DETEKCE A MĚŘENÍ KONCENTRACE METANU A VODÍKU PŘI DOPRAVĚ A VYUŽITÍ SMĚSÍ VODÍKU A ZEMNÍHO PLYNU

Matěj Mašín, Daniel Maxa

Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav udržitelných paliv a zelené chemie, Technická 5, Praha 6
e-mail: masinm@vscht.cz

Článek shrnuje aktuální trendy ve výzkumu a vývoji detekčních mechanismů a odpovídajících zařízení pro směsi vodíku a zemního plynu. Článek se specificky zaměřuje na principy využitelné pro detekci nebo stanovení koncentrace hořlavých plynů současně s vodíkem v různých aplikacích. Jedná se o zařízení využívaná v provozech tranzitu a distribuce zemního plynu, u koncových spotřebitelů (domácnosti, průmyslová energetická zařízení), a zařízení používaná složkami integrovaného záchranného systému (IZS), u nichž je prioritou rychlá a přesná detekce bez vlivu křížové kontaminace. Článek poskytuje ucelené zhodnocení současného normativního rámce, především technických norem pro testování detekčních zařízení, a popisuje hlavní technologie stanovení plynů (katalytické, elektrochemické, polovodičové a optické senzory) z pohledu využitelnosti pro jednotlivé účely. U každé z metod jsou diskutovány principy funkce, současné technické a materiálové inovace a jejich limity týkající se selektivity, citlivosti a energetické náročnosti při aplikaci v komplexních plynných směsích.

Klíčová slova: vodík; zemní plyn; bezpečnost; detekce

Došlo 31. 8. 2026, přijato 25. 9. 2026

1. Úvod

V kontextu klimatických změn, globálního úsilí o dekarbonizaci a nutnosti plnění emisních cílů (například v rámci iniciativy European Green Deal) se do popředí dostává využití obnovitelných zdrojů energie (OZE). Jelikož výroba elektrické energie pomocí zdrojů, jako jsou větrné či fotovoltaické elektrárny, podléhá výrazným a často obtížně predikovatelným fluktuacím ve výkonu, vyvstává nutnost vybudovat spolehlivá velkokapacitní úložiště energie. Přímé ukládání do bateriových systémů je technologicky i ekonomicky limitováno. Z tohoto důvodu se jako alternativní a lépe škálovatelná strategie jeví konverze přebytků elektrické energie pomocí elektrolýzy vody na zelený vodík, který může být následně přimísen k zemnímu plynu. Tento koncept umožňuje relativně snadné využití přebytků elektrické energie z obnovitelných zdrojů bez nutnosti technicky a energeticky náročné akumulace [1]. Tento způsob využití energetických zdrojů s proměnlivým výkonem však s sebou nese problém variabilního složení plynu v distribuční síti. Zavádění směsí vodíku se zemním plynem (Hydrogen Enriched Natural Gas, HENG) v koncentračních rozsazích, obvykle uvažovaných mezi 5-20 % (V/V), tak přináší technologické a bezpečnostní výzvy související s proměnlivými vlastnostmi těchto směsí při různých koncentracích vodíku [2]. Fyzikálně-chemické vlastnosti a chemie procesu spalování a šíření plynů se po příměsi vodíku významně mění, s čímž se pojí i změna požárně-technických charakteristik. Mezi významně odlišné parametry lze řadit i základní požárně-technické charakteristiky, jako jsou meze výbušnosti či minimální iniciační energie [3, 4].

Zařízení a technické prostředky, stejně jako bezpečnostní opatření v provozech tranzitu, distribuce a spotřeby plynu jsou v současné době optimalizována pro zemní plyn, jehož hlavní složkou je metan, bez příměsi vodíku. Je třeba zmínit, že v minulosti byl pro domácnosti i energetické využití vyráběn a přepravován svítiplyn, tedy plynná směs obsahující především vodík, oxid uhelnatý a metan. Lze tedy konstatovat, že zkušenosti týkající se plynu s obsahem vodíku existují. Nicméně svítiplyn byl již před relativně dlouhou dobou nahrazen právě zemním plynem. Například v ČR probíhala tato záměna již od r. 1969 a definitivně byla ukončena v r. 1996. Od té doby proběhl v technické oblasti týkající se zařízení pro přepravu, distribuci, měření apod. značný pokrok, takže tyto zkušenosti jsou dnes využitelné jen v omezené míře. To se pak týká zejména zařízení pro detekci a měření koncentrace hořlavých plynů.

S nástupem HENG směsí se ukazuje, že komerčně dostupné detektory, které jsou určeny pro zařízení a prostředí s přítomností zemního plynu, mohou selhávat, neboť jejich kalibrace a detekční mechanismy s přítomností vodíku v plynu nepočítají [5].

Cílem tohoto článku je sjednotit a popsat aktuální trendy ve výzkumu a vývoji detekčních mechanismů, které jsou běžně využívány ve dvou výše zmíněných sférách. Jedná se o katalytické, elektrochemické, polovodičové a optické metody stanovení.

2. Oblasti využití zařízení pro detekci a analýzu hořlavých plynů

Parametry a očekávání od analyzátorů či detektorů závisí na jejich koncovém využití, obecně je lze rozdělit do dvou kategorií, a to na technologické a bezpečnostní využití. Velmi přesné analyzátory jsou vyžadovány například v průmyslových využitích při kontrolách

kvality dodávaného plynu nebo pro sledování bezpečného prostoru a těsnosti zařízení. Příkladem může být sledování úniku směsi CO/H_2 při Fischer-Tropschově syntéze, kdy vodík a oxid uhelnatý se vyznačují křížovou citlivostí a je nutné se věnovat vlivu oxidu uhelnatého, metanu a oxidu uhličitého na detekci vodíku [6, 7]. Druhou skupinou se specifickými požadavky jsou jednotky IZS, pro které je potřebné zajistit přesnou a rychlou detekci potenciálního nebezpečí. Za problémové situace v místě zásahu lze považovat kontaminaci CO/H_2 způsobenou únikem HENG a nedokonalým spálením, vliv teploty na nepřesnost stanovení či působení katalytických jedů. Detektory musí zároveň splňovat požadavky z hlediska praktičnosti (svítivost displeje, dostatečně robustní kryt, váha, manipulace v rukavicích, doba odezvy atd.). Pro domácí instalace mezi primární požadavky patří dlouhodobá autonomní stabilita bez nutnosti časté kalibrace, nízká pořizovací cena a odolnost vůči běžným chemikáliím používaným v domácnosti [8, 9]. Jejich očekávaná životnost se pohybuje v rozmezí 5-10 let [10].

3. Metody a zařízení pro zkoušení detekce a analýzy hořlavých plynů

Normativním rámcem pro testovací zařízení, testování a parametry detektorů jsou mezinárodní normy. Pro detekci vodíku existuje průmyslová norma ISO 26142, popisující jak definice a měření stanovovaných parametrů, tak minimální požadavky na zařízení určená k měření. Obecně pro hořlavé plyny je platná evropská norma EN 60079-29, kde nejdůležitější části jsou EN 60079-29-1, shrnující požadavky na vlastnosti a metody zkoušení, a EN 60079-29-2, shrnující výběr, instalaci a údržbu. Výše zmíněné normy popisují primárně průmyslové využití. Pro hodnocení a testování zařízení pro domácnosti a komerční využití existuje evropská norma EN 50194, která určuje chování běžných domácích hlásičů úniku plynu.

Technická norma ISO 26142 představuje metodický rámec pro testování stacionárních detektorů vodíku. Její primární rolí je sjednocení definic, způsobu měření klíčových parametrů a stanovení minimálních technických požadavků na testovací zařízení.

Pro realizaci zkoušek norma popisuje dva referenční postupy měření. Prvním je použití statické komory s minimálním vnitřním objemem 30 dm^3. Komora musí být plynotěsná a musí obsahovat ventilátor pro homogenizaci vnitřní směsi s minimálním průtokem 0,5 m^3/s. Tento ventilátor je pro samotný odečet hodnot odstaven, a to z důvodu eliminace vlivu proudění na senzor. Pro přesné měření doby odezvy je v tomto uspořádání využito malé uzavřené měřicí schránky umístěné přímo ve statické komoře, kdy jejím mechanickým otevřením je detektor skokově vystaven definované koncentraci analytu.

Druhou variantou je průtočná metoda, kdy zkušební plyn je kontinuálně přiváděn k senzorům v sériovém nebo paralelním zapojení. Tento systém je vybaven hmotnostními průtokoměry a zpětnými regulátory tlaku. Volba mezi sériovým a paralelním zapojením je závislá na povaze funkce detektorů (zda dochází ke spotřebě analytu). Norma mezi výhody průtočné metody uvádí možnost automatizace systému, schopnost simulovat průtočné aplikace a nabízí přesnou manipulaci s fyzikálními parametry proudu plynu (tlak, teplota atd.). Nedokáže ale plně simulovat reálné podmínky pasivní difúze v otevřeném prostoru a v případě sériového zapojení vyžaduje implementaci referenčních senzorů na vstupu a výstupu kvůli potenciálnímu úbytku vodíku.

ISO 26142 obsahuje výčet různých testovacích zkoušek. Pokud není stanoveno jinak, zkoušky probíhají za teplot 15-25 °C (±2 °C), tlaku 100 kPa (±1 kPa) a relativní vlhkosti 20-80 % (±10 %). Standardní zkouška odezvy představuje výchozí bod pro evaluaci senzoru, při níž je zařízení nejdříve stabilizováno v čistém vzduchu a následně je vystaveno kalibračnímu plynu o definované koncentraci, zpravidla ve středu hodnoceného měřicího řádu. Na tuto zkoušku přímo navazují zkoušky stability přístroje. Krátkodobá opakovatelnost se ověřuje pětinásobnou střídavou expozicí zkušebního plynu (150 s) a čistého vzduchu (300 s). Dlouhodobá stabilita vyžaduje tříměsíční kontinuální provoz zařízení v čistém vzduchu s pravidelnými dvoutýdenními intervaly kontrolního měření s definovanou maximální povolenou odchylkou. Odolnost senzorů vůči environmentálním faktorům je testována simulací extrémních provozních podmínek. Vliv kolísání atmosférického tlaku se hodnotí měřením při 80 kPa a 110 kPa s referenční hodnotou stanovenou při 100 kPa. Obdobně zkouška vlivu vlhkosti porovnává odezvy senzoru při relativní vlhkosti 20 % a 80 % vůči referenčním 50 % při udržované konstantní teplotě 40 °C.

Zásadním parametrem pro spolehlivost stanovení v komplexních atmosférách je selektivita. Během zkoušky selektivity je senzor individuálně vystaven interferujícím plynům, jmenovitě metanu, isooktanu a oxidu uhelnatému. Výsledná indikace nesmí překročit 10 % signálu odpovídajícího standardní zkoušce odezvy na vodík. Odolnost vůči trvalému poškození povrchu specifikuje zkouška otravy. Detekční aparatury jsou vystaveny po dobu 60 minut působení hexamethyldisiloxanu (HMDS), oxidu siřičitého, sulfanu a oxidu dusičitého v normovaných koncentracích. Po následném 60minutovém zotavení v čistém vzduchu se provádí standardní zkouška odezvy, jejíž odchylka oproti stavu před expozicí nesmí přesáhnout ±20 %.

V návaznosti na normované podmínky Zahaba et al. [11] vyvinuli testovací zařízení jako nákladově efektivní alternativu k finančně náročným komerčním systémům. Známá koncentrace H_2 v plynu je zajištěna injektáží čistého vodíku plynotěsnou stříkačkou do objemu komory a homogenizace směsi je zajištěna ventilátorem.

Boon-Brett et al. [12] vyvinuli vlastní testovací zařízení, kde žádaná koncentrace vodíku je zajištěna pomocí průtokoměrů a výsledné složení je kontrolováno analytickou koncovkou (plynová chromatografie). Samotná zkušební komora má objem 2,4 dm^3 a má

dvojitý plášť, který slouží k eliminaci teplotních výkyvů. Za výstupem ze zkušební komory probíhá měření relativní vlhkosti a následně kontrolní měření složení plynné směsi. Tento systém umožňuje měření až šesti detektorů současně, čímž lze zajistit identické podmínky pro následné porovnání. Samotné výkony detektorů byly měřeny dle protokolu IEC 61779-1. Stejné zařízení pro výzkum využívali i Palmisano et al. [7] pro evaluaci selektivity vodíkových detektorů.

4. Dělení a klíčové parametry senzorů pro měření HENG

Senzory pro měření hořlavých plynů lze dělit dle jejich principu stanovení či dle jejich koncového využití na domácí detektory, detektory pro IZS, průmyslové detektory (bezpečnostní i procesní) a laboratorní analyzátory. Každá tato sféra má svá specifická omezení a nároky na klíčové parametry, jako jsou citlivost, selektivita či doba odezvy, které předurčují volbu optimální technologie pro daný účel. Dále lze senzory klasifikovat dle jejich umístění, a to na stacionární či mobilní, přičemž mobilní řešení se týkají primárně osobních detektorů a nástrojů využívaných IZS.

4.1. Klíčové parametry senzorů

Pro správnou volbu a spolehlivou funkci detekčních systémů je nutné zohlednit řadu technických a provozních kritérií. Mezi důležité parametry patří:

- Měřicí rozsah: Senzory musí spolehlivě pokrývat relevantní koncentrace stanovovaných látek. Pro výbušné či hořlavé směsi je vhodné sledovat jejich koncentraci v rozsahu 0-100 % dolní meze výbušnosti.
- Citlivost a dolní detekční limit: Schopnost detekovat i velmi nízké koncentrace plynu je klíčová pro zaznamenání potenciálního nebezpečí a poskytnutí časového prostoru pro vyhodnocení situace.
- Selektivita: Definuje schopnost senzoru specificky stanovit obsah sledované látky bez přílišné křížové citlivosti vůči jiným složkám atmosféry. Nízká selektivita vede k odchylkám od reálných hodnot a k nežádoucím falešným poplachům.
- Doba odezvy: Rychlá reakce senzoru na skokovou změnu koncentrace je zásadní pro limitaci škod a minimalizaci rizik bezprostředně po vzniku úniku.
- Stabilita signálu a šum: Stabilní výstup s nízkým šumem je významný především při měření nízkých koncentrací. V případě vysokého šumu hrozí ztráta slabého signálu, což může zabránit včasnému spuštění varovných mechanismů.
- Robustnost a odolnost vůči okolním vlivům: Schopnost poskytovat stabilní odečet hodnot za různých teplot, kolísající vlhkosti či proměnlivé rychlosti proudění vzduchu představuje kritický parametr pro dlouhodobou provozní spolehlivost.
- Náklady a spotřeba energie: Energetická náročnost je limitující zejména pro mobilní zařízení. Vysoká spotřeba vede k nutnosti kompromisu mezi krátkou provozní výdrží a integrací velkého a těžkého akumulátoru. Pořizovací cena je pak určující pro plošné nasazení.
- Kalibrace a údržba: Periodicita a technologická náročnost kalibrace zásadně ovlivňují náklady na provoz během životního cyklu detektoru. Složitá nebo příliš častá potřeba kalibrace je z provozního i ekonomického hlediska vysoce nežádoucí.

Mezi hlavní požadavky na domácí detektory patří nízká cena, minimální nároky na periodickou kalibraci a dostatečná, byť relativně nízká selektivita. V kontextu HENG směsí je důležité zohlednit vliv vodíku na výstupní signál detektoru, kdy může docházet k pozdnímu upozornění na nebezpečnou koncentraci. Detektory pro IZS musí vykazovat vysokou robustnost, citlivost, selektivitu a rychlost odezvy.

U průmyslového využití závisí požadavky na tom, zda se jedná o kontinuální stanovení složení či měření úniku. Pro kontinuální stanovení složení je důležitá citlivost, selektivita, přesnost a robustnost. Pro měření úniku je důležitým parametrem například rychlost odezvy. Pro laboratorní analyzátory je důležitý měřicí rozsah, citlivost, selektivita či stabilita signálu, naopak klesá potřeba robustnosti a rychlosti odezvy. Kompletní výčet požadavků je znázorněn v tabulce 1.

4.2. Katalytické senzory

Katalytické senzory využívají silně exotermní katalytické spalovací reakce, při které je měřeno uvolněné spalné teplo. Tyto reakce musí nezbytně probíhat v přítomnosti přebytku kyslíku za podmínek vysoké rychlosti reakce a stupně přeměny posunutého směrem ve prospěch produktů.

Katalytické detektory dělíme do dvou skupin, a to podle principu stanovení. První skupinou jsou pellistorové detektory, které fungují na principu změny teploty na pellistoru – keramickém tělísku, na jehož povrchu dochází ke katalytické oxidaci sledované látky, čímž se zvyšuje jeho teplota a následně mění elektrický odpor, který odpovídá koncentraci hořlavých látek ve směsi. Výstupní signál pellistorového senzoru je lineárně závislý na koncentraci a jeho horní mez rozsahu je určena dolní mezí výbušnosti směsi. Problémem je neselektivní detekce, jelikož detektor reaguje na všechny hořlavé plyny. Měření ovlivňují inhibitory, mezi které lze zařadit halogeny, organické halogenderiváty a oxid siřičitý. Problémem jsou i katalytické jedy, například silikony, alkyl-olovnaté sloučeniny nebo fosfáty. Tyto látky se nevratně sorbují na povrchu senzoru a zůstává mnohem méně reakčního prostoru pro katalytickou oxidaci vodíku nebo uhlovodíků [5, 13-15].

Druhou skupinou jsou termoelektrické detektory, u kterých probíhá měření pomocí Seebeckova jevu a měřenou veličinou je generované elektrické napětí. Výhoda termoelektrických senzorů oproti pellistorovým je jejich schopnost pracovat za nižších pracovních teplot (pellistory až 500 °C, termoelektrické senzory od pokojové teploty do 150 °C), díky čemuž termoelektrické detektory mají nižší energetickou spotřebu.

Tab. 1 Požadavky na detektory a analyzátory hořlavých plynů v různých aplikačních oblastech
Tab. 1 Requirements for Flammable Gas Detectors and Analyzers in Various Application Fields

Parametr	Aplikační oblast			
	Domácnosti	IZS	Průmysl	Laboratoř
Měřicí rozsah	0-20 % LEL	0-100 % LEL	Únik: 0-100 % LEL Analýza: 0-100 % obj.	0-100 % obj.
Citlivost	Nízká	Střední až vysoká	Únik: střední Analýza: vysoká	Extrémní
Hodnota LOD	Střední	Nízká	Únik: nízká Analýza: velmi nízká	Extrémně nízká
Selektivita	Nízká	Střední	Únik: střední Analýza: vysoká	Vysoká
Doba odezvy	Pomalá	Velmi rychlá	Únik: rychlá Analýza: pomalá	Velmi pomalá
Přesnost	Orientační	Dostatečná pro zásah	Únik: střední Analýza: vysoká	Vysoká
Stabilita signálu	Střední	Vysoká	Vysoká	Vysoká
Robustnost	Nízká	Extrémní	Vysoká	Nízká
Výrobní náklady	Nízké	Střední až vysoké	Vysoké	Extrémní
Provozní náklady	Nízké	Nízké až střední	Střední až vysoké	Vysoké
Kalibrace a údržba	Minimální/žádná	Vysoce náročná	Pravidelná údržba	Kontinuální
Umístění	Stacionární	Mobilní	Stacionární	Stacionární

Při teplotě okolí nedochází ke katalytické oxidaci konkurenčních plynů, čímž je dosaženo vysoké citlivosti a selektivity pro detekci vodíku [5, 13, 14, 16]. Karelin et al. [17] navrhli postup pro přesnější měření koncentrace neznámých hořlavých plynů, který řeší vysoké odchylky senzorů kalibrovaných na metan. Podstatou metody je využití pulzního zahřívání senzoru na různé provozní teploty, jelikož každý plyn vykazuje v difúzní zóně hoření jiný pokles citlivosti při zvýšení teploty. Změřením odezvy při standardní teplotě (430-450 °C) a následně při zvýšené teplotě (470-490 °C) algoritmus vypočítá specifický korekční faktor. Metoda navíc zahrnuje referenční měření při nízké teplotě (100-110 °C), které umožňuje stanovení obsahu vodíku ve směsi. Aplikací těchto korekcí, uložených v paměti přístroje, došlo k poklesu chyby měření pod 10 % pro většinu testovaných látek (metan, propan, butan, hexan, vodík). Výjimkou byl pouze propan u jednoho z katalytických senzorů, kde chyba dosáhla 10,9 %.

Katalyzátory obsahující kovy platinové skupiny jsou nejrozšířenější a nejslibnější pro použití v katalytických senzorech díky své vysoké aktivitě při 400–500 °C, což odpovídá teplotnímu rozsahu, v němž je možné použít platinové ohřívače jak ve formě volně zavěšených spirál (katalytické senzory typu pellistor), tak ve formě meandrů rozložených na základní vrstvě (nebo membráně) pomocí technologie tlustých nebo tenkých vrstev [18-20].

Ze skupiny platinových kovů se nejčastěji využívá kombinace Pd-Pt, která má vyšší účinnost než katalyzátory na bázi pouze jednoho kovu [16, 21]. Použitelnost katalytických senzorů s mikroohřívací deskou na bázi porézních anodických Al_2O_3 nosičů pro detekci metanu prokázali Roslyakov et al. [18], kteří pro zajištění aktivity zabudovali bimetalické katalytické nanočástice Pd-Pt.

Wu et al. [22] pro stanovení vodíku a oxidu uhelnatého aplikovali katalyzátor na bázi Ru naneseného na zeolitu. Pro tento katalyzátor se intenzivní signál pro vodík se nachází při pracovní teploty 167-172 °C při dopování Ru v rozmezí 0,5-5 %, což z hlediska energetické náročnosti odporového ohřevu představuje přívětivější podmínky oproti katalytickým senzorům s pracovní teplotou v rozmezí 350-500 °C. Wang et al. [23] dosáhli snížení pracovní teploty 150 °C při využití Pt nanesené na zeolitu pro stanovení vodíku a oxidu uhelnatého, přičemž za této teploty nedocházelo k interferenci metanu ani jiných těkavých organických sloučenin. Lashkov et al. [24] vyvinuli multisenzorový čip pro analýzu plynů založený na monolitických katalytických prvcích.

Zhang et al. [25] navrhli metodu identifikace plynů založenou na jediném katalytickém senzoru hořlavých plynů, který je vystaven ultrazvuku a pracuje ve svém lineárním rozsahu. Každý hořlavý plyn vykazuje jiný ultrazvukový zesilovací efekt *k*, pomocí kterého je následně možné identifikovat přítomné látky. Ultrazvukový zesilovací efekt *k* kvantifikuje fyzikální jev, při kterém akustické pole zvyšuje odezvu katalytického senzoru a je definován jako poměr odezvy senzoru vystaveného ultrazvuku ku odezvě senzoru za normálních podmínek bez ultrazvuku. K zesílení signálu dochází díky hnacímu účinku akustického tlaku, který efektivněji dodává molekuly cílového plynu k povrchu, čímž podporuje a katalyzuje spalovací reakci.

Somov et al. [26] vyvinuli metodu pro stanovení úrovně výbušnosti vícesložkových směsí uhlovodíkových plynů s neznámým složením. Metoda využívá skutečnosti, že i když se standardní spalné teplo a dolní mez výbušnosti u různých uhlovodíků liší, jejich vzájemný součin dává u většiny z nich podobné výsledky. Pomocí specifických napěťových pulzů je uvnitř senzorů s fixním objemem plynu vyvolána oxidace. Změřením celkového uvolněného tepla během této reakce lze přímo odvodit, jak blízko je aktuální koncentrace směsi k dolní mezi výbušnosti, aniž by bylo nutné identifikovat její jednotlivé složky.

4.3. Elektrochemické senzory

Z hlediska principu fungování se elektrochemické senzory primárně dělí na potenciometrické, amperometrické a kombinované amperometricko-potenciometrické [5, 27]. Potenciometrické senzory, zahrnující rovnovážné (Nernstova typu) a nerovnovážné (se smíšeným potenciálem), měří mezi elektrodami napětí, které logaritmicky závisí na koncentraci zkoumaného plynu [5, 14, 27, 28]. U rovnovážných senzorů vzniká měřené elektromotorické napětí díky gradientu parciálních tlaků vodíku mezi referenční a měřicí komorou. Amperometrické senzory fungují na principu lineární závislosti mezi limitním proudem, který je vyvolán externě vloženým napětím, a koncentrací vodíku [14]. Hlavní výhodou těchto amperometrických detektorů je skutečnost, že pro svůj provoz nevyžadují referenční atmosféru, což v mnoha případech zvyšuje jejich spolehlivost a usnadňuje kalibraci [27]. Kombinované senzory následně využívají dva elektrochemické články – jeden v amperometrickém a druhý v potenciometrickém režimu – čímž je dosaženo ještě vyšší spolehlivosti detekce ve složitých atmosférách. Materiálový výzkum těchto zařízení se soustředí zejména na slibné protonové vodiče, jako jsou materiály na bázi $BaCeO_3$ a $BaZrO_3$, které nabízejí vysokou iontovou vodivost a chemickou stabilitu v náročných průmyslových podmínkách [27, 29].

V elektrochemických zařízeních je nejdůležitější složkou elektrolyt. Existují dva hlavní typy elektrolytů pro elektrochemické senzory pro detekci metanu, a to kapalné a pevné elektrolyty. Mezi kapalné elektrolyty patří vodné (H_2SO_4, NaClO) a elektrolyty na bázi iontových kapalin [29]. Iontové kapaliny (ionic liquids, IL) si v poslední době získaly pozornost při vývoji plynových senzorů, protože jejich jedinečné vlastnosti vyplňují mezery, které zanechaly vodné elektrolyty (aqueous electrolytes, AE) [29]. Iontové kapaliny (Room-Temperature Ionic Liquids, RTIL) jsou při pokojové teplotě kapalnými solemi a nacházejí stále častější uplatnění v moderních konstrukcích plynových senzorů, jelikož obcházejí extrémní podmínky vyžadované pro určité oxidační procesy detekce metanu [30, 31]. Mezi důležité vlastnosti RTIL patří zanedbatelný tlak par, vysoká tepelná stabilita, vyšší hustota než voda, dobré elektrochemické okno (rozmezí elektrochemického napětí, ve kterém je daná látka elektrochemicky stabilní a nepodléhá vlastnímu rozkladu), vysoká iontová vodivost, vysoká polarita a jedinečná struktura a interakce iontů [29, 32]. RTIL jsou bezpečnější než běžné kyselé elektrolyty používané v systémech s vodným elektrolytem, což z nich činí skvělé kandidáty pro širokou průmyslovou výrobu a použití. Výroba elektrochemických senzorů s RTIL však stále čelí některým problémům, jako je potenciální únik kapaliny ze senzoru a pomalá difúze plynu způsobená kapalinou vyplňující póry [33].

V posledních desetiletích bylo vyvinuto několik pevných materiálů, které vykazují významnou iontovou vodivost a téměř zanedbatelnou elektronovou vodivost [29, 34]. Jako pevné elektrolyty lze použít oxidy kovů, anorganické soli a dopované polymery, protože vykazují významnou iontovou vodivost v dostatečně širokém teplotním rozmezí [29]. Sekhar et al. [35] vyvinuli senzor založený na smíšeném potenciálu, který využívá oxid india dopovaný cínem, platinové elektrody a elektrolyt z oxidu zirkoničitého stabilizovaného yttriem (YSZ) pro detekci metanu. Gross et al. [36] popsali výrobu a testování voltametrického senzoru využívajícího pevný elektrolyt Nafion, který je schopen fungovat v plynném prostředí při pokojové teplotě. Bylo prokázáno, že senzor je schopen detekovat metan, kvantifikovat jeho koncentraci v proudu plynu a odlišit jeho obsah od obsahu oxidu uhelnatého. Iontovou membránu Nafion 117 a platinou katalyzovanou elektrodu také využívají Rimbu et al. [37] pro detekci vodíku až do 20 % ve směsi s Ar. Elektrolyty na bázi YSZ jsou běžně využívány pro detekci vodíku. Dosi et al. [38] vyvinuli amperometrický senzor metanu pracující při pokojové teplotě, v němž byly porézní elektrody z laserem indukovaného grafenu (LIG) integrovány do polymerních filmů s disperzí nanočástic palladia za účelem distribuce elektrokatalyzátoru v nosiči s velkou povrchovou plochou. Fauzi et al. [39] vytvořili potenciometrický senzor vodíku na bázi uhlíku, který využívá membránu z oxidu grafenu spojenou se snímací elektrodou vyrobenou z WO_3 a redukovaného oxidu grafenu s dobrou stabilitou a selektivitou.

Mezi největší výhody elektrochemického senzoru vodíku s pevným elektrolytem patří vysoká citlivost, dobrá přesnost, rychlé a nepřetržité monitorování, jednoduchá konstrukce a využití elektronických řídicích zařízení [40]. Ve srovnání s optickými a katalytickými senzory jsou jeho výhody v podobě nízkých nákladů a nízké spotřeby energie velmi konkurenceschopné. Z hlediska aplikací mají elektrochemické senzory vodíku na bázi pevné fáze širší spektrum použití než senzory odporového nebo katalytického typu, například v rychlých reaktorech, které mohou pracovat v prostředí bez kyslíku. Mezi současná zlepšení výkonu elektrochemických senzorů patří schopnost detekovat vodík v nízkých koncentracích, čehož lze dosáhnout změnou mikrostruktury elektrod a elektrolytů, například pomocí nanoelektrod, které mohou urychlit adsorpci a rozklad vodíku. Pro zlepšení detekčního výkonu lze změnit tloušťku elektrody nebo podmínky slinování.

Slitiny platiny představují rovněž snadný způsob, jak zlepšit katalytický účinek a snížit cenu senzoru. Některé studie ukázaly, že slitina Pt/Pd je dobrou volbou pro zlepšení výkonu senzoru [41].

4.4. Polovodičové senzory

Základním principem polovodičových detektorů (Metal-Oxide-Semiconductor, MOS) je interakce kovové matrice s kyslíkem a následně s detekovaným plynem. Chemická reakce, která probíhá na povrchu senzoru, vede ke změně koncentrace náboje, přičemž koncentrace nosičů náboje ve vrstvě je regulována přítomností elektronů nebo děr. Podle definice dělíme materiály na polovodiče typu N a typu P. V materiálech typu N jsou primárními nosiči náboje volné elektrony. Pro polovodiče typu P jsou primárními nosiči náboje díry [14, 42]. Obvykle se vrstva oxidu kovu nanáší na izolační substrát mezi dvěma elektrodami. Jako substrát se často volí Al_2O_3 díky jeho vysokému elektrickému odporu, tepelné stabilitě a schopnosti mnoha oxidů kovů na něm účinně ulpívat [14]. Oxid lze na substrát nanést jako silnou vrstvu pomocí sítotisku s následným tepelným zpracováním za účelem slinování, nebo jako tenkou vrstvu pomocí procesů depozice v plynné fázi [14]. Křemíkové technologie jsou vyspělejší a výroba membrán na bázi oxidu nebo nitridu křemíku je snadnější než výroba Al_2O_3 vrstvy [16, 43]. Aby se však vyrovnaly koeficienty tepelné roztažnosti platiny a membrány a snížilo se tepelné namáhání, je nutné vyrábět vícevrstvé membrány [16].

Citlivá vrstva nebo prvek plynových senzorů se skládá z oxidu (SnO_2, ZnO, MoO_3 atd.) nebo organických polovodičů (metaloporfyriny). V poslední době vzbudily zájem také citlivé prvky na bázi oxidů india a galia [16, 42, 44].

Mezi výhody polovodičových senzorů patří vysoká citlivost, vysoká rychlost činnosti, malé rozměry a nízké náklady na sériovou výrobu. Jejich hlavní nevýhodou je nízká selektivita, která omezuje jejich využití [14, 16]. Hlavním trendem ve vývoji MOS je proto zvýšení jejich selektivity při současném snížení spotřeby energie, což je nezbytné pro autonomní detektory plynů, zejména pro bezdrátové senzorové sítě [16, 42]. Pro zvýšení selektivity je využíváno aktivních či pasivních filtrů. Pasivní filtry jsou hojně využívány v komerčním sektoru a fungují na principu fyzikální sorpce. Pro polovodičové senzory plynu byl navržen mikrofiltr integrovaný do čipu. Tento mikrofiltr je vyroben z porézní keramiky z oxidu hlinitého, jejíž povrch je pokryt platinou [16, 45].

Mukherjee et al. [46-48] vyvinuli ultracitlivý senzor vodíku pomocí elektrostaticky vytvořeného křemíkového nanodrátu pokrytého nanočásticemi palladia. Práci původně zaměřenou na citlivou detekci vodíku následně rozvinuli o detekci metanu [48]. Shaposhnik et al. [49] vyvinuli senzor pro selektivní detekci vodíku ve směsi s metanem, ve kterém využívají Pt/PdO nanesené na SnO_2. Dále také vyvinuli senzor pro selektivní detekci CO a H_2 [50]. Tradiční MOS senzory vyžadují provoz při teplotách vyšších, než je pokojová teplota, přičemž hlavním zdrojem spotřeby energie jsou topná tělesa. Tato zařízení představují také bezpečnostní rizika v souvislosti s detekcí hořlavých a výbušných plynů, stejně jako další problémy, jako je časově náročné předehřívání a značné tepelné ztráty materiálu [51]. Z tohoto důvodu je pozornost také věnována detekci za pokojové teploty. Pro detekci H_2 jsou využity 3D nanomateriálové kompozitní stuktury. Mezi ně patří například 3D kompozitní aerogel z In_2O_3-rGO-PPy – ternární hybridní nanokompozit složený z oxidu india (In_2O_3), redukovaného oxidu grafenu (rGO) a polypyrrolu (PPy). Tyto typy pokročilých kompozitních materiálů jsou určeny nejen pro konstrukci chemorezistivních plynových senzorů, ale také superkondenzátorů apod. Díky spojení oxidu kovu, uhlíkatého nanomateriálu a vodivého polymeru vykazuje tato matrice pokročilé synergické chemické a elektrické vlastnosti. Díky tomu byl získán senzor, který reaguje na koncentraci 1000 ppm H_2 s dobou odezvy 13 s [52]. Pro detekci metanu byly vyvinuty různé směsi oxidů kovů [51]. Li et al. [53] využívají Pt dopovanou SnO_2/ZnO dvojvrstvu, Yang et al. [54] kompozit In_2O_3-ZnO na laserem indukovaném grafenu, Sun et al. [55] mikrokuličky AuAg/ZnO aktivované UV zářením a Li et al. [56] nanotyčinky ZnO s kombinovaným dopováním Ag a Ru.

4.5. Optické senzory

Optické metody detekce plynů představují v současné analytické a bezpečnostní praxi vysoce spolehlivou, ačkoli zpravidla investičně náročnější alternativu k tradičním elektrochemickým či katalytickým senzorům [57]. Jejich hlavní předností je bezkontaktní charakter měření, dlouhodobá stabilita signálu a naprostá imunita vůči katalytickým jedům, což významně prodlužuje jejich životnost a snižuje nároky na údržbu [16, 58, 59]. Tyto senzory vyhodnocují změny v interakci elektromagnetického záření s molekulami sledovaného analytu, nejčastěji na principu absorpce [16, 28]. V oblasti plynárenství, analýzy paliv a monitorování emisí se v současnosti dominantně uplatňují dvě klíčové technologie: nedisperzní infračervená spektroskopie (NDIR) a absorpční spektroskopie s laditelným diodovým laserem (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS). Vzhledem k tomu, že vodík v infračervené oblasti neabsorbuje, je k jeho detekci využíván modifikovaný optický přístup spočívající ve sledování změn optických vlastností specifických materiálů, například slitin palladia, oxidu wolframového nebo tantalu, k nimž dochází bezprostředně po jejich fyzikálně-chemické interakci s molekulami vodíku [60].

4.5.1 Infračervená absorpce

Při průchodu infračerveného záření plynem je jeho energie na vlnových délkách 1650, 2330 a 3300 nm [16] absorbována molekulami CH_4, což vede k odpovídajícímu snížení intenzity záření. Tento pokles se měří za účelem stanovení koncentrace metanu,

přičemž vztah mezi absorpcí záření a koncentrací plynu se řídí Lambert-Beerovým zákonem. V praxi bývají výsledky měření ovlivněny kolísáním intenzity světelného zdroje a změnami okolního prostředí. Tyto nežádoucí vlivy však dokáže efektivně eliminovat technologie dvoukanálové detekce [61]. Ta funguje na principu měření poměru výstupního signálu mezi měřicím a referenčním kanálem. Na oba kanály působí vnější podmínky identicky, poměrem signálů se vnější faktory vyruší a zůstává pouze čistá informace o koncentraci sledovaného plynu.

V poslední době bylo vyvinuto mnoho systémů detekce uhlovodíků založených na infračervené absorpční spektroskopii [62, 63]. Nejslibnějším směrem ve vývoji systémů pro analýzu plynů, určených ke kontrole koncentrací hořlavých plynů a par hořlavých kapalin pod dolní mezí výbušnosti, je metoda optické absorpce ve vlnovém rozsahu 3000–4000 nm, jelikož tento rozsah zahrnuje absorpční čáry většiny uhlovodíků [16, 64]. K detekci slabšího pásu v okolí 1650 nm je využito upravených laserových diod (např. DFB laserů) [65].

Velká pozornost je také věnována detekci více plynných komponent zároveň. Tan et al. [66] využívají NDIR pro detekci CH_4 pod mezí výbušnosti v kombinaci s CO a CO_2. Liu et al. [67] vyvinuli kompaktní NDIR senzor pro detekci šesti plynů (CO, CO_2, CH_4, H_2, NH_3, NO) do 4 % (V/V). Dong et al. [68] navrhli metodu měření CO, CO_2 a CH_4 za použití TDM techniky (Time-Division Multiplexing, multiplexování s časovým dělením). V navrženém senzoru je TDM využita k detekci výše zmíněných složek pomocí jediného sdíleného širokopásmového zdroje světla, což výrazně snižuje celkovou složitost a výrobní náklady přístroje. Princip spočívá v nasazení rotačního modulu, který pomocí krokového motoru postupně přepíná a přesně natáčí trojici specifických pyroelektrických detektorů do ohniska sférického zrcadla. Celý detekční cyklus trvá přibližně 10 sekund, přičemž systém v přesně definovaných časových oknech střídá krátkou mechanickou stabilizaci a samotné vyhodnocení koncentrace pro jednotlivé plyny. Pro vyšší koncentrace plynů obsažených ve spalinách v automobilovém průmyslu navrhli Xu et al. [58] systém s jedním širokopásmovým světelným zdrojem a čtyřkanálovým pyroelektrickým detektorem pro zajištění detekce více plynů zároveň.

4.5.2 Absorpční spektroskopie s laditelným diodovým laserem (TDLAS)

Technologie TDLAS představuje pokročilou metodu pro detekci stopových množství plynných látek, která je založena na fyzikálním principu detekce vycházejícího z Lambert-Beerova zákona. Tento přístup využívá laditelné diodové lasery, jejichž výstupní vlnová délka je plynule laděna, například prostřednictvím změn proudu nebo teploty, tak, aby přesně pokrývala specifické absorpční pásy měřeného plynu [69]. Mezi hlavní přednosti TDLAS patří především vysoká selektivita, přesnost a citlivost, ale také rychlá odezva a velmi silná odolnost vůči rušivým vlivům prostředí [70]. Díky pokračujícímu vývoji v oblasti polovodičových technologií se navíc uplatnění této metody rozšiřuje i do střední a daleké infračervené oblasti. Ta nabízí další spektrální otisky (specifická základní absorpční pásma), u nichž se cílové plyny vzájemně nepřekrývají a nepodléhají rušení okolní vlhkostí. To umožňuje vysoce účinné měření, které díky diferenciálnímu zpracování signálu efektivně eliminuje provozní šum a dosahuje vysoké stability s detekčními limity v řádech jednotek ppm [70].

Li et al. [70] shrnuje vliv podmínek měření na výsledný výkon zařízení. Mezi kritické podmínky řadí teplotu, tlak, fluktuaci intenzity laseru a drift vlnové délky. Změní-li se teplota měřeného plynu, mění se podle toho i tvar a intenzita absorpční spektrální čáry. Kromě toho se při změně teploty měřeného plynu mění také šířka absorpční čáry, což ovlivňuje absorpční koeficient, či poměr zastoupení izotopů [70, 71].

Pro aplikovatelnost v měřicích zařízeních je přesnost měření zásadní. Metody zvýšení přesnosti měření lze obecně rozdělit do tří kategorií: kompenzace faktorů ovlivňujících měření, automatická kalibrace a metody bez kalibrace. U kompenzace ovlivňujících faktorů je sledován vztah mezi těmito faktory a odchylkami měření, kdy cílem je vypracování kompenzačních rovnic, které dokáží zohlednit tyto faktory, a tím zvýšit celkovou přesnost měření. Duan et al. [71] provedli měření spektrálních charakteristik metanu za různých koncentrací a teplot, kdy následné vztahy vzhledem k absorpci záření byly vyjádřeny polynomiální regresí a globální lineární aproximací sdílených parametrů v rozsahu koncentrací metanu 1-15 % (V/V) a teplotním rozmezí 17-77 °C. Wang et al. [72, 73] navrhli pro plynové senzory metodu korekce ekvivalentního stavu, tedy takového stavu, při kterém je výstup senzoru teoreticky zcela nezávislý na kolísání teploty a tlaku. Tato metoda vychází z teorie stavového pozorovatele, efektivně kompenzuje vnější vlivy a zvyšuje přesnost systému tak, že chyba pro měření CH_4 a CO_2 zůstává pod hranicí 3 ‰ v různých environmentálních podmínkách. Stavový pozorovatel slouží k odhadu vnitřních, přímo neměřitelných stavů dynamického systému na základě jeho vstupů a výstupů. Dang et al. [74] navrhli systém s automatickou kalibrací využívající optický senzor v NIR oblasti pro měření CH_4. Automatický kalibrační proces využíval program v LabVIEW, který v nastavených cyklech kalibroval průměrovaný naměřeny WMS-2f signál vůči absolutní koncentraci metanu získané z modulu s přímou absorpční spektroskopií (Direct Absorption Spectroscopy, DAS. Z tohoto referenčního profilu se následně odvozovaly budoucí hodnoty koncentrace, což zajistilo vysokou správnost i opakovatelnost měření. Zhang et al. [75] vyvinuli metodu bez kalibrace, která využívá mikrosondový senzor CH_4. Senzor spojuje výhody přímé absorpční spektroskopie bez nutnosti kalibrace (Calibration-Free Direct Absorption

Spectroscopy, CF-DAS), která určuje koncentraci přímo výpočtem integrální plochy pod křivkou absorpčního signálu, a vysoce citlivé spektroskopie s modulací vlnové délky (Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS). Tato metoda umožňovala přepínat výstup senzoru podle bodu změny, kdy mikrokontrolér senzoru neustále zpracovává signál a počítá koncentraci oběma metodami současně. Při překročení prahové hodnoty (bodu změny) přepne mikrokontrolér na výstup CF-DAS, čímž eliminuje zkreslení z nelinearity. Wang et al. [76] navrhli metodu bez kalibrace založenou na vazbě druhého a čtvrtého harmonického pásu, kdy sledované jsou pouze výšky signálu, které jsou následně porovnány. Tímto způsobem dochází k eliminaci řady rušivých vlivů.

V rámci in-situ detekce stopových plynů, jako je metan, pomocí technologie TDLAS je klíčové překonat kompromis mezi kompaktními rozměry přístroje a dosažením velmi nízkých detekčních limitů, pro které je podmínkou dostatečně dlouhá optická dráha. Hardwarové inovace se tak soustředí zejména na vývoj miniaturizovaných cel s dlouhou optickou dráhou. Hudzikowski et al. [77] využili sférická zrcadla s hustým uspořádáním paprsků, přičemž tvar jejich optické dráhy (vytvářející astigmatický vzor) byl optimalizován pomocí genetického algoritmu. Chen et al. [78] navrhli metodu založenou na prostorových rovnicích pro návrh víceprůchodových optických cel, na jejímž základě sestavili kompaktní víceprůchodový článek s hustým rozložením bodů v sedmi prstencích. Hu et al. [79] vyvinuli plynovou celu s nastavitelnou dráhou. Při použití efektivní dráhy 64,5 m a DFB laseru na 1,653 μm dosáhl systém pro koncentraci 150 ml/m^3 CH_4 odstup signálu od šumu (SNR) 191. Z této hodnoty byl odvozen minimální detekovatelný limit (MDL) obsahu metanu na hodnotu 78 μl/m^3 (ppbv). Na softwarové úrovni detekční limit (DL) a poměr signálu k šumu (SNR) byly vylepšeny implementací pokročilých digitálních filtrů typu CEEMDAN-EP-WTD (Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise, Evaluation parameter, Wavalet Treshold Denoising) navržených Qiu et al. [80]. Metoda CEEMDAN-EP-WTD je pokročilý kompozitní algoritmus pro potlačení nelineárního šumu v TDLAS spektroskopii, který kombinuje adaptivní rozklad signálu, vzorkovou entropii, přesný odhad neznámého šumu pomocí vyhodnocovacího parametru a vlnkové prahování za účelem výrazného zvýšení přesnosti a poměru signálu k šumu. Tong et al. [81] implementovali adaptivní algoritmus VMD-SG (Variational Mode Decomposition-Savitzky-Golay filtering) pro zpracování surových dat a analyzovali vliv šířky spektrální čáry laseru na harmonickou detekci. Pro následnou konverzi a proložení signálů využili neuronové sítě s radiální bázovou funkcí namísto tradiční metody nejmenších čtverců, což výrazně zvyšuje přesnost a minimalizuje chybu v celém dynamickém rozsahu. Tabulka 2 shrnuje kompletní porovnání jednotlivých typů senzorů.

Tab. 2 Výhody a nevýhody jednotlivých typů senzorů hořlavých plynů
Tab. 2 Advantages and Disadvantages of Different Types of Flammable Gas Sensors

Typ senzoru	Hlavní výhody	Hlavní omezení pro HENG	Energetická náročnost	Odolnost vůči katalytickým jedům
Katalytický	Technologicky jednoduché, cena	Neselektivnost, degradace povrchu	Vysoká	Nízká
Elektrochemický	Vysoká citlivost, lineární odezva	Materiálová stabilita	Nízká	Střední
Polovodičový	Miniaturizace, cena	Nízká selektivita	Střední až vysoká	Střední
Optický	Selektivita, přesnost	Pořizovací cena, hardwarová náročnost	Nízká	Imunní

5. Závěr

Zavádění směsí zemního plynu a vodíku představuje nezbytný krok v procesu dekarbonizace energetického sektoru, přináší však specifické bezpečnostní výzvy vyžadující adekvátní inovace v oblasti detekčních technologií. Z rešerše vyplývá, že komerčně dostupné detektory navržené výhradně pro detekci metanu (resp. dalších plynných uhlovodíků) nedisponují dostatečnou selektivitou a spolehlivostí pro monitorování HENG směsí. Tento nedostatek je kritický zejména v autonomních aplikacích v domácnostech, jež vyžadují dlouhodobou stabilitu bez údržby, a při krizových zásazích integrovaného záchranného systému, kde je prioritou rychlá a nezávislá odezva.

Jednotlivé analytické přístupy vykazují kompromisy mezi pořizovacími náklady, energetickou náročností a provozní spolehlivostí. Katalytické senzory si nadále udržují své postavení díky technologické jednoduchosti, avšak narážejí na zásadní limity spojené s degradací povrchu vlivem katalytických jedů a neselektivnost vůči hořlavým plynům. Vývoj elektrochemických detektorů, urychlený aplikací pevných elektrolytů a iontových kapalin, poskytuje slibné výsledky z hlediska detekčních limitů, ale jejich materiálová stabilita v dlouhodobém měřítku zůstává otázkou. Polovodičové senzory dominují v potenciálu miniaturizace a nákladové efektivity. Jejich neselektivnost si pro bezpečné nasazení vynucuje složitou integraci dodatečných pasivních filtrů.

Optické metody nabízejí vysokou úroveň selektivity, přesnosti a imunitu vůči kontaminaci. Aktuální výzkum se zabývá primárně miniaturizací, snížením detekčních limitů a implementací algoritmů.

Z hlediska budoucího vývoje se jako nejperspektivnější strategie jeví odklon od izolovaných senzorů k integrovaným multisenzorovým platformám. Spojení více detekčních principů, doplněné o integraci pokročilého softwarového zpracování signálu pro eliminaci environmentálních šumů a křížových interferencí, představuje předpoklad pro zajištění vysoce selektivní detekce výbušných atmosfér odpovídající přísným nárokům moderní energetické infrastruktury.

Literatura

1. Lewandowska-Bernat, A.; Desideri, U. Opportunities of power-to-gas technology in different energy systems architectures. *Applied Energy* **2018**, *228*, 57-67. 10.1016/j.apenergy.2018.06.001.
2. Blokland, H.; Sweelssen, J.; Isaac, T.; Boersma, A. Detecting hydrogen concentrations during admixing hydrogen in natural gas grids. *International Journal of Hydrogen Energy* **2021**, *46* (63), 32318-32330. 10.1016/j.ijhydene.2021.06.221.
3. Brandes, E.; Möller, W. *Safety Characteristic Data*; Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2008.
4. Buttner, W. J.; Post, M. B.; Burgess, R.; Rivkin, C. An overview of hydrogen safety sensors and requirements. *International Journal of Hydrogen Energy* **2011**, *36* (3), 2462-2470. 10.1016/j.ijhydene.2010.04.176.
5. Hall, J. E.; Hooker, P.; Jeffrey, K. E. Gas detection of hydrogen/natural gas blends in the gas industry. *International Journal of Hydrogen Energy* **2021**, *46* (23), 12555-12565. 10.1016/j.ijhydene.2020.08.200.
6. Boon-Brett, L.; Bousek, J.; Moretto, P. Reliability of commercially available hydrogen sensors for detection of hydrogen at critical concentrations: Part II – selected sensor test results. *International Journal of Hydrogen Energy* **2009**, *34* (1), 562-571. 10.1016/j.ijhydene.2008.10.033.
7. Palmisano, V.; Boon-Brett, L.; Bonato, C.; Harskamp, F.; Buttner, W. J.; Post, M. B.; Burgess, R.; Rivkin, C. Evaluation of selectivity of commercial hydrogen sensors. *International Journal of Hydrogen Energy* **2014**, *39* (35), 20491-20496. 10.1016/j.ijhydene.2014.03.251.
8. Noh, D.; Oh, E. Chemical Detection Using Mobile Platforms and AI-Based Data Processing Technologies. *Journal of Sensor and Actuator Networks* **2025**, *14* (1). 10.3390/jsan14010006.
9. Xing, Y. X.; Wang, G. X.; Zhang, T.; Shen, F. J.; Meng, L. S.; Wang, L. H.; Li, F. M.; Zhu, Y. Q.; Zheng, Y. H.; He, N.; He, S. L. VOC Detections with Optical Spectroscopy. *Progress in Electromagnetics Research-Pier* **2022**, *173*, 71-92.
10. Boon-Brett, L.; Bousek, J.; Black, G.; Moretto, P.; Castello, P.; Hübert, T.; Banach, U. Identifying performance gaps in hydrogen safety sensor technology for automotive and stationary applications. *International Journal of Hydrogen Energy* **2010**, *35* (1), 373-384. 10.1016/j.ijhydene.2009.10.064.
11. Zahaba, M.; Nur-Akasyah, J.; Yatin, H. F.; Murad, A. S. A.; Ismail, M. W.; Samad, W. Z.; Danial, W. H.; Zakaria, A.; Hamdan, K.; Shafiee, S. A.; Aizamddin, M. F. Comparative analysis of hydrogen sensors in a test chamber following ISO 26142:2010 standards. *International Journal of Hydrogen Energy* **2026/05/06**, *231*. 10.1016/j.ijhydene.2026.154516.
12. Boon-brett, L.; Bousek, J.; Castello, P.; Salyk, O.; Harskamp, F.; Aldea, L.; Tinaut, F. Reliability of commercially available hydrogen sensors for detection of hydrogen at critical concentrations: Part I – Testing facility and methodologies. *International Journal of Hydrogen Energy* **2008**, *33* (24), 7648-7657. 10.1016/j.ijhydene.2008.10.004.
13. Ashhar, K.; Cui, Y.; Kuehsamy, L. J.; Khoo, D. W. Y.; Kai, F. M. A survey of sensor testing methods for hydrogen leakage detection and purity analysis. *Measurement: Sensors* **2025**, *38*. 10.1016/j.measen.2024.101714.
14. Hübert, T.; Boon-Brett, L.; Black, G.; Banach, U. Hydrogen sensors – A review. *Sensors and Actuators B: Chemical* **2011**, *157* (2), 329-352. 10.1016/j.snb.2011.04.070.
15. Ivanov, I. I.; Baranov, A. M.; Spirjakin, D. N.; Akbari, S.; Mironov, S. M.; Karami, H.; Gharehpetian, G. B. Expanding catalytic sensor capabilities to combustible gas mixtures monitoring. *Measurement* **2022**, *194*. 10.1016/j.measurement.2022.111103.
16. Baranov, A. M.; Osipova, T. V. Latest Progress in Sensors for Pre-explosive Detection of Flammable Gases: A Review. *Sensor Mater* **2022**, *34* (10), 3707-3726. 10.18494/Sam4005.
17. Karelin, A.; Baranov, A. M.; Akbari, S.; Mironov, S.; Karpova, E. Measurement Algorithm for Determining Unknown Flammable Gas Concentration Based on Temperature Sensitivity of Catalytic Sensor. *Ieee Sens J* **2019**, *19* (11), 4173-4180. 10.1109/Jsen.2019.2897626.
18. Roslyakov, I. V.; Kolesnik, I. V.; Evdokimov, P. V.; Skryabina, O. V.; Garshev, A. V.; Mironov, S. M.; Stolyarov, V. S.; Baranchikov, A. E.; Napolskii, K. S. Microhotplate catalytic sensors based on porous anodic alumina: study of methane response hysteresis. *Sensor Actuat B-Chem* **2021**, *330*. 10.1016/j.snb.2020.129307.
19. Ma, H. Y.; Ding, E. J.; Wang, W. J. Power reduction with enhanced sensitivity for pellistor methane sensor by improved thermal insulation packaging. *Sensor Actuat B-Chem* **2013**, *187*, 221-226. 10.1016/j.snb.2012.10.121.

20. Samotaev, N.; Pisliakov, A.; Gorshkova, A.; Dzhumaev, P.; Barsony, I.; Ducso, C.; Biro, F. Al2O3 nanostructured gas sensitive material for silicon based low power thermocatalytic sensor. *Mater Today-Proc* **2020**, *30*, 443-447. 10.1016/j.matpr.2019.12.393.
21. Chen, J. H.; Arandiyan, H.; Gao, X.; Li, J. H. Recent Advances in Catalysts for Methane Combustion. *Catal Surv Asia* **2015**, *19* (3), 140-171. 10.1007/s10563-015-9191-5.
22. Wu, R. J.; Tian, X. M.; Hua, Z. Q.; Lu, N.; Wang, P. A low temperature catalytic combustible gas sensor based on Ru supported zeolite catalyst films. *Chinese J Anal Chem* **2021**, *49* (11), 63-68. 10.1016/j.cjac.2021.07.007.
23. Wang, P.; Tian, X. M.; Yan, M.; Yang, B. X.; Hua, Z. Q. A low temperature catalytic-type combustible gas sensor based on Pt supported zeolite catalyst films. *J Mater Sci* **2021**, *56* (7), 4666-4676. 10.1007/s10853-020-05563-w.
24. Lashkov, A. V.; Dobrokhotov, V. V.; Sysoev, V. V. The gas-analytical multisensor chip based on monolithic catalyst elements. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (Sibcon)* **2015**.
25. Zhang, T. Y.; Zhou, Y. C.; Liu, P. Z.; Hu, J. H. A novel strategy to identify gases by a single catalytic combustible sensor working in its linear range. *Sensor Actuat B-Chem* **2020**, *321*. 10.1016/j.snb.2020.128514.
26. Somov, A.; Karelin, A.; Baranov, A.; Mironov, S. Estimation of a Gas Mixture Explosion Risk by Measuring the Oxidation Heat Within a Catalytic Sensor. *Ieee T Ind Electron* **2017**, *64* (12), 9691-9698. 10.1109/Tie.2017.2716882.
27. Gorbova, E.; Balkourani, G.; Molochas, C.; Sidiropoulos, D.; Brouzgou, A.; Demin, A.; Tsiakaras, P. Brief Review on High-Temperature Electrochemical Hydrogen Sensors. *Catalysts* **2022**, *12* (12). 10.3390/catal12121647.
28. Aldhafeeri, T.; Tran, M.-K.; Vrolyk, R.; Pope, M.; Fowler, M. A Review of Methane Gas Detection Sensors: Recent Developments and Future Perspectives. *Inventions* **2020**, *5* (3). 10.3390/inventions5030028.
29. Gorbova, E.; Tzorbatzoglou, F.; Molochas, C.; Chloros, D.; Demin, A.; Tsiakaras, P. Fundamentals and Principles of Solid-State Electrochemical Sensors for High Temperature Gas Detection. *Catalysts* **2022**, *12* (1). 10.3390/catal12010001.
30. Wang, Z.; Guo, M.; Baker, G. A.; Stetter, J. R.; Lin, L.; Mason, A. J.; Zeng, X. Q. Methane-oxygen electrochemical coupling in an ionic liquid: a robust sensor for simultaneous quantification. *Analyst* **2014**, *139* (20), 5140-5147. 10.1039/c4an00839a.
31. Mu, X. Y.; Wang, Z.; Guo, M.; Zeng, X. Q.; Mason, A. J. Fabrication of a Miniaturized Room Temperature Ionic Liquid Gas Sensor for Human Health and Safety Monitoring. *2012 Ieee Biomedical Circuits and Systems Conference (Biocas): Intelligent Biomedical Electronics and System for Better Life and Better Environment* **2012**, 140-143.
32. Rehman, A.; Zeng, X. Q. Ionic Liquids as Green Solvents and Electrolytes for Robust Chemical Sensor Development. *Accounts Chem Res* **2012**, *45* (10), 1667-1677. 10.1021/ar200330v.
33. Carter, M. T.; Stetter, J. R.; Findlay, M. W.; Patel, V. Printed Amperometric Gas Sensors. *Chemical Sensors 10 -and- Mems/Nems 10* **2012**, *50* (12), 211-220. 10.1149/05012.0211ecst.
34. Asset, T.; Chattot, R.; Fontana, M.; Mercier-Guyon, B.; Job, N.; Dubau, L.; Maillard, F. A Review on Recent Developments and Prospects for the Oxygen Reduction Reaction on Hollow Pt-alloy Nanoparticles. *Chemphyschem* **2018**, *19* (13), 1552-1567. 10.1002/cphc.201800153.
35. Sekhar, P. K.; Kysar, J.; Brosha, E. L.; Kreller, C. R. Development and testing of an electrochemical methane sensor. *Sensors and Actuators B-Chemical* **2016**, *228*, 162-167. 10.1016/j.snb.2015.12.100.
36. Gross, P. A.; Jaramillo, T.; Pruitt, B. Cyclic-Voltammetry-Based Solid-State Gas Sensor for Methane and Other VOC Detection. *Analytical Chemistry* **2018**, *90* (10), 6102-6108. 10.1021/acs.analchem.8b00184.
37. Rimbu, G. A.; Pîslaru-Danescu, L.; Zarnescu, G. C.; Stefanescu, C. A.; Iordoc, M.; Teisanu, A. A.; Telipan, G. Electrochemical Sensor for Hydrogen Leakage Detection at Room Temperature. *Sensors-Basel* **2025**, *25* (1). 10.3390/s25010264.
38. Dosi, M.; Lau, I.; Zhuang, Y. C.; Simakov, D. S. A.; Fowler, M. W.; Pope, M. A. Ultrasensitive Electrochemical Methane Sensors Based on Solid Polymer Electrolyte-Infused Laser-Induced Graphene. *Acs Applied Materials & Interfaces* **2019**, *11* (6), 6166-6173. 10.1021/acsami.8b22310.
39. Fauzi, A. S. A.; Hamidah, N. L.; Sato, S.; Shintani, M.; Putri, G. K.; Kitamura, S.; Hatakeyama, K.; Quitain, A. T.; Kida, T. Carbon-based potentiometric hydrogen sensor using a proton conducting graphene oxide membrane coupled with a WO3 sensing electrode. *Sensors and Actuators B-Chemical* **2020**, *323*. 10.1016/j.snb.2020.128678.
40. Wang, C.; Yang, J. X.; Li, J. L.; Luo, C. L.; Xu, X. W.; Qian, F. Solid-state electrochemical hydrogen sensors: A review. *International Journal of Hydrogen Energy* **2023**, *48* (80), 31377-31391. 10.1016/j.ijhydene.2023.04.167.
41. Jayanthi, E.; Murugesan, N.; Ramesh, C. Amperometric H_2 sensor with Pt/Pd alloy electrode prepared by pulsed electrodeposition method. *Microchemical Journal* **2020**, *156*. 10.1016/j.microc.2020.104851.
42. Gao, L.; Tian, Y.; Hussain, A.; Guan, Y.; Xu, G. Recent developments and challenges in resistance-based hydrogen gas sensors based on metal oxide semiconductors. *Anal Bioanal Chem* **2024**, *416* (16), 3697-3715. 10.1007/s00216-024-05213-z.

43. Roy, S.; Sarkar, C. K.; Bhattacharyya, P. A highly sensitive methane sensor with nickel alloy microheater on micromachined Si substrate. *Solid-State Electronics* **2012**, *76*, 84-90. 10.1016/j.sse.2012.05.040.
44. Bhattacharyya, P.; Basu, P. K.; Mondal, B.; Saha, H. A low power MEMS gas sensor based on nanocrystalline ZnO thin films for sensing methane. *Microelectronics Reliability* **2008**, *48* (11-12), 1772-1779. 10.1016/j.microrel.2008.07.063.
45. Lu, N.; Fan, S. R.; Zhao, Y. X.; Yang, B. X.; Hua, Z. Q.; Wu, Y. A selective methane gas sensor with printed catalytic films as active filters. *Sensors and Actuators B-Chemical* **2021**, *347*. 10.1016/j.snb.2021.130603.
46. Mukherjee, A.; Gnaim, M.; Tov, I. S.; Hargreaves, L.; Hayon, J.; Shluger, A.; Rosenwaks, Y. Ultrasensitive hydrogen detection by electrostatically formed silicon nanowire decorated by palladium nanoparticles. *Sensors and Actuators B-Chemical* **2021**, *346*. 10.1016/j.snb.2021.130509.
47. Mukherjee, A.; Shemtov, I.; Sharma, B.; Rosenwaks, Y. Tailoring the performance of the multidimensional electrostatically formed nanowire gas sensor. *Journal of Physics D-Applied Physics* **2025**, *58* (10). 10.1088/1361-6463/ad9bbb.
48. Siddiqui, M. S.; Mukherjee, A.; Rosenwaks, Y. Sensitive and selective detection of methane and hydrogen using palladium functionalized electrostatically formed silicon nanowire sensor array. *International Journal of Hydrogen Energy* **2026**, *226*. 10.1016/j.ijhydene.2026.154286.
49. Shaposhnik, A. V.; Moskalev, P. V.; Arefieva, O. A.; Zvyagin, A. A.; Kul, O. V.; Vasiliev, A. A. Selective determination of hydrogen in a mixture with methane using a single metal oxide sensor. *International Journal of Hydrogen Energy* **2024**, *82*, 523-530. 10.1016/j.ijhydene.2024.07.379.
50. Shaposhnik, A. V.; Moskalev, P. V.; Chegereva, K. L.; Zviagin, A. A.; Vasiliev, A. A. Selective gas detection of H and CO by a single MOX-sensor. *Sensors and Actuators B-Chemical* **2021**, *334*. 10.1016/j.snb.2020.129376.
51. Zhang, Y.; Li, R.; Guo, R.; Jiao, M.; Wang, G.; Zhao, Z. Recent Progress in Low-Power-Consumption Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors. *Materials (Basel)* **2025**, *18* (21). 10.3390/ma18214864.
52. Wang, Y. C.; Chen, C. Y.; Xiao, G. Q.; Chen, C. L.; He, X. H.; Zhou, J.; Huang, Z. W.; Le, J. C.; Zhou, X. Novel high performance room temperature hydrogen sensor-3D In2O3@rGO@PPy aerogel with dual enhancement of mechanical and gas sensitive properties. *International Journal of Hydrogen Energy* **2025**, *154*. 10.1016/j.ijhydene.2025.150170.
53. Li, X.; He, H.; Tan, T.; Zou, Z. H.; Tian, Z. Y.; Zhou, W. L.; Bao, Y. W.; Xia, X. H.; Gao, Y. Annealing effect on the methane sensing performance of Pt-SnO/ZnO double layer sensor. *Applied Surface Science* **2023**, *640*. 10.1016/j.apsusc.2023.158428.
54. Yang, L.; Fu, W. Y.; Mao, L. B.; Xu, L. X.; Yao, C. P.; Zhang, H.; Cheng, H. Y. In_2O_3-ZnO/Laser-Induced Graphene Nanocomposites for a Highly Sensitive, Room-Temperature, Flexible Methane Gas Sensor. *Acs Applied Nano Materials* **2025**, *8* (15), 7510-7519. 10.1021/acsanm.4c07323.
55. Sun, X. Y.; Zhang, Y.; Wang, Y. H.; Li, M. W.; Qin, C.; Cao, J. L.; Wang, Y. UV-activated AuAg/ZnO microspheres for high-performance methane sensor at room temperature. *Ceramics International* **2024**, *50* (17), 30552-30559. 10.1016/j.ceramint.2024.05.352.
56. Li, X.; Hu, H.; Tan, T.; Sun, M. J.; Bao, Y. W.; Huang, Z. B.; Muhammad, S.; Xia, X. H.; Gao, Y. Enhancing Methane Gas Sensing through Defect Engineering in Ag-Ru Co-doped ZnO Nanorods. *Acs Applied Materials & Interfaces* **2024**, *16* (20), 26395-26405. 10.1021/acsami.4c03252.
57. Jońca, J.; Pawnuk, M.; Bezyk, Y.; Arsen, A.; Sówka, I. Drone-Assisted Monitoring of Atmospheric Pollution—A Comprehensive Review. *Sustainability* **2022**, *14* (18). 10.3390/su141811516.
58. Xu, M.; Peng, B.; Zhu, X.; Guo, Y. Multi-Gas Detection System Based on Non-Dispersive Infrared (NDIR) Spectral Technology. *Sensors (Basel)* **2022**, *22* (3). 10.3390/s22030836.
59. Chen, K.; Cui, D. Y.; Qi, H. C.; Yang, L.; Zhao, X. Y. Multi-component Freon gas detection based on infrared tunable Fabry-Perot detector. *Sensors and Actuators B-Chemical* **2024**, *420*. 10.1016/j.snb.2024.136488.
60. Jia, C.; Zhao, L.; Huang, G.; Liu, L.; Wang, W.; Yang, Y.; Miao, Y. A Review of Hydrogen Sensors for ECLSS: Fundamentals, Recent Advances, and Challenges. *Applied Sciences* **2023**, *13* (12). 10.3390/app13126869.
61. Su. Design of methane sensing system based on SAW and NDIR. **2025**.
62. Yang, H. Q.; Bu, X. Z.; Cao, Y. H.; Song, Y. A etane telemetry sensor based on near-infrared laser absorption spectroscopy. *Infrared Physics & Technology* **2021**, *114*. 10.1016/j.infrared.2021.103670.
63. Ch'ien, L. B.; Wang, Y. J.; Shi, A. C.; Li, F. Wavelet filtering algorithm for improved detection of a methane gas sensor based on non-dispersive infrared technology. *Infrared Physics & Technology* **2019**, *99*, 284-291. 10.1016/j.infrared.2019.04.025.
64. Makeenkov, A.; Lapitskiy, I.; Somov, A.; Baranov, A. Flammable gases and vapors of flammable liquids: Monitoring with infrared sensor node. *Sensors and Actuators B-Chemical* **2015**, *209*, 1102-1107. 10.1016/j.snb.2014.11.112.
65. Kakuma, S.; Noda, K. Practical and Sensitive Measurement of Methane Gas Concentration Using

a 1.6 μm Vertical-Cavity-Surface-Emitting-Laser Diode. *Sensors and Materials* **2010**, *22* (7), 365-375.
66. Tan, Q. L.; Tang, L. C.; Yang, M. L.; Xue, C. Y.; Zhang, W. D.; Liu, J.; Xiong, J. J. Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology. *Optics and Lasers in Engineering* **2015**, *74*, 103-108. 10.1016/j.optlaseng.2015.05.007.
67. Liu, H.; Shi, Y.; Wang, T. Design of a six-gas NDIR gas sensor using an integrated optical gas chamber. *Opt Express* **2020**, *28* (8), 11451-11462. 10.1364/OE.388713.
68. Dong, M.; Zheng, C. T.; Miao, S. Z.; Zhang, Y.; Du, Q. L.; Wang, Y. D.; Tittel, F. K. Development and Measurements of a Mid-Infrared Multi-Gas Sensor System for CO, CO and CH Detection. *Sensors* **2017**, *17* (10). 10.3390/s17102221.
69. Lin, S.; Chang, J.; Sun, J.; Xu, P. Improvement of the Detection Sensitivity for Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy: A Review. *Frontiers in Physics* **2022**, *10*. 10.3389/fphy.2022.853966.
70. Li, Z.; Li, W.; Lin, J.; Li, C.; Wang, B.; Chen, C.; Piao, H.; Zhang, F. Review on performance enhancement methods of tunable diode laser absorption spectroscopy for in situ gas measurement. *Applied Spectroscopy Reviews* **2025**, *60* (6), 555-587. 10.1080/05704928.2025.2465447.
71. Duan, B. Y.; Lv, Y.; Wang, Z. G.; Wang, D.; Li, D.; Yao, B. Correlation of absorption spectrum properties of methane with coupling variables between temperature and concentration. *Optik* **2019**, *185*, 82-87. 10.1016/j.ijleo.2019.03.070.
72. Wang, P.; Chen, C.; Wang, Y. Z.; Cheng, D. F.; Piao, H.; Pan, X. D. Improvement of measurement accuracy using state equivalence correction for CH_4 and CO_2 sensor in geochemical application. *Measurement* **2022**, *192*. 10.1016/j.measurement.2022.110898.
73. Wang, P.; Chen, C.; Wang, Y. Z.; Piao, H.; Cheng, D. F.; Pan, X. D. A Prototype of CH_4 and CO_2 Sensing System Using State Parameters Correction Applied to Gas Geochemical Exploration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **2022**, *71*. 10.1109/Tim.2021.3132073.
74. Dang, J. M.; Zhang, J. H.; Piao, Z. J.; Zheng, C. A. T.; Wang, Y. D.; Kong, L. J.; Sun, Y. J.; Yu, H. Y. A compact self-calibration atmospheric CH4 sensor based on NIR laser and new type multi-pass gas cell. *Opt Laser Eng* **2022**, *151*. 10.1016/j.optlaseng.2021.106907.
75. Zhang, L. W.; Pang, T.; Zhang, Z. R.; Sun, P. S.; Xia, H.; Wu, B.; Guo, Q.; Sigrist, M. W.; Shu, C. M. A novel compact intrinsic safety full range methane microprobe sensor using 'trans-world' processing method based on near infrared spectroscopy. *Sensor Actuat B-Chem* **2021**, *334*. 10.1016/j.snb.2021.129680.
76. Wang, Y. H.; Zhou, B.; Zhao, R.; Wang, B. B. Calibration-Free Wavelength Modulation Spectroscopy for Gas Properties Measuring Based on 2 and 4 Harmonics. *Spectrosc Spect Anal* **2023**, *43* (2), 368-373. 10.3964/j.issn.1000-0593(2023)02-0368-06.
77. Hudzikowski, A.; Gluszek, A.; Krzempek, K.; Sotor, J. Compact, spherical mirror-based dense astigmatic-like pattern multipass cell design aided by a genetic algorithm. *Optics Express* **2021**, *29* (16), 26127-26136. 10.1364/Oe.432541.
78. Chen, H. D.; Chen, C.; Wang, Y. Z.; Piao, H.; Wang, P. Optical Design and Verification of Multipass Cell With Two Spherical Mirrors Using Space Equation Method. *Ieee Transactions on Instrumentation and Measurement* **2021**, *70*. 10.1109/Tim.2021.3058400.
79. Hu, Z.; Shi, Y. P.; Niu, M. S.; Li, T. H.; Li, H.; Liu, H. Y. Triple-range adjustable plane-concave multipass gas cell for high-precision trace gas detection based on TDLAS. *Opt Laser Eng* **2024**, *175*. 10.1016/j.optlaseng.2024.108023.
80. Qiu, H. F.; Lan, J. Q.; Hu, Q.; Zhang, H.; Xu, Y. T.; Hao, X.; Li, Z. An enhancement filtering method based on CEEMDAN-EP-WTD for TDLAS gas sensing. *Infrared Physics & Technology* **2024**, *141*. 10.1016/j.infrared.2024.105466.
81. Tong, C.; Sima, C.; Chen, M.; Zhang, X.; Li, T.; Ai, Y.; Lu, P. Laser Linewidth Analysis and Filtering/Fitting Algorithms for Improved TDLAS-Based Optical Gas Sensor. *Sensors (Basel)* **2023**, *23* (11). 10.3390/s23115130.

Summary

This article summarises current trends in the research and development of detection mechanisms and associated equipment for mixtures of hydrogen and natural gas. It focuses specifically on principles applicable to the detection or determination of the concentration of flammable gases in the presence of hydrogen in various applications. These are devices used in natural gas transit and distribution operations, by end users (households, industrial energy facilities), and by components of the integrated rescue system (IRS), for which rapid and accurate detection without the influence of cross-contamination is a priority. The article provides a comprehensive assessment of the current regulatory framework, particularly the technical standards for testing detection devices, and describes the main gas detection technologies (catalytic, electrochemical, semiconductor and optical sensors) in terms of their suitability for specific purposes. For each method, the principles of operation, current technical and material innovations, and their limitations regarding selectivity, sensitivity and energy consumption when applied to complex gas mixtures are discussed.