



Evropský program školení školitelů pro zásahové jednotky

Přednáška 8

Zdroje a prevence zapálení

ÚROVEŇ III

Velitel zásahu

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

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

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.

Klíčová slova

Minimální zápalná energie (MIE), teplota samovznícení, zdroje zapálení, mechanismy zapálení

Obsah

Souhrn.....	3
Klíčová slova	3
1. Cílové publikum.....	5
1.1 Popis úlohy: Velitel zásahu	5
1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel zásahu.....	5
1.3 Předchozí učení: Velitel zásahu	5
2. Úvod a cíle.....	6
3. Zápalné zdroje	7
3.1 Zapálení elektrostatickým výbojem	8
3.2 Mechanické zapálení	8
3.3 Zapálení horkým povrchem	9
4. Mechanismy zapálení vodíku	10
4.1 Minimální zápalná energie (MIE).....	11
4.2 Teplota samovznícení.....	13
4.3 Difuzní zapálení	13
5. Samovolné vznícení náhlého úniku	14
5.1 Mechanismus difuzního zapálení	14
6. Prevence zapálení vodíku	15
6.1 Klasifikace zón s nebezpečím výbuchu	16
6.2 Prevence zapálení jiskrou elektrostatického výboje.....	17
6.3 Řízení tepelných a mechanických zdrojů zapálení	18
Literatura a odkazy	20

1. Cílové publikum

Informace uvedené v této přednášce jsou určeny pro úroveň Velitel zásahu.

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

1.1 Popis úlohy: Velitel zásahu

Velitelé zásahu odpovídají za strategické řízení taktiky a operací. Musí účinně a bezpečně organizovat zdroje, aby dosáhly nejvhodnějšího řešení zásahu. Velitel zásahu pracuje v jasném rámci velení, který mu pomáhá strukturovat, organizovat a řídit jakoukoli mimořádnou událost. Strategie a rámec musí být přizpůsobitelné co do rozsahu a funkcí, aby bylo možné čelit různým a novým typům mimořádných událostí a umožnit bezpečné a účinné nasazení a využití všech dostupných zdrojů.

1.2 Úroveň odborné způsobilosti: Velitel zásahu

Technické znalosti nacvičené s ohledem na rozvoj velitelských dovedností a jednání, které jsou základem pro správný úsudek, rozhodování a řízení dostupných zdrojů a pro interakci s ostatními organizacemi a agenturami. Vyžaduje se schopnost získávat, vstřebávat a používat informace někdy za složitých okolností a současně pracovat za podmínek extrémního stresu.

1.3 Předchozí učení: Velitel zásahu

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 difuzního 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.

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

- rozpoznat různé typy zápalných zdrojů,
- určit mechanismy zapálení vodíku v závislosti na zápalném zdroji,
- 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,
- posoudit fáze samovznícení při náhlém úniku vodíku,
- rozpoznat prostředky pro řízení zdrojů zapálení vodíku,
- 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).

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.

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].

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 [4].

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].

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 navrhané 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)¹ (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].

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),

¹ 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

aby z přípojky odstranil nečistoty, a když tak učinil, unikající plyn se okamžitě zapálil. Bond [5] 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) [6], Groethe a kol. (2005) [7].

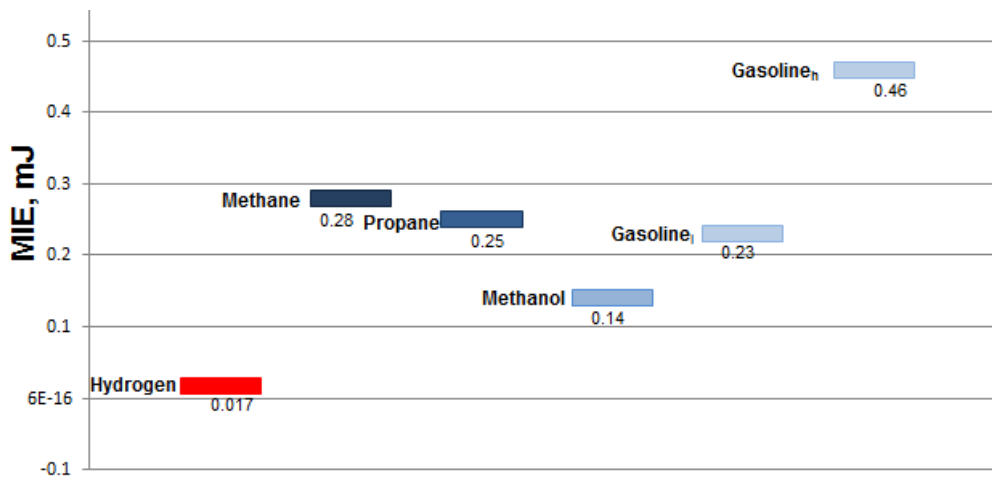
4.1 Minimální zápalná energie (MIE)

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 [4]. 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 vznítala, 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 1](#), ve srovnání s ostatními palivy má vodík nejnížší 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

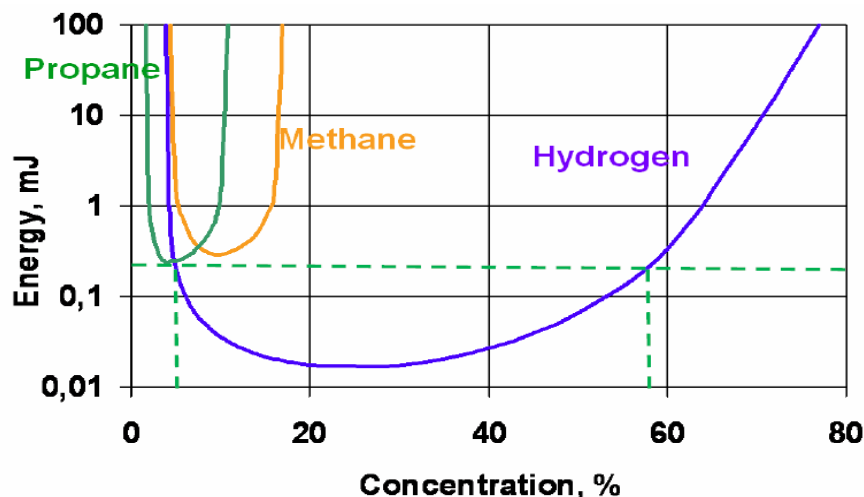
Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

zapálení. Na hranici hořlavosti se MIE stává nekonečnou (obrázek 2). V rozsahu hořlavosti směsí vodíku se vzduchem se zápalná energie liší takřka o tři řády.



Obrázek 1. Hodnoty MIE vodíku a ostatních paliv.

Jak je znázorněno na obrázku 2, 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 zápalných zdrojů. K zapálení směsi, která se blíží stechiometrickému složení, je zapotřebí méně energie.



Obrázek 2. Závislost zápalné energie na koncentraci paliva (vodíku, propanu nebo metanu) ve vzduchu [8].

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

Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

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 % [9].

4.2 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 [10]. 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 [11]. Teplota vznícení proudu horkého vzduchu činí 670 °C [12].

4.3 Difuzní zapálení

Fenomén difuzního zapálení vypočítali Wolanski a Wojcicki [13], 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.

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 [13] o takzvaném „mechanismu difuzního zapálení“, jak je popsáno v kapitole 3.5. Experimentální 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 průtržným 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.

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 [14]:


- 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 [15].

6.2 Prevence zapálení jiskrou elektrostatického výboje

Vodík patří do skupiny hořlavých plynů IIC. Evropský Výbor pro normalizaci v elektrotechnice [16] 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 ²		
	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 [4]. 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 [4].

Různé pokyny, například [17] a [18], popisují metody prevence vzniku a hromadění náboje, jakož i prevenci elektrostatického výboje, jak to vyžaduje norma ATEX [19]. 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 [19].

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 mm² 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 \[20\]](#). 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 [15]. 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 [15]:

- 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 [15]:

- 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, e-kniha k bezplatnému stažení.
4. 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].
5. Bond, J (1991). Sources of ignition: flammability characteristics of chemicals and products (Zdroje zapálení: hořlavost chemických látek a výrobků). Oxford: Butterworth Heinemann.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
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. BRHS, Dvouletá zpráva o bezpečnosti vodíku (2009). Evropská síť excelence „Bezpečnost vodíku jako nosiče energie“ (NoE HySafe). K dispozici na adrese: www.hysafe.org [přístup k datu 23.11.2020].

Přednáška 8: Zdroje a prevence zapálení

11. 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).
12. 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].
13. 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.
14. 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].
15. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering (Zásady vodíkového bezpečnostního inženýrství). Disertační práce. Ulsterská univerzita.
16. 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.
17. NFPA (2000). Doporučené postupy pro statickou elektřinu. 77.
18. British Standards Institution. 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.
19. 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).
20. IEC, Elektrická zařízení pro výbušnou plynnou atmosféru – Část 0: Všeobecné požadavky EN60079-0 (2006).