrogen-methane jets in air (Experimentální a numerická studie samovolného vznícení proudů vodíku a vodíku s metanem ve vzduchu). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 39:20388–20395.
59. Rudy W, Teodorczyk A, Wen J (2017). Self-ignition of hydrogen-nitrogen mixtures during high-pressure release into air (Samovolné vznícení směsí vodíku s dusíkem při vysokotlakém uvolňování do vzduchu). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 42:7340–7352.
60. Golovastov SV, Bocharnikov VM, SamoiloVA AA (2016). Experimental investigation of influence of methane additions on spontaneous self-ignition of pulsed jet of hydrogen (Experimentální zkoumání vlivu přídavku metanu na samovolné vznícení pulzního proudu vodíku). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 41:13322–13328.
61. Gong L, Duan Q, Liu J, Li M, Li P, Jin K, Sun J (2018). Spontaneous ignition of high-pressure hydrogen during its sudden release into hydrogen/air mixtures (Samovolné vznícení vysokotlakého vodíku při jeho náhlém uvolnění do směsí vodíku se vzduchem). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy* 43:23558–23567.
62. Bragin, MV a Molkov, VV (2011). Physics of spontaneous ignition of high-pressure hydrogen release and transition to jet fire (Fyzika samovolného vznícení při uvolňování vysokotlakého vodíku a přechodu do tryskového požáru). *Mezinárodní časopis o vodíkové energii International Journal of Hydrogen Energy*. Svazek 36(3), s. 2589–2596.
63. Bragin, MV, Makarov, DV a Molkov, VV (2011). Sborník příspěvků ze 4. mezinárodní konference o bezpečnosti vodíku, 12.–14. září 2011, San Francisco, USA.
64. Bragin, M a Molkov, V (2009). Physics of spontaneous ignition of high-pressure hydrogen release and transition to jet fire (Fyzika samovolného vznícení při uvolňování vysokotlakého vodíku a přechodu do tryskového požáru), *Sborník příspěvků ze 3. mezinárodní konference o bezpečnosti vodíku*, 16.–18. září 2009, Ajaccio, Francie.
65. Health and Safety Executive (2012). Hazardous Area Classification and Control of Ignition Sources (Klasifikace prostředí s nebezpečím výbuchu a řízení zápalných zdrojů). K dispozici na adrese: <http://www.hse.gov.uk/comah/sragtech/techmeasareaclas.htm> [přístup k datu 23.11.2020].

## Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

66. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering (Zásady vodíkového bezpečnostního inženýrství). Disertační práce. Ulsterská univerzita.
67. CENELEC (2003). Electrostatics – Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity (Elektrostatika – postupy pro prevenci nebezpečí způsobených statickou elektřinou), PD CLC/TR 50404:2003.
68. NFPA (2000). Doporučené postupy pro statickou elektřinu. 77.
69. British Standards Institution. Electrostatics (Elektrostatika) (2003). Code of practice for the avoidance of hazards due to static (Postupy pro prevenci nebezpečí způsobených statickou elektřinou). PD CLC/TR 50404: 2003.
70. Evropský parlament a Evropská rada, Směrnice Evropského parlamentu a Rady 1999/92/ES ze dne 16. prosince 1999 o minimálních požadavcích na zlepšení bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců vystavených riziku výbušných prostředí (patnáctá samostatná směrnice ve smyslu čl. 16 odst. 1 směrnice 89/391/EHS). 1999/92/ES (2000).
71. IEC, Elektrická zařízení pro výbušnou plynnou atmosféru – Část 0: Všeobecné požadavky EN60079-0 (2006).