
DZIAŁANIA RATOWNICZE PODCZAS ZDARZEŃ, W KTÓRYCH WYSTĘPUJĄ INSTALACJE I URZĄDZENIA Z WODOREM



Jacek Zboina
Jan Kielin
Arkadiusz Kielin
Damian Bąk
Aleksander Jobda
Piotr Trzewik



DZIAŁANIA RATOWNICZE PODCZAS ZDARZEŃ, W KTÓRYCH WYSTĘPUJĄ INSTALACJE I URZĄDZENIA Z WODOREM

Autorzy opracowania:

st. bryg. dr hab. inż. Jacek Zboina
st. bryg. w st. sp. mgr inż. Jan Kielin
st. bryg. dr inż. Arkadiusz Kielin
mgr inż. Damian Bąk
mgr inż. Aleksander Jobda
mgr inż. Piotr Trzewik

Recenzja:

dr hab. Maria Zielecka, profesor instytutu (CNBOP-PIB)
dr hab. Jarosław Struniawski, profesor uczelni (AWSB)
nadbryg. dr inż. Mariusz Feltynowski
st. bryg. mgr inż. Tomasz Jonio



Przygotowanie do wydania:

Dział Wydawnictw i Promocji CNBOP-PIB

Skład i projekt okładki:

Małgorzata Żurniewicz-Turno

Zdjęcie na okładce:

Instalacje energetyczne

Promet-Plast s.c.

Elżbieta Jeżewska, Andrzej Jeżewski

Lider Energetycznego Klastra Oławskiego EKO

ISBN: 978-83-971388-3-4

DOI: 10.17381/2025.1

© Copyright by Centrum Naukowo-Badawcze

Ochrony Przeciwpożarowej im. Józefa Tuliszkowskiego

Państwowy Instytut Badawczy, Józefów 2025

Pewne prawa zastrzeżone. Publikacja jest udostępniona na licencji CC BY-SA 4.0.

Wydawca:

Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej

im. Józefa Tuliszkowskiego

Państwowy Instytut Badawczy

05-420 Józefów k. Otwocka, ul. Nadwiślańska 213

www.cnbop.pl

Druk i oprawa: Biały Kruk

Nakład: 200 egz.

Spis treści

Wprowadzenie.....	7
Skróty i definicje.....	11
Skróty	11
Definicje	12
1. Wodór: właściwości i zagrożenia	19
1.1. Oznakowanie	19
1.2. Normy i standardy.....	21
1.3. Wodór jako nośnik energii.....	22
1.4. Podstawowe właściwości wodoru.....	22
1.5. Stan skupienia wodoru a bezpieczeństwo	24
1.6. Oddziaływanie wodoru na metale i polimery	27
1.7. Wycieki wodoru	28
1.8. Źródła zapłonu i granice wybuchowości wodoru	30
1.9. Możliwe źródła zapłonu wodoru	32
1.10. Promieniowanie płomienia wodoru	34
1.11. Ciekły wodór – zagrożenia dla zdrowia	35
1.12. Pierwsza pomoc w przypadku oparzeń kriogenicznych.....	36
1.13. Szkodliwy wpływ spalania wodoru na ludzi	37
1.14. Podsumowanie	38
2. Produkcja wodoru	39
3. Ogniwa paliwowe: zasada działania i zastosowania	41
3.1. Wodorowe ogniw paliwowe – działanie, zalety, zastosowania	41
3.2. Ogniw paliwowe zasilane metanolem: zasada działania, zalety i wady, zastosowania.....	42
4. Oznakowanie pojazdów z napędami alternatywnymi i ich osprzętu zgodnie z ISO 17840-4	47
5. Stacje tankowania wodoru	51
5.1. Technologia i wyposażenie GHRS.....	51
5.2. Technologia i wyposażenie LHRS	53
6. Zagrożenia związane ze stosowaniem wodoru	55
6.1. Pojazdy z napędem wodorowym – zagrożenia	55
6.1.1. Potencjalne konsekwencje uwolnienia wodoru bez zapłonu.....	56
6.1.2. Autobusy, pociągi i ciężarówki	57
6.1.3. Przyczepy i stacje paliw LH ₂	58
6.2. Rodzaje pożarów i płomieni wodorowych	59
6.2.1. Pożar powierzchniowy	59
6.2.2. Porównanie pożarów strumieniowych wodoru i zwykłych paliw.....	60

7. Zagrożenia oraz postępowanie w przypadku eksplozji wodoru	63
7.1. Zdarzenia i zjawiska niebezpieczne	63
7.2. Wpływ fal uderzeniowych na ludzi i budynki	65
7.3. Przestrzenie zamknięte – zagrożenia	66
7.4. Wyciek, przenikanie	71
8. Ogólne zasady bezpieczeństwa podczas stosowania wodoru	73
8.1. Strategie i zalecenia dotyczące projektowania i użytkowania infrastruktury wodorowej	73
8.2. Wentylacja naturalna i wymuszona	74
8.3. Wodór – paliwo dla pojazdów z ogniwami paliwowymi	74
8.3.1. Magazynowanie wodoru	74
8.3.2. Uzupelnianie paliwa – stacje paliw	74
9. Ryzyka związane z pojazdami na ogniwami paliwowe	77
9.1. Miejsca parkingowe	78
9.2. Tunele	78
9.3. Wpływ prędkości wentylacji na rozpraszanie wodoru w tunelach	78
9.4. Organiczne nośniki ciekłego wodoru	79
10. Zdarzenia związane z wodorem wymagające interwencji zespołów ratowniczych KSRG	83
10.1. Przyjmowanie zgłoszenia o awarii, w tym o pożarze z udziałem wodoru	83
10.2. Działania ratownicze zespołu ratowniczego	86
10.3. Przykłady incydentów	87
10.4. Strategie interwencyjne działań dla instalacji FCH	89
10.4.1. Prewencja	89
10.4.2. Monitoring i wczesne wykrywanie	89
10.4.3. Reagowanie na incydent	89
10.4.4. Neutralizacja i minimalizacja skutków	89
10.4.5. Postępowanie po incydencie	90
10.4.6. Ciągłe doskonalenie	90
10.5. Działania jednostek KSRG	90
10.5.1. Rodzaj zdarzenia: brak wycieku, brak pożaru (alarm techniczny, wypadek przy pracy, wypadek drogowy)	90
10.5.2. Rodzaj zdarzenia: pożar elementów elektrycznych (w tym baterii) w instalacji FCH	93
10.5.3. Rodzaj zdarzenia: pożar zewnętrzny zagrażający instalacji FCH	96
10.5.4. Rodzaj zdarzenia: wyciek wodoru z zapłonem	98
Zakończenie	103

Załącznik 1. Transport wodoru.....	105
Załącznik 2. Zastosowanie wodoru w transporcie i logistyce (pojazdy, autobusy, lotnictwo, wózki widłowe)	111
Załącznik 3. Strategia bezpieczeństwa wodorowego.....	119
Załącznik 4. Materiały ilustracyjne (filmy wideo, VR) z kodami QR	125
Literatura	130
Spis rycin.....	133
Spis tabel.....	134

Wprowadzenie

Wodór, dzięki swoim właściwościom i potencjałowi w redukcji emisji gazów cieplarnianych, jest jednym z najbardziej obiecujących, przyszłościowych źródeł energii. Technologie ogniw paliwowych, w tym właśnie wodorowych, znajdują coraz więcej zastosowań i coraz częściej trafiają na światowe rynki w różnych formach. Trzeba jednak podkreślić, że obok licznych zalet, technologia wodorowa niesie ze sobą również ryzyka, zwłaszcza pod względem bezpieczeństwa. Wodór jest gazem łatwopalnym i wybuchowym. Wymaga w związku z tym szczególnych środków ostrożności w jego przechowywaniu, transporcie i użyciu. Aby minimalizować ryzyko związane z wykorzystaniem wodoru, konieczne jest odpowiednie przeszkolenie służb ratunkowych do reagowania na ewentualne wypadki z udziałem tej substancji. W te potrzeby wpisuje się finansowany przez Unię Europejską projekt HyResponder¹. Projekt ten skupia się na tworzeniu programów szkoleniowych i zasobów edukacyjnych dla strażaków, ratowników medycznych i innych służb ratunkowych. Wykorzystuje on rzeczywistość wirtualną, opartą na zaawansowanej wiedzy z zakresu bezpieczeństwa technologii wodorowych. W ramach projektu powstała europejska sieć instruktorów szkolących ratowników z wykorzystaniem e-platformy zawierającej przetłumaczone materiały specjalistyczne. Inicjatywa ta ma promować wiedzę na temat bezpieczeństwa technologii wodorowych wśród społeczności służb ratowniczych². Niestety koncepcja ta nie ma jeszcze zastosowania w Polsce, ale jak sądzą autorzy tego opracowania, niebawem ulegnie to zmianie.

Rozwój nowych technologii napędów i paliw alternatywnych³ jest jedną z najważniejszych odpowiedzi na globalne wyzwania związane ze zmianami klimatycznymi i zanieczyszczeniem środowiska. Szczególne miejsce wśród proponowanych rozwiązań zajmuje wodór. Pierwszy pojazd zasilany tym paliwem został skonstruowany już w XX wieku, ale

¹ HyResponder, <https://hyresponder.eu> [dostęp: 22.05.2024].

² CORDIS – wyniki badań wspieranych przez UE, <https://cordis.europa.eu/project/id/875089/pl> [dostęp: 22.05.2024].

³ Paliwami alternatywnymi w rozumieniu dyrektywy są paliwa lub źródła energii, które służą, przynajmniej częściowo, jako substytut dla pochodzących z surowej ropy naftowej źródeł energii w transporcie i które mogą potencjalnie przyczynić się do zmniejszenia uzależnienia państw członkowskich UE od importu ropy naftowej oraz do dekarbonizacji transportu i poprawy ekologiczności tego sektora. Obejmują one m.in.: energię elektryczną, wodór, biopaliwa, paliwa syntetyczne i parafinowe, gaz ziemny (w tym biometan) w postaci sprężonego gazu ziemnego CNG i skroplonego gazu ziemnego LNG, gaz płynny LPG, <https://www.gov.pl/web/klimat/paliwa-alternatywne-w-transporcie> [dostęp: 25.03.2024].

dopiero w ostatnich latach samochody i urządzenia z napędami wodorowymi stały się coraz bardziej powszechne. Obecnie można mówić o intensywnym rozwoju rozwiązań i technologii wykorzystania tych napędów w motoryzacji i innych branżach. Bazując na obecnym stanie wiedzy, można z dużą pewnością założyć, że wodór będzie paliwem przyszłości stosowanym nie tylko w transporcie, natomiast napędy zasilane wodorem zrewolucjonizują rynek. Szczególne znaczenie ma tutaj brak emisyjności i coraz bardziej zadawalające zasięgi pojazdów z tego rodzaju napędem⁴.



Ryc. 1. Przykład pojazdu osobowego z napędem wodorowym przy stacji paliw do tankowania wodoru

Źródło: https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/wydarzenia/grupa-polsat-plus-chwali-sie-osiagnieciem-samochody-wodorowe-przejechaly-potezny/0t0lq3p?utm_campaign=cb [dostęp: 10.02.2024].

Pojazdy zasilane wodorem są obecnie wyposażone w napędy oparte na technologiach wodorowych ogni w paliwowych, które nie emitują dwutlenku węgla ani innych szkodliwych substancji. Paliwo wodorowe, tak zwany „zielony wodór”, zmieniane jest w ogniwie paliwowym w energię elektryczną, dzięki połączeniu wodoru z tlenem, zaś produktem ubocznym tej reakcji jest para wodna. Proces tankowania takiego pojazdu trwa kilka minut, po czym można przejechać nim ponad 600 km. Obecnie działają już w naszym kraju pierwsze stacje wodorowe, ale wkrótce można przewidywać powstanie wielu kolejnych. Rozpoczęto także produkcję autobusów wodorowych, NesoBus⁵ w Świdniku, które są już użytkowane między innymi w Poznaniu, Rybniku, a kolejne

⁴ Komputer Świat, *Grupa Polsat Plus chwali się osiągnięciem. Samochody wodorowe przejechały potężny dystans*, https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/wydarzenia/grupa-polsat-plus-chwali-sie-osiagnieciem-samochody-wodorowe-przejechaly-potezny/0t0lq3p?utm_campaign=cb [dostęp: 10.02.2024].

⁵ Auto Świat, *Widziałem polski autobus wodorowy. NesoBus będzie produkowany w Świdniku*, <https://www.auto-swiat.pl/ev/wiadomosci/nesobus-pokazano-polski-autobus-wodorowy-bedzie-produkowany-w-swidniku/fhkv7lf> [dostęp: 11.06.2024].

zostały zamówione przez Chełm i Gdańsk⁶. W Bydgoszczy uruchomiona została produkcja pasażerskich pociągów wodorowych⁷.

Coraz większa sprawność i dostępność wodorowych ogniw paliwowych umożliwia stosowanie ich do wytwarzania prądu dla silników elektrycznych w pojazdach drogowych, pociągach, samolotach, statkach itd. Zasilane wodorem ogniwa paliwowe mogą zapewnić ponadto prąd i ciepło dla gospodarstw domowych, a także być rezerwowym źródłem zasilania w sytuacjach kryzysowych. Tak jak wspomniano wyżej, można dlatego postawić tezę, że w niedalekiej przyszłości wodór stanie się paliwem powszechnie wykorzystywanym w środkach transportu, a także w logistyce i wielu innych dziedzinach.

Ze stosowaniem wodoru wiąże się jednak określone zagrożenia i ryzyka. Zagrożenia te muszą być znane ratownikom, gdyż w razie zdarzeń awaryjnych tych urządzeń oni pierwsi podejmują działania mające na celu ratowanie zagrożonych osób i mienia. Ich wiedza w tym zakresie i umiejętności są niezbędne do skutecznego i bezpiecznego realizowania zadań ratowniczych z udziałem pojazdów czy urządzeń technicznych, w których stosuje się sprężony lub ciekły wodór.

W związku z powyższym ważne jest, aby kierujący działaniem ratowniczym już na poziomie interwencyjnym był świadomy odpowiedzialności za realizację zadań podległego mu zespołu ratowniczego. Powinien on posiadać wiedzę i wyszkolenie, tak aby bezpiecznie wykonywać z zespołem czynności w sprzęcie ochrony osobistej, w tym w sprzęcie ochrony układu oddechowego, przy użyciu posiadanego wyposażenia, takiego jak pojazdy, drabiny, węże, gaśnice, środki łączności i urządzenia ratownicze, w każdych warunkach klimatycznych, obszarach i sytuacjach awaryjnych. Podkreślić należy, że nie tylko dowódcy, ale i ratownicy muszą posiadać odpowiednie kompetencje, w tym przeszkolenie w zakresie bezpiecznego i prawidłowego korzystania ze środków ochrony indywidualnej, SOUO⁸ i innego sprzętu, który – w zależności od potrzeb – będą musieli obsługiwać.

Niniejsza publikacja zawiera wybrane informacje przydatne szczególnie ratownikom KSRG⁹, przede wszystkim osobom posiadającym wykształcenie średnie techniczne oraz kwalifikacje pożarnicze wymagane dla dowódcy sekcji OSP lub wyszkolenie technika pożarnictwa. Autorzy wyrażają nadzieję, że opracowanie okaże się w istocie pomocne dla każdego ratownika, stwarzając możliwość doskonalenia zawodowego, poznania nowych zagrożeń, rozwiązań i technologii, a także będąc wsparciem w tworzeniu i doskonaleniu

⁶ Komputer Świat, *Grupa Polsat Plus chwali się osiągnięciem. Samochody wodorowe przejechały potężny dystans*, https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/wydarzenia/grupa-polsat-plus-chwali-sie-osiagnieciem-samochody-wodorowe-przejechały-potężny/0t0lq3p?utm_campaign=cb [dostęp: 10.02.2024].

⁷ Portal samorządowy.pl, *Widziałem polski autobus wodorowy. NesoBus będzie produkowany w Świdniku*, <https://www.portalsamorzadowy.pl/ochrona-srodowiska/w-bydgoszczy-powstaja-pasazerskie-pociagi-wodorowe-dla-kolei-regionalnych,469220.html> [dostęp: 11.06.2024].

⁸ SOUO – sprzęt ochrony układu oddechowego.

⁹ KSRG – krajowy system ratowniczo-gaśniczy.

niu zasad postępowania i taktyki prowadzenia działań ratowniczych. Publikacja została napisana w dużej mierze na podstawie wyników prac zrealizowanych w ramach projektu pt. „European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders” (UE nr 211221). Wyniki badań dostępne są na stronie internetowej <http://www.hyresponse.eu>.

Skróty i definicje

Skróty¹⁰

APU	– Pomocniczy zespół napędów
BEV	– Pojazd elektryczny z akumulatorem
BLEVE	– Eksplozja par wrzącej cieczy
CNG	– Sprężony gaz ziemny
CPR	– Centrum powiadamiania ratunkowego
DGW	– Dolna granica wybuchowości
ESD	– Urządzenie do awaryjnego wyłączenia
FC	– Ogniwo paliwowe
FCV	– Pojazd z ogniwami paliwowymi
FCEV	– Pojazd elektryczny z ogniwami paliwowymi
GGW	– Górna granica wybuchowości
GH ₂	– Wodór gazowy
GHRS	– Stacja tankowania wodoru gazowego
HRS	– Stacja tankowania wodoru
ICE	– Silnik spalinowy
IR	– Podczerwień
KDR	– Kierujący działaniem ratowniczym
KSRG	– Krajowy system ratowniczo-gaśniczy
LH ₂	– Skroplony wodór
LHRS	– Stacja tankowania ciekłego wodoru
LNG	– Skroplony gaz ziemny
LPG	– Skroplony gaz petrochemiczny (propan-butan)
MEZ	– Minimalna energia zapłonu
MHD	– Generator magnetohydrodynamiczny
NTP	– Normalne warunki temperatury i ciśnienia: temperatura 293,15 K i ciśnienie 101,325 kPa
NWP	– Normalne ciśnienie robocze
PPP	– Zjawisko wzrostu ciśnienia

¹⁰ Opracowanie własne na podstawie projektu pt. „European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders”.

- PRD – Urządzenie do obniżania ciśnienia w zbiorniku
- PRV – Zawór nadmiarowy ciśnieniowy
- PSV – Ciśnieniowy zawór bezpieczeństwa
- SKKM/P – Powiatowe/Miejskie Stanowisko Kierowania
- SOUO – Sprzęt ochrony układu oddechowego
- TPRD – Termicznie aktywowane urządzenie nadmiarowo-ciśnieniowe
- UV – Ultrafiolet
- VR – *Virtual reality* (wirtualna rzeczywistość)

Definicje¹¹

Bezpieczna odległość to określenie stosowane w kontekście oceny ryzyka, zwłaszcza w odniesieniu do zagrożeń pożarowych, wybuchowych oraz chemicznych. Dotyczy ono minimalnej odległości, w jakiej powinny znajdować się ludzie, budynki, czy inne obiekty, aby zminimalizować ryzyko uszkodzeń lub obrażeń w przypadku wystąpienia niebezpiecznego zdarzenia (ISO 19880-1). Określenie bezpiecznej odległości jest kluczowym elementem planowania bezpieczeństwa i zarządzania ryzykiem w różnych sektorach przemysłu i infrastruktury. Pomaga w minimalizowaniu ryzyka dla ludzi, mienia i środowiska, a także w spełnieniu wymogów prawnych i standardów bezpieczeństwa.

Deflagracja to termin określający „spalenie”, czyli poddźwiękowe spalanie propagujące się poprzez wymianę ciepła; gorący palący się materiał ogrzewa następną warstwę zimnego materiału i zapala ją. Jest to proces następujący po słabym zapłonie w mieszaninie palnej, który propaguje się z prędkością poddźwiękową do świeżej, niespalonej mieszaniny.

Detonacja to zjawisko rozchodzenia się strefy spalania z prędkością większą od prędkości dźwięku (naddźwiękową) w nieprzereagowanej mieszance. Jest to najgorszy scenariusz przypadkowego spalania wodoru.

Dławione rozprężanie to proces, w którym przepływ gazu lub cieczy jest ograniczony przez element dławienia, taki jak zawór, otwór lub dysza, powodujący spadek ciśnienia. Jest to często wykorzystywane w technice cieplnej i gazowej do kontrolowania przepływu i ciśnienia w układach.

Dobrze wentylowany pożar charakteryzuje się stosunkowo niską szybkością wydzielania wodoru i całkowitym spalaniem wodoru w obrębie obudowy.

¹¹ Opracowanie własne na podstawie materiałów z projektu „European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders”, w tym „HyResponder Glossary” (<https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/05/HyResponder-Glossary.pdf>).

Dolna granica wybuchowości to najniższe stężenie substancji palnej w mieszaninie z powietrzem, przy którym może nastąpić jej zapalenie się i wybuch pod wpływem bodźca termicznego.

Elektroliza wody to proces, w którym woda jest rozszczepiana na wodór i tlen przy użyciu energii elektrycznej.

Elektryczny silnik trakcyjny wykorzystuje energię z ogniwa paliwowego i akumulatora trakcyjnego i w ten sposób napędza koła pojazdu. Niektóre pojazdy są wyposażone w generatory silników, które pełnią funkcję zarówno napędu, jak i regeneracji.

Górna granica wybuchowości to najwyższe stężenie substancji palnej w mieszaninie z powietrzem, przy którym jeszcze może nastąpić jej zapalenie się i wybuch pod wpływem bodźca termicznego.

Granica wydmuchu to granica prędkości przepływu paliwa, po przekroczeniu której następuje wydmuchanie podniesionego płomienia.

Hydrostatyczna próba na rozerwanie to próba na rozerwanie zbiornika, w której ciśnienie zazwyczaj przekracza 2,25 razy ciśnienie robocze.

Incydent odnosi się do nieoczekiwanego zdarzenia, które zakłóca normalne funkcjonowanie systemów, procesów lub usług. Może odnosić się do różnych obszarów, takich jak IT, bezpieczeństwo, produkcja czy obsługa klienta.

Konsekwencje to prawdopodobne skutki zagrożenia i jego dotkliwości, zwykle mierzone w kategoriach narażenia bezpieczeństwa życia, szkód materialnych i wpływu na środowisko.

Kryteria akceptacji to szczegółowe warunki, które muszą być spełnione, aby dany produkt, usługa lub funkcja zostały uznane za gotowe do użytku lub wdrożenia.

Miejsce bezpieczne to z góry określone miejsce wewnątrz lub na zewnątrz obiektu/infrastruktury FCH, w którym osoby nie znajdują się w bezpośrednim zagrożeniu spowodowanym uwolnieniem wodoru, pożarem lub wybuchem.

Mieszkańcy to osoby znajdujące się w granicach obiektu/infrastruktury FCH, w tym personel zaangażowany w jego eksploatację i utrzymanie oraz klienci/odwiedzający.

Minimalna energia zapłonu mieszaniny gazów i par palnych to najmniejsza energia, przy której następuje zapłon takiej mieszaniny w warunkach optymalnych, ze względu na skład, geometrię, wartości parametrów fizycznych.

Naturalna wentylacja to proces wymiany powietrza w budynku bez użycia mechanicznych systemów wspomagających, takich jak wentylatory lub klimatyzatory. Wykorzystuje ona naturalne siły, takie jak różnice temperatur i ciśnienia powietrza, do zapewnienia świeżego powietrza w pomieszczeniach.

Nominalne ciśnienie robocze, zwane również ciśnieniem znamionowym, to maksymalne ciśnienie, przy którym urządzenie, system lub komponent może bezpiecznie pracować w normalnych warunkach eksploatacyjnych. Jest to kluczowy parametr w wielu dziedzinach inżynierii, w tym w hydraulice, pneumatyce, odnoszący się m.in. do rurociągów, kotłów oraz systemów HVAC (ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja).

Obszar wrażliwy to zakład, infrastruktura lub wyposażenie zawierające zapasy substancji niebezpiecznych, które mogą stać się źródłem szkód, jeżeli dojdzie z ich udziałem do incydentu/wypadku związanego z wodorem.

Ocena odporności ogniowej to proces, w którym określa się, jak długo konstrukcja, materiał lub system mogą wytrzymać działanie ognia, zanim stracą swoje właściwości nośne, izolacyjne lub szczelność. Odporność ogniowa jest kluczowa dla zapewnienia bezpieczeństwa pożarowego w budynkach i innych konstrukcjach.

Ogniwo paliwowe (FC) to generator elektrochemiczny, który wytwarza energię elektryczną poprzez konwersję energii chemicznej na elektryczną. W przypadku FC zasilanego wodorem, tlen i wodór są łączone w celu wytworzenia energii elektrycznej, ciepła i wody. FC składa się z dwóch elektrod – dodatniej (katody) i ujemnej (anody) – zanurzonych w roztworze elektrolitu, który zapewnia transfer jonów w obu kierunkach, podczas gdy odpowiedni przepływ elektronów w obwodzie zewnętrznym wytwarza energię elektryczną.

Osoba udzielająca pierwszej pomocy to osoba, która przybędzie jako pierwsza na miejsce wypadku/incydentu.

Pożar niedostatecznie wentylowany charakteryzuje się stosunkowo dużą szybkością wydzielania wodoru, gdy tlen jest zużywany w szybszym tempie niż może być uzupełniany przez wentylację. W przypadku gdy wentylacja jest niewystarczająca, płomień będzie przez nią kontrolowany.

Próba ogniowa TPRD to test, który ocenia skuteczność TPRD w warunkach ekstremalnych temperatur. Próby te są kluczowym elementem systemów zabezpieczających w zbiornikach gazu, takich jak wodór czy gaz ziemny, stosowanych w pojazdach napędzanych paliwami alternatywnymi. Głównym celem próby ogniowej jest sprawdzenie, czy TPRD aktywuje się poprawnie w odpowiedzi na wysokie temperatury, aby bezpiecznie uwolnić ciśnienie i zapobiec eksplozji zbiornika.

Próg to maksymalne natężenie lub dawka danego zagrożenia, odpowiadające określonej reakcji fizjologicznej (w przypadku ludzi) lub strukturalnej (w przypadku konstrukcji i urządzeń).

Przedmuchiwanie to proces polegający na kontrolowanym wypuszczaniu niewielkiej ilości wodoru zgromadzonego w zbiorniku do atmosfery. Proces ten powinien być przeprowadzany w sposób kontrolowany i zgodny z obowiązującymi przepisami.

Przenikanie to ruch atomów, cząsteczek lub jonów przez substancję porowatą lub przepuszczalną.

Reforming jest procesem wytwarzania bogatej w wodór mieszanki gazowej z surowego paliwa do ewentualnego wykorzystania w ogniwie paliwowym.

Ryzyko to połączenie prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia i jego konsekwencji.

Scenariusz to zestaw okoliczności, wybrany jako przykład, który definiuje rozwój wypadku.

Sprężanie to ruch cieczy w zbiorniku spowodowany przyspieszeniem lub spowolnieniem, występujący podczas transportu tankowcami. Część energii uderzenia cieczy o ściany zbiornika zamieniana jest na energię cieplną. Sprężanie cieczy pod wpływem zmian ruchu zbiornika jest zjawiskiem, które może mieć istotne konsekwencje dla bezpieczeństwa i wydajności systemów zawierających ciecze. Poprzez odpowiednie projektowanie, monitorowanie i zarządzanie można zminimalizować negatywne skutki tego zjawiska, zapewniając bezpieczne i efektywne działanie tych systemów.

Stos ogniw paliwowych to zespół pojedynczych elektrod membranowych, które wykorzystują wodór i tlen do produkcji energii elektrycznej.

Strumień rozprężony to strumień na wylocie z dyszy o ciśnieniu równym ciśnieniu atmosferycznemu.

Taktyka jest zmienną koncepcją ustalaną na poziomie operacyjnym, właściwie do aktualnej w danym momencie i przewidywanej w najbliższej przyszłości sytuacji.

Temperatura samozapłonu to minimalna temperatura wymagana do rozpoczęcia reakcji spalania mieszaniny paliwa i utleniacza przy braku zewnętrznego źródła zapłonu.

Temperatura zapłonu to najniższa temperatura, w której paliwo wytwarza wystarczająco dużo par, aby utworzyć na jego powierzchni mieszaninę palną z powietrzem.

Termicznie aktywowane urządzenie nadciśnieniowe (TPRD) zapewnia kontrolowane uwolnienie GH_2 (wodór w postaci gazowej) z wysokociśnieniowego zbiornika magazynowego, zanim jego ścianki zostaną osłabione przez wysoką temperaturę, prowadząc do katastrofalnego pęknięcia (rozerwania).

Test penetracyjny to test na to, czy zbiornik nie ulegnie rozerwaniu, gdy pocisk przebijający pancierz lub impaktor o średnicy 7,62 mm lub większej całkowicie przebije jego ścianę.

Urządzenie nadmiarowo-ciśnieniowe (PRD) to urządzenie zabezpieczające, które chroni zbiornik magazynowy przed awarią poprzez uwolnienie części lub całej zawartości zbiornika w przypadku wysokiej temperatury, wysokiego ciśnienia lub zaistnienia obu tych czynników.

Warunki normalnej temperatury i ciśnienia (NTP) to temperatura 293,15 K i ciśnienie 101,325 kPa.

Widoczna długość płomienia to odległość w linii środkowej od końcówki dyszy do końca płomienia.

Wyłączenie awaryjne to działanie systemu sterowania, oparte na parametrach procesu, podejmowane w celu natychmiastowego zatrzymania systemu zasilania ogniów paliwowych i wszystkich jego reakcji, w celu uniknięcia uszkodzenia sprzętu i/lub zagrożenia dla personelu.

Wyładowanie iskrowe to pojedynczy kanał plazmowy pomiędzy przewodnikiem o wysokim potencjale a przewodnikiem uziemionym.

Wyładowanie szcztokowe to wyładowanie pomiędzy naładowanym izolatorem a przewodzącym punktem uziemionym.

Wypadek to nieprzewidziane i nieplanowane zdarzenie lub okoliczność.

Zakres palności to zakres stężeń pomiędzy dolną i górną granicą palności. Dolna granica palności (V_d) to najniższe stężenie, a górna granica palności (V_g) to najwyższe stężenie substancji palnej w gazowym utleniaczu, które spowoduje powstanie płomienia.

1. Wodór: właściwości i zagrożenia

1.1. Oznakowanie

Wodór jest obecny w każdej kropli wody na ziemi, co mogłoby sugerować, że jest łatwo dostępny. Nie występuje on jednak w formie wolnej, ale jest związany właśnie w cząsteczkach wody. Choć jest to paliwo wysoce wydajne i jego spalanie nie wpływa negatywnie na środowisko, to pozyskanie go z wody jest procesem energochłonnym. Ilość energii wymagana do wydzielenia wodoru z wody jest większa niż energia, którą później można z niego uzyskać.

Oznakowanie pojemników z wodorem jest istotne dla zapewnienia bezpieczeństwa podczas jego transportu, przechowywania i użytkowania. Oznakowania te muszą być zgodne z międzynarodowymi standardami, takimi jak te ustalone przez Organizację Narodów Zjednoczonych (ONZ), a także z lokalnymi przepisami, takimi jak ADR (Europejska umowa dotycząca międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych).

Na poniższych rycinach przedstawiono oznakowanie zbiorników z wodorem.



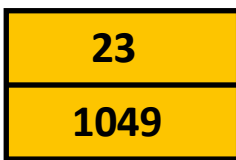
Ryc. 2. Zestaw butli z wodorem V18, obok tablice ostrzegawcze

Źródło: *European Emergency Response Guide*, s. 5.



Ryc. 3. Butla do przechowywania wodoru o poj. 50 l

Źródło: *European Emergency Response Guide*, s. 5.



Ryc. 4. Oznakowanie wodoru zgodnie z ADR, IMDG, IATA

Źródło: Messer Polska, [https://www.messer.pl > documents > Wodór.pdf](https://www.messer.pl/documents/Wodór.pdf) [dostęp: 01.08.2024].

Kluczowe oznakowania dla pojemników z wodorem:

- Etykiety ostrzegawcze:
 - numer UN: UN 1049 (sprężony wodór), UN 1966 (schłodzony, ciekły wodór) lub UN 1971,
 - symbol palności: czerwona etykieta z czarnym płomieniem (klasa 2.1),
 - symbol gazów pod ciśnieniem: etykieta pokazująca butlę gazową (klasa 2).
- Piktogramy GHS (*Globally Harmonized System*):
 - GHS02: symbol płomienia, wskazujący na łatwopalność,
 - GHS04: symbol butli gazowej, wskazujący na gazy pod ciśnieniem.
- Etykiety wskazujące właściwości fizyczne i chemiczne:
 - informacje o zagrożeniu wybuchem,
 - informacje o konieczności odpowiedniej wentylacji i środkach bezpieczeństwa.
- Inne wymagane informacje:
 - nazwa substancji: „WODÓR”

- właściwości gazu: łatwopalny, bezwonny, bezbarwny,
- producent i dane kontaktowe w razie awarii.

Klasyfikacja, oznakowanie i pakowanie (CLP¹²):

- H220 – skrajnie łatwopalny gaz,
- H280 – zawiera gaz pod ciśnieniem; może wybuchnąć po podgrzaniu,
- P210 – przechowywać z dala od ciepła, gorących powierzchni, isker, otwartego ognia i innych źródeł zapłonu. Nie palić.

Przykład oznakowania:

- numer UN: 1049,
- etykiety ostrzegawcze:
 - symbol palności (czerwona etykieta z płomieniem),
 - symbol gazu pod ciśnieniem (czarna butla na białym tle),
- piktogramy GHS:
 - GHS02 (płomień),
 - GHS04 (butla gazowa).

Wszystkie te elementy powinny być umieszczone na pojemniku w sposób widoczny i czytelny, zgodnie z wymaganiami prawnymi. Prawidłowe oznakowanie jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa osób mających do czynienia z wodorem oraz minimalizowania ryzyka wypadków¹³.

1.2. Normy i standardy

- **ADR:** europejska umowa dotycząca międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych.
- **RID:** regulamin dotyczący międzynarodowego przewozu kolejowego towarów niebezpiecznych.
- **IMDG Code:** międzynarodowy kodeks bezpieczeństwa dla statków przewożących substancje niebezpieczne.
- **ICAO Technical Instructions:** techniczne instrukcje Międzynarodowej Organizacji Lotnictwa Cywilnego dotyczące bezpiecznego przewozu towarów niebezpiecznych drogą powietrzną.

¹² Prawo.pl, *CLP – nowe zasady oznakowania i opakowania substancji i mieszanin stwarzających zagrożenie*, <https://www.prawo.pl/kadry/clp-zasady-oznakowania-i-opakowania-substancji-i-mieszanin,187058.html> [dostęp: 07.07.2023].

¹³ Messer Polska Sp. z o.o., *Karta Charakterystyki – Wodór*, <https://www.messer.pl> [dostęp: 01.08.2024].

1.3. Wodór jako nośnik energii

Wodór jest stosowany w różnych gałęziach przemysłu, szeroko rozumianym transporcie oraz coraz powszechniej do wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w gospodarstwach domowych, a także w sytuacjach kryzysowych.

Można wskazać następujące możliwości wykorzystania wodoru:

- paliwo (w postaci ciekłej lub gazowej) w transporcie lądowym i wodnym, bądź w postaci wodorków, czy też w materiałach węglowych;
- paliwo w ogniwach paliwowych, do zamiany energii chemicznej na elektryczną – zarówno w zastosowaniach mobilnych, jak i stacjonarnych;
- paliwo w samolotach, raketach i statkach kosmicznych;
- zasilanie generatorów magnetohydrodynamicznych (MHD);
- magazynowanie energii odnawialnej pozyskiwanej okresowo;
- wyrównanie obciążeń szczytowych w systemach elektroenergetycznych.

Wodór jest powszechnie stosowany jako gaz sprężony lub w postaci skroplonej. Ma on swoje specyficzne właściwości, które wiążą się z określonymi zagrożeniami.

1.4. Podstawowe właściwości wodoru

Wodór jest najlżejszym i najprostszym pierwiastkiem chemicznym. Jego podstawowe właściwości to:

- masa atomowa: 1,008 u (jednostki masy atomowej),
- stan skupienia w warunkach normalnych: gaz,
- temperatura topnienia: $-259,16^{\circ}\text{C}$,
- temperatura wrzenia: $-252,87^{\circ}\text{C}$,
- gęstość: w stanie gazowym jest bardzo lekki, jego gęstość wynosi około 0,08988 g/l w warunkach standardowych, ma bardzo niską gęstość względną w porównaniu z powietrzem, która wynosi: powietrze/wodór 14,28/1 i wodór powietrze 0,07/1,
- bardzo szybko miesza się z atmosferą, w której jest uwalniany,
- rozpuszczalność w wodzie: niska, około 1,6 mg/l w 20°C ,
- kolor, zapach, smak: wodór jest gazem bezbarwnym, bezwonnym i bezsmakowym,
- palność: jest wysoce łatwopalny. W połączeniu z tlenem tworzy wybuchową mieszaninę (stosunek 2:1 wodoru do tlenu, znany jako gaz piorunujący), może zostać zapalony przez jedną z najniższych energii zapłonu wynoszącą 0,02 mJ, podczas gdy gaz ziemny wymaga 0,28 mJ (np. elektryczność statyczna, pocieranie, wstrząsy, ciepło itp.),
- reaktywność: wodór reaguje z wieloma pierwiastkami i związkami chemicznymi, tworząc wodorki. Cechuje go wysoka reaktywność z tlenem, halogenami i metalami.

Jeżeli wodór uwalnia się po przejściu ze stanu ciekłego, to skrajnie niska temperatura gazu może spowodować, że po natychmiastowym uwolnieniu jego chmura będzie rozprzestrzeniać się poziomo lub w dół. Kondensacja wilgoci atmosferycznej może sprawić, że chmura będzie przez chwilę widoczna, nawet jeśli sam wodór jest niewidoczny.

Tabela 1. Właściwości wodoru w porównaniu z innymi źródłami energii

Właściwość	Wodór	Gaz ziemny [CH ₄]	Benzyna	Olej napędowy
Wzór chemiczny	H ₂	CH ₄	C ₈ H ₁₈	C ₈ H ₂₀
Kolor	Bezbarwny	Bezbarwny	Bezbarwny do jasno bursztynowego	Jasno bursztynowy
Zapach	Bezwonny	Nawaniany	Charakterystyczny / nieprzyjemny	Charakterystyczny / nieprzyjemny
Masa molowa [g/mol]	2,02	16,04	~ 107	~ 120–320
Stan skupienia przy 20°C	Gazowy	Gazowy	Płyn	Płyn
Temperatura wrzenia [°C]	-253	-161,5	30–215	170–390
Temperatura samozapłonu [°C]	560	595	220	250
Temperatura krytyczna / ciśnienie krytyczne	-239,3°C / 13 bar	-82,5°C / 45 bar	267–296°C / 24–27 bar	617,7°C / 21,1 bar
Granice zapłonu w powietrzu [% obj.]	4–77	5–15	0,6–8	0,6–6,5
Zakres detonacji [%]	18–59	6,3–13,5	1,1–3,3	-
Rozpuszczalność w wodzie [mg/l]	1,6	26	Nierozpuszczalny	Nierozpuszczalny

Ciąg dalszy tabeli na następnej stronie

Działania ratownicze podczas zdarzeń, w których występują instalacje
i urządzenia z wodorem

Właściwość	Wodór	Gaz ziemny [CH ₄]	Benzyna	Olej napędowy
Wzór chemiczny	H ₂	CH ₄	C ₈ H ₁₈	C ₈ H ₂₀
Minimalna energia zapłonu [mJ]	0,02	0,28	0,24	0,24
Ciepło parowania [kJ/kg]	445,4	509,9	309	544–785
Zawartość węgla [% mas.]	0	75	84	86
Wartość opałowa [MJ/kg]	119,9	45,8	43,9	42,5
Gęstość (1 bar & 273 K) [kg/m ³]	0,089	0,72	730–780	830
Stechiometryczny współczynnik nadmiaru powietrza	34,4	17,2	14,7	14,5
Liczba oktanowa (R + M) /2	130+	120+	86–94	-
Liczba cetanowa ¹⁴	-	-	13–17	40–55

Źródło: opracowanie własne na podstawie *Die DGUV Information 209-072 Wasserstoffsicherheit in Werkstätten*, <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/265> [dostęp: 11.06.2024] oraz L. Lecomte, F. Verriest, S. Wilfried, HyResponder, *European Emergency Response Guide*, 2022.

1.5. Stan skupienia wodoru a bezpieczeństwo

Wodór jest gazem bezbarwnym, bezwonny i pozbawionym smaku. Z tego powodu jego wycieki są trudne do wykrycia przez ludzkie zmysły. Substancje zapachowe nie mogą być dodawane do wodoru, podobnie jak w przypadku gazu ziemnego, ponieważ zanieczyszczają ogniwa paliwowe. Ponadto, ze względu na mniejszy rozmiar cząsteczek wodoru w porównaniu z cząsteczkami znanych substancji zapachowych, wodór może migrować/przeciekać przez otwory, których rozmiar nie jest wystarczający do przejścia przez nie substancji zapachowych. Wodór ma tendencję do oddalania się od źródła

¹⁴ Liczba cetanowa (LC) – wielkość charakteryzująca zdolność paliwa ciekłego do samozapłonu w tłokowym silniku spalinowym o zapłonie samoczynnym; źródło: Encyklopedia PWN.

wycieku szybciej niż substancje zapachowe ze względu na swoją wyporność (wysoki współczynnik dyspersji).

Wodór jest związkiem nietoksycznym, niekorozyjnym i łatwopalnym. Może powodować uduszenie poprzez rozcieńczenie tlenu w powietrzu poniżej poziomu stężenia niezbędnego do podtrzymania życia.

Wodór jest najlżejszy ze wszystkich znanych gazów.

Tabela 2. Gęstość wodoru i innych popularnych paliw względem powietrza

Nazwa gazu (par)	Gęstość względem powietrza
Wodór	0,07
Metan	0,56
Propan	1,56
Benzyna (pary benzyny)	4,00

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów <https://hyresponder.eu> [dostęp: 11.06.2024].

Gazowy wodór (GH_2) jest 14 razy lżejszy od powietrza (gęstość par wodoru wynosi 1; gęstość par powietrza wynosi 14), co oznacza, że po uwolnieniu do atmosfery będzie się szybko unosić i rozpraszać.

Spośród wszystkich gazów na Ziemi to właśnie wodór ma największą wyporność. Jest to jego główna zaleta w zakresie bezpieczeństwa, tj. w przypadku uwolnienia – szybko się unosi i rozprasza w otoczeniu.

Niepożądane konsekwencje uwolnienia wodoru do otwartej atmosfery w częściowo zamkniętych przestrzeniach są istotnie ograniczone przez wyporność. Cięższe paliwa węglowodorowe są w stanie tworzyć dość duże palne chmury, które mogą ulec spalaniu wybuchowemu. Dlatego w wielu rzeczywistych sytuacjach węglowodory mogą stanowić poważniejsze zagrożenie pożarowe i wybuchowe niż wodór.

Wodór nie powoduje korozji i nie jest reaktywny w standardowych warunkach.

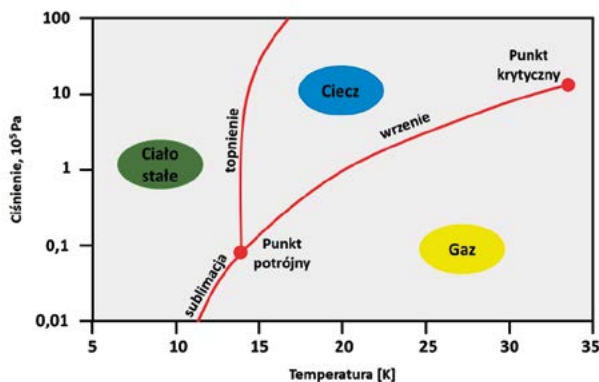
Ciekły wodór, jeśli zostanie rozlany na skórę lub przedostanie się do oczu, może spowodować poważne oparzenia spowodowane odmrożeniami lub hipotermią.

Ciekły wodór (LH_2) szybko zagotuje się lub zamieni w gaz, jeśli zostanie wystawiony na działanie normalnej temperatury lub rozlany w środowisku. LH_2 ogrzany do temperatury otoczenia może doprowadzić szybko do powstania bardzo wysokiego ciśnienia, jeśli uwolnienie będzie miało miejsce w ograniczonej przestrzeni.

Należy pamiętać, że wdychanie zimnych oparów może prowadzić do dyskomfortu oddechowego, a w skrajnych przypadkach do uduszenia.

Stosunek objętościowy ciekłego wodoru (LH_2) do gazowego (GH_2) wynosi 1:848. LH_2 rozszerza się około 850 razy po przekształceniu w gaz w warunkach normalnych (temperatura, ciśnienie) i dlatego jest przechowywany pod stosunkowo niskim ciśnieniem w dwuciennych, izolowanych próżniowo pojemnikach wyposażonych w tarcze rozrywające¹⁵, otwory wentylacyjne i urządzenia obniżające ciśnienie (PRD). Ciekły wodór ma najniższą gęstość ze wszystkich skroplonych gazów.

Wykres fazowy wodoru przedstawiono na rycinie 5. Na wykresie znajdują się trzy krzywe. Jedna pokazuje zmianę temperatury wrzenia (lub kondensacji dla przeciwnego przejścia fazowego) wraz z ciśnieniem; druga krzywa przedstawia zmianę temperatury topnienia (lub zamarzania) wraz z ciśnieniem, zaś trzecia wskazuje ciśnienia i temperatury dla procesu sublimacji (lub resublimacji). Proces kondensacji jest również znany jako skraplanie.



Ryc. 5. Diagram fazowy wodoru

Źródło: opracowanie własne na podstawie V. Molkov, *Fundamentals of hydrogen safety engineering*, Part I, 2012.

¹⁵ Tarcze rozrywające w butlach to mechanizmy bezpieczeństwa stosowane w zbiornikach do przechowywania gazów pod wysokim ciśnieniem, takich jak wodór. Ich głównym zadaniem jest zapobieganie potencjalnej eksplozji lub nadmiernemu wzrostowi ciśnienia wewnątrz zbiornika. Tarcze te są tak zaprojektowane, aby pękały lub otwierały się, gdy ciśnienie gazu przekroczy bezpieczny limit. Zastosowanie tarcz rozrywających jest szczególnie ważne w przypadku wodoru, który jest gazem wysoce palnym i może być niebezpieczny przy nieodpowiednim przechowywaniu lub zarządzaniu. Mechanizm działania tarcz rozrywających opiera się wykorzystaniu materiałów o znanej wytrzymałości na rozciąganie. W momencie, gdy ciśnienie gazu osiąga wartość mogącą zagrozić strukturalnej integralności zbiornika, tarcza rozrywa się, umożliwiając kontrolowane uwolnienie gazu, co zapobiega eksplozji. W kontekście przemysłowym i badawczym zbiorniki z wodorem wyposażone w takie tarcze muszą być regularnie sprawdzane i konserwowane, aby zapewnić ich właściwe funkcjonowanie i bezpieczeństwo; źródło: OpenAI. ChatGPT.Wersja 4.0. 2024.OpenAI, <https://chatgpt.com/>.

Wodór może występować w postaci gazowej, ciekłej lub pasty. LH_2 jest przezroczystą cieczą o jasnoniebieskim zabarwieniu. Wodór w postaci pasty jest mieszaniną wodoru stałego i ciekłego w temperaturze punktu potrójnego. W praktyce przejście między fazą gazową, ciekłą i stałą wodoru odbywa się w bardzo niskich temperaturach. Wodór staje się metalem pod ciśnieniem 495 GPa, w temperaturze 5,5 K. W tym stanie wykazuje dobre przewodnictwo elektryczne i inne właściwości metaliczne.

1.6. Oddziaływanie wodoru na metale i polimery

Oddziaływanie wodoru na metale i polimery może mieć istotne konsekwencje w zależności od warunków eksploatacyjnych i rodzaju materiałów. Ze względu na niewielki rozmiar cząsteczek i atomów wodór może być łatwo absorbowany przez różne materiały, w tym te stosowane do jego przechowywania. W związku z tym muszą one być nie tylko kompatybilne¹⁶ z wodorem, ale również odporne na wysokie ciśnienia, niskie temperatury oraz obciążenia cykliczne lub statyczne.

Degradacja mechaniczna materiałów pod wpływem wodoru stanowi poważny problem i doprowadza do licznych wypadków podczas produkcji, przechowywania, transportu i użytkowania wodoru.

Prawidłowy dobór odpowiednich materiałów, z których tworzone są komponenty, ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa systemów magazynowania wodoru. Na kompatybilność wodoru z metalami wpływają interakcje chemiczne i efekty fizyczne, takie jak:

- korozja,
- kruchość wodorowa,
- kruchość w niskich temperaturach,
- gwałtowne reakcje (np. stan zapłonu wodoru).

Zapobieganie kruchości wodorowej obejmuje zastosowanie odpowiednich praktyk przemysłowych, takich jak kontrola wilgotności, ochrona antykorozyjna, czy stosowanie stopów metalu, które są mniej podatne na to zjawisko. Dodatkowo, praktyki takie jak obróbka cieplna czy redukcja obecności wodoru w procesach przemysłowych mogą również ograniczyć ryzyko kruchości wodorowej.

¹⁶ Kompatybilny – odpowiadający czemuś lub przystosowany do czegoś pod każdym względem; źródło: Słownik Języka Polskiego PWN.

1.7. Wycieki wodoru

Wodór jest podatny na wycieki, ponieważ jego cząsteczka ma niewielki rozmiar. Uwolnienia wodoru powstają najczęściej przy zaworach i połączeniach, które mogą występować w zależności od konstrukcji instalacji – zarówno na terenie otwartym, jak i w budynku. Uwolnienia mogą mieć dwojaki charakter: z zapłonem i bez zapłonu.

Chociaż pęknięcie rury lub zbiornika jest rzadkim zdarzeniem, należy je traktować jako możliwy najgorszy scenariusz. Uwolnienie wodoru przez zawór lub w wyniku pęknięcia rury powoduje powstanie strumienia wypływającego wodoru pod bardzo wysokim ciśnieniem.

Pojazdy zasilane wodorem są standardowo wyposażane w zbiorniki wodoru pod ciśnieniem do 70 MPa, a infrastruktura tankowania pracuje pod ciśnieniem do 100 MPa. Badania przeprowadzone w ramach projektu HyResponder wykazały, że:

- **w przypadku uwolnień wodoru bez zapłonu**, ze zbiorników magazynowych pod ciśnieniem 35 MPa i 70 MPa największe zagrożenie występuje w ciągu 10 s po otwarciu TPRD¹⁷, a czas trwania zagrożenia związanego z wypływem wodoru jest krótszy niż 2 min,
- wartość bezpiecznej odległości dla uwolnień wodoru bez zapłonu z TPRD skierowanego pionowo w dół pod pojazdem FCV jest znacznie mniejsza niż w przypadku swobodnych strumieni,
- zarówno dla osób postronnych, jak i ratowników niewyposażonych w termiczną odzież ochronną, bezpieczna odległość od miejsca uwolnienia wodoru bez zapłonu wynosi od 8 do 12 m w zależności od ciśnienia przechowywania.

Tabela 3. Źródła wycieków i scenariusze opracowane przez EIGA (2007)

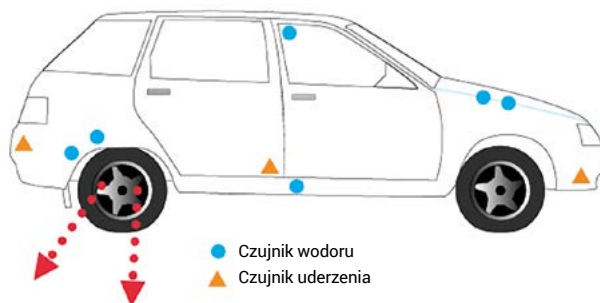
Sprzęt/element	Rodzaj wycieku
Rurociągi	Dziury, pęknięcie rury
Kołnierze	Uszkodzenie uszczelki, ruch termiczny, pękanie materiału
Połączenie spawane	Pęknięcie spoiny
Połączenie lutowane	Pęknięcie lutu, stopiony lut
Połączenie centralne	Ruch termiczny, nieszczelność

¹⁷ TPRD – termiczne urządzenie nadmiarowe, które jest przeznaczone do odprężania zbiorników i naczyń ciśnieniowych w przypadku przegrzania. Szklana ampulka ulega zniszczeniu po osiągnięciu temperatury krytycznej (zwykle 110°C), uwalniając wodór ze zbiornika przez zawór bezpieczeństwa w bardzo krótkim czasie. Szczególną cechą TPRD montowanego na końcu zbiornika jest możliwość jego obracania; źródło: <https://hyfindr.com/en/shop/products/thermal-pressure-relief-device> [dostęp: 20.07.2024].

Sprzęt/element	Rodzaj wycieku
Połączenie śrubowe	Nieszczelność, uszkodzenie szczeliwa, pękanie, pęknięcie materiału
Podłączenie węży	Wyciek uszczelki, pęknięcie materiału, błąd ludzki
Zawory	Nieszczelność trzpienia, nieszczelność uszczelki, pęknięcie maski/obudowy spowodowane uderzeniem
Węże	Perforacja, rozerwanie
Narzędzia	Pęknięcie elementu
Regulatory	Pęknięcie membrany, nieszczelność uszczelki, pęknięcie w dolnej części (naciśnienie)
Zawory elektromagnetyczne	Nieszczelność uszczelki
Pompy	Perforacja, nieszczelność uszczelki
Zbiorniki ciśnieniowe	Perforacja, pęknięcie, nieszczelność

Źródło: EIGA, Europejskie Stowarzyszenie Gazów Przemysłowych, Określanie bezpiecznych odległości, IGC Doc 75/0 7/E, 2007.

W samochodach napędzanych wodorem stosuje się czujniki, które mają za zadanie wykryć wyciek wodoru z instalacji. Rozmieszczenie czujników jest starannie skorelowane z możliwymi scenariuszami wycieku wodoru. Ważne, aby wiedzieć, że w technologiach bezpieczeństwa wodorowego czujniki nie zapewniają pełnej wykrywalności ze względu na wyporność i dyfuzyjność wodoru. Na przykład czujnik wodoru będzie mało przydatny w dużej obudowie lub na zewnątrz. Rozmieszczenie czujników powinno być starannie przemyślane. Do ochrony personelu i obiektów niezbędne są zarówno czujniki stacjonarne, jak i osobiste/podręczne.



Ryc. 6. Przykładowe rozmieszczenie czujników w pojeździe FCEV

Źródło: European Train the Trainer Programme for Responders, Lecture 7. Unignited hydrogen releases outdoors and their mitigation.

Istnieją również wymagania dotyczące montażu czujników wodoru w pojazdach FCEV w celu ostrzeżenia o potencjalnych wyciekach. Czujniki te powinny być umieszczone w miejscach, gdzie powstanie wycieków wodoru jest najbardziej prawdopodobne, czyli takich jak:

- połączenia wodorowe, które są normalnie rozdzielone (na przykład porty tankowania wodoru),
- miejsca, w których może gromadzić się wodór.

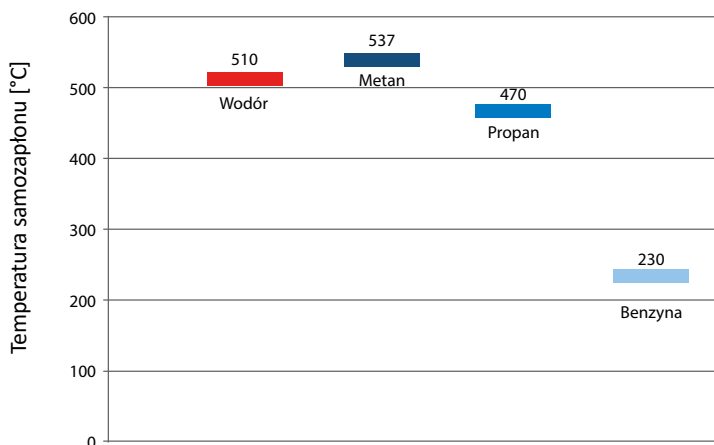
Ponadto należy rozważyć umieszczenie czujników w kanałach wlotowych powietrza do budynku, na wypadek gdyby wodór mógł dostać się do niego z zewnątrz (np. z zaparkowanego samochodu) oraz w kanałach wentylacyjnych, jeśli uwolnienie wodoru mogłoby mieć miejsce wewnątrz obiektu.

1.8. Źródła zapłonu i granice wybuchowości wodoru

Wodór bardzo łatwo ulega zapłonowi. Potencjalne źródła zapłonu obejmują iskry mechaniczne powodowane przez szybko zamykające się zawory, wyładowania elektrostatyczne w nieuziemionych filtrach cząstek stałych, iskry z urządzeń elektrycznych, cząstki katalizatora, urządzenia grzewcze, wyładowania atmosferyczne w pobliżu komina wentylacyjnego itp. Dlatego źródła zapłonu powinny być eliminowane lub odizolowane w odpowiedni sposób, a wszelkie operacje należy przeprowadzać, biorąc pod uwagę możliwość wystąpienia nieprzewidzianego źródła zapłonu.

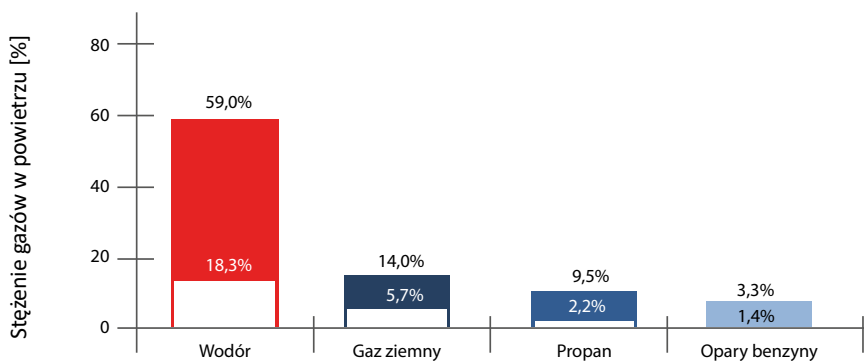
Minimalna energia zapłonu wodoru (MIE) jest bardzo niska. Oznacza to, iż minimalna wartość energii wymagana do zapalenia mieszanki wodoru i powietrza w stanie spoczynku w najbardziej zapalnym stężeniu (dla wodoru to 29,5% objętości w powietrzu) to zaledwie 0,017 mJ.

Natomiast standardowa temperatura samozapłonu wodoru w powietrzu wynosi powyżej 510°C. Jest ona stosunkowo wysoka w porównaniu do węglowodorów. Jak pokazano na rycinie 7, wodór, propan i gaz ziemny (tj. metan) mają podobne wartości temperatur samozapłonu, które są co najmniej dwukrotnie wyższe niż temperatura samozapłonu par benzyny.



Ryc. 7. Temperaty samozapłonu wybranych paliw

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów ze strony <https://hyresponder.eu> [dostęp: 22.04.2024].



Ryc. 8. Zakres górnej oraz dolnej granicy wybuchowości wybranych gazów

Źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów ze strony <https://hyresponder.eu> [dostęp: 22.04.2024].

Zakres palności określa przedział stężeń substancji w mieszaninie gazów, w którym substancja ta może ulec zapaleniu. Dla wodoru zakres palności w powietrzu wynosi objętościowo od około 4 do 75%.

1.9. Możliwe źródła zapłonu wodoru

Ze względu na wysoką gęstość wodoru w postaci cieczy oraz jego szybkie parowanie w temperaturze otoczenia, powstająca w ten sposób palna chmura będzie znacznie większa niż chmura wywołana uwolnieniem gazowego wodoru. Dlatego też konsekwencje w przypadku zapłonu takiej chmury są większe pod względem intensywności i zasięgu oddziaływania. Jeśli ciśnienie jest wystarczająco niskie lub średnica otworu, przez który uwalnia się wodór, jest wystarczająco duża, w niektórych warunkach oprócz strumienia wodoru można zaobserwować zjawisko tworzenia się kropelek wodoru spadających na ziemię i tworzących kałużę. W takich przypadkach trudno jest określić, które zjawisko – czy strumień, czy kałuża – wywoła największe konsekwencje w przypadku zapłonu oraz jakie będą skutki połączenia tych dwóch zjawisk fizycznych.

Wyciek ciekłego wodoru może spowodować powstanie kałuży. Ciekły wodór odparuje i utworzy łatwopalną chmurę o znacznej objętości. Warunki wietrzne mają znaczący wpływ na propagację i rozproszenie się takiej chmury.

W przypadku wycieku LH_2 na terenie przemysłowym może powstać zimna i reaktywna chmura H_2 /powietrze. W razie zapłonu wodoru na otwartej przestrzeni płomień może oddziaływać z przeszkodami (parownik, stojak na rury, roślinność), co może prowadzić do przyspieszenia płomienia, a nawet w najgorszym przypadku do przejścia deflagracji w detonację.



Ryc. 9. Uwalnianie LH_2 na dużą skalę i opóźniony zapłon (5 bar – 12 mm; projekt PRES-LHY – HSE)

Źródło: https://hysafe.info/uploads/2021_presentations/153.pdf [dostęp: 20.07.2024].

Dokładne określenie źródła zapłonu wodoru nie jest proste ze względu na niską minimalną energię zapłonu (MIE) wodoru. Z tego samego powodu często trudno też ustalić, jaki był mechanizm zapłonu.

Poniżej przedstawiono listę możliwych źródeł zapłonu:

1. Elektryczne źródła zapłonu:
 - iskry elektryczne (np. z urządzeń elektrycznych),
 - wyładowania statyczne (np. w nieziemionych filtrach cząstek stałych),

- łuk elektryczny (przełączniki, silniki elektryczne, telefony przenośne, pagery i radia),
 - wyładowanie atmosferyczne (np. uderzenie pioruna w pobliżu komina wentylacyjnego),
 - ładunek elektryczny generowany przez działanie sprzętu (sprężarki, generatory, pojazdy i inny sprzęt budowlany),
 - zwarcia elektryczne lub inne urządzenia elektryczne,
 - naelektryzowane cząsteczki.
2. Mechaniczne źródła zapłonu:
- iskry mechaniczne (z szybko zamykających się zaworów),
 - uderzenie mechaniczne i/lub tarcie,
 - pęknięcie metalu,
 - wibracje mechaniczne i powtarzające się zginanie.
3. Źródła ciepła jako źródła zapłonu:
- gorące powierzchnie (np. urządzenia grzewcze),
 - otwarty ogień,
 - gorące dysze,
 - spaliny (np. silniki spalinowe i kominy wydechowe),
 - ładunki wybuchowe (np. ładunki używane w budownictwie, fajerwerki lub urządzenia pirotechniczne),
 - katalizatory, materiały wybuchowe i reaktywne materiały chemiczne,
 - fale uderzeniowe i/lub odłamki,
 - odbite lub powtarzające się fale akustyczne i uderzeniowe.
4. Inne źródła zapłonu:
- promieniowanie jonizujące (radioaktywność),
 - promieniowanie elektromagnetyczne,
 - promieniowanie ultradźwiękowe,
 - światło (laser/błysk),
 - kompresja adiabatyczna (wzrost ciśnienia).

Istnieją trzy główne rodzaje wyładowań elektrostatycznych mogących doprowadzić do zapłonu:

- iskrowe – pojedynczy kanał plazmowy między przewodnikiem o wysokim potencjale a uziemionym przewodnikiem,
- szcztokowe – wyładowanie między naładowanym izolatorem a uziemionym punktem przewodzącym,
- koronowe – ciche, zwykle ciągłe wyładowanie z prądem, ale bez kanału plazmowego.

Natomiast w przypadku zapłonu łatwopalnych mieszanin kluczowe znaczenie mają właściwości płonących cząstek metalu lub iskiei, takie jak:

- rozmiar,

- rodzaj materiału,
- prędkość,
- temperatura,
- liczba,
- szybkość i czas spalania.

Z kolei zapłon od gorącej powierzchni jest powszechny w przypadku najbardziej łatwopalnych mieszanin gazu z parą wodną. Sytuacja taka zachodzi, gdy otoczenie zapewnia wystarczająco wysoką temperaturę, a ciepło spalania nie może zostać oddane do otaczających powierzchni, co umożliwia postęp reakcji łańcuchowej utleniania.

1.10. Promieniowanie płomienia wodoru

Wodór spala się bladoniebieskim płomieniem i nie emituje ani światła widzialnego w ciągu dnia (ponieważ promieniowanie słoneczne może przyćmić widoczność płomienia wodoru), ani dymu (wytwarza tylko wodę, gdy spala się w powietrzu), chyba że cząsteczki zawierające sól lub pył są porywane i spalane wraz z mieszaniną palną.

W porównaniu do spalania węglowodorów płomienie palącego się wodoru emitują znacznie mniej ciepła. W związku z tym fizyczne odczucie tego ciepła przez człowieka następuje dopiero po bezpośrednim kontakcie z płomieniem. Pożar wodoru może pozostać niewykryty i rozprzestrzeniać się pomimo bezpośredniego monitorowania przez ludzi w obszarach, w których wodór może wyciekać, rozlewać się lub gromadzić i tworzyć potencjalnie palne mieszaniny. Dlatego strumienie konwekcyjne i radiacyjne są ważnymi parametrami, które muszą być oceniane w celu ochrony życia, mienia i środowiska.



Ryc. 10. Uwalnianie zapalonego wodoru w wolnej przestrzeni (200 bar, średnica otworu 3,1 mm).

Źródło: https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2022/01/HyResponder_D1_1_H2-systems-and-safety-features_Final-21122021.pdf [dostęp: 20.07.2024r.]

Wodór ma tendencję do ulatniania się, co może stanowić problem w pomieszczeniach. Nagromadzenie wodoru w obudowie lub zamkniętej przestrzeni może prowadzić do powstania łatwopalnej mieszaniny z powietrzem (lub tlenem). Ponadto istnieją inne problemy związane z niepożądanymi uwolnieniami, takie jak zjawisko ciśnienia szczytowego (PPP) i skutki wyczerpania tlenu. Gdy dojdzie do zapłonu wyciekającego wodoru, pomóc w opanowaniu sytuacji może odpowiednia wentylacja (patrz rozdz. 8.2.) Oprócz płomienia i związanych z nim zagrożeń, takich jak temperatura i przepływ ciepła, powstają gorące gazowe produkty spalania, które również mogą stanowić zagrożenie. Gdy produkty te unoszą się, pod sufitem może utworzyć się warstwa gorącego gazu.

Bardzo ważnym aspektem jest dobra wentylacja pomieszczeń zamkniętych. Wentylacja może być pasywna lub aktywna.

1.11. Ciekły wodór – zagrożenia dla zdrowia

Poniżej przedstawiono **zagrożenia dla zdrowia** związane z uwolnieniem skroplonego wodoru:

- **kontakt z ciekłym wodorem** lub jego rozpryskami na skórze lub w oczach może spowodować poważne oparzenia zimnem w wyniku odmrożenia lub hipotermii,
- **oparzenia kriogeniczne** mogą również wynikać z kontaktu niezabezpieczonych części ludzkiego ciała z zimnymi płynami lub powierzchniami,
- **wdychanie zimnych oparów wodoru** może powodować **dyskomfort oddechowy** i skutkować uduszeniem,
- **bezpośredni kontakt fizyczny z LH₂**, zimnymi oparami lub zimnym sprzętem może spowodować poważne uszkodzenie tkanek. Chwilowy kontakt z niewielką ilością cieczy może nie stwarzać tak dużego zagrożenia poparzeniem, ponieważ może tworzyć się ochronna warstwa parującego gazowego wodoru. Niebezpieczeństwo zamarznięcia występuje w przypadku rozlania dużych ilości cieczy i rozległego narażenia¹⁸,
- **zakłócenia akcji serca** jest prawdopodobne, gdy wewnętrzna temperatura ciała spadnie do 27°C lub poniżej tej wartości; do zgonu może dojść, gdy wewnętrzna temperatura ciała spadnie poniżej 15°C,
- **uduszenie** jest kolejną możliwą konsekwencją uwolnienia i odparowania skroplonego wodoru w pomieszczeniu.

¹⁸ Wpływ ciekłego azotu, [https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZ\]Qk80A&feature=youtu.be&t=291](https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZ]Qk80A&feature=youtu.be&t=291) [dostęp: 20.04.2024].

1.12. Pierwsza pomoc w przypadku oparzeń kriogenicznych

Bezpośredni kontakt fizyczny z ciekłym wodorem, zimnymi oparami lub zimnym sprzętem może spowodować poważne uszkodzenie tkanek.

Poszkodowany, który doznał odmrożeń, powinien zostać przeniesiony w bezpieczne miejsce tylko wtedy, gdy można to zrobić bez narażania innych osób. Odparowujący ciekły wodór zamienia się w gaz, generując wysokie prawdopodobieństwo powstania łatwopalnej lub wybuchowej mieszaniny.

Zamrożona tkanka nie jest bolesna i wygląda na żółtą i woskową. Tkanka staje się bolesna i zmienia kolor na różowy lub czerwony po rozmrożeniu. Gdy temperatura wewnętrzna ciała spadnie do 27°C, prawdopodobne są zaburzenia pracy serca.

Jeśli temperatura ciała jest obniżona, pacjent musi być ogrzewany stopniowo, tak aby uniknąć wstrząsu i/lub zaburzeń pracy serca.

W przypadku oparzenia kriogenicznego należy jak najszybciej uzyskać pomoc medyczną. Leczenie zamrożonej tkanki wymaga nadzoru medycznego i specjalistycznej terapii, ponieważ nieprawidłowe praktyki pierwszej pomocy niezmiennie pogarszają obrażenia. Działania ratownicze sprowadzają się najczęściej do zabezpieczenia uszkodzonego obszaru luźną osłoną.

Kilka ważnych rzeczy, które należy zapamiętać:

- nie zdejmuj zamrożonych rękawic, butów ani odzieży,
- nie masuj części ciała, które uległy odmrożeniu,
- nie wystawiaj odmrożeń na działanie temperatury powyżej 44°C, np. grzejnika lub ognia,
- nie używaj pryszniców bezpieczeństwa, fontann do przemywania oczu ani wody z innych źródeł,
- nie nakładaj śniegu ani lodu na odmrożoną powierzchnię ciała,
- nie nakładaj maści.

Dedykowana edukacja ratowników dotycząca zagrożeń związanych z uszkodzeniem tkanek spowodowanym zimnem, a także profilaktyka i opieka w nagłych wypadkach powinny znaleźć się w programach szkoleniowych dotyczących operacji i reagowania w sytuacjach awaryjnych z udziałem wodoru.

1.13. Szkodliwy wpływ spalania wodoru na ludzi

Produkty spalania paliw konwencjonalnych mogą stanowić istotne zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi. W przypadku wodoru zagrożenie to jest uważane za mniejsze, ponieważ jedynym produktem spalania jest para wodna (nietoksyczna, nietrująca). Mimo to możliwe pożary wtórne mogą wytwarzać dym lub inne produkty spalania,

które będą już stanowiły zagrożenie dla zdrowia. Poniżej przedstawiono wybrane zagrożenia wraz z ich krótką charakterystyką.

Temperatura powietrza

W przypadku pożaru wodoru otaczające powietrze ulega silnemu ogrzaniu, co może mieć wpływ na osoby znajdujące się w pobliżu. Bezpośredni kontakt z płonącym wodorem lub gorącymi gazami powstałymi w wyniku jego spalania może spowodować poważne oparzenia. Wzrost temperatury powietrza może wpływać na zaburzenia oddychania lub oparzenia. Wysokie temperatury mogą również prowadzić do zapaści.

Wpływ bezpośredniego kontaktu z płomieniami wodoru

Wpływ płomienia wodoru na ludzi jest podobny do wpływu płomieni innych popularnych paliw. Bezpośredni kontakt z płonącym wodorem lub gorącymi gazami powstałymi w wyniku spalania wodoru powoduje poważne oparzenia.

Wpływ strumienia ciepła promieniowania z pożarów wodoru

Osoby znajdujące się w pobliżu płomienia wodoru mogą go nie zauważyć, dopóki nie wejdą z nim w kontakt. Bez odpowiedniego sprzętu wykrywającego, pierwszym sygnałem małego płomienia może być „syczący” dźwięk gazu wydostającego się przez otwór, a także „fale ciepłe”.

Płomień wodorowy emituje minimalną ilość promieniowania podczerwonego i praktycznie nie emituje promieniowania widzialnego.

W przypadku osób, które nie mają bezpośredniego kontaktu z płomieniami wodoru, istnieje możliwość, że będą one narażone na intensywne strumienie ciepła przez dłuższy czas, co może prowadzić do oparzeń pierwszego, drugiego lub trzeciego stopnia.

Wpływ nadciśnienia na ludzi

Jednym z najważniejszych pośrednich skutków nadciśnienia są latające odłamki (zwane również pociskami). Zakres obrażeń zależy od wielkości i masy odłamków, prędkości uderzenia i miejsca uderzenia w ciało człowieka. Prędkość przemieszczania się takiego „pocisku” jest głównym czynnikiem powodującym obrażenia. Prawdopodobieństwo powstania rany penetrującej wzrasta wraz ze wzrostem prędkości, szczególnie w przypadku małych pocisków, takich jak odłamki szkła.

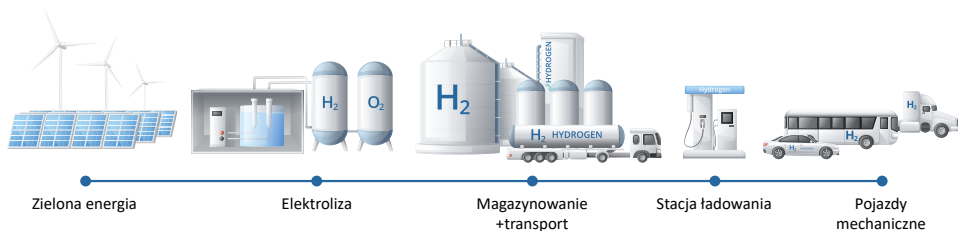
1.14. Podsumowanie

Wodór jest powszechnie stosowanym gazem o wielu przeznaczeniach oraz właściwościach, które mają istotny wpływ na bezpieczeństwo jego użytkowania. Do tych, które mają największe znaczenie pod względem bezpieczeństwa, należą:

1. **Palność:** wodór jest łatwopalnym gazem o szerokim zakresie stężeń 4–75%. Wodór może łatwo ulec zapłonowi, a w przypadku zbyt dużego stężenia w powietrzu może dojść do eksplozji.
2. **Niska masa cząsteczkowa:** wodór ma bardzo niską masę cząsteczkową, w związku z czym może szybko się rozprzestrzeniać. To może zwiększyć ryzyko eksplozji, gdy jest uwolniony w niewłaściwych warunkach.
3. **Wpływ na inne materiały:** wodór może wpływać na właściwości wielu materiałów, szczególnie metali. Może prowadzić do ich korozji, zmniejszając przez to ich wytrzymałość.
4. **Wysokie ciśnienie:** wodór jest przechowywany w postaci skroplonej lub sprężonej pod wysokim ciśnieniem. Dlatego konieczne są specjalne środki ostrożności przy jego transporcie i przechowywaniu, aby uniknąć wycieków lub uszkodzeń zbiorników.
5. **Szerokie zakresy zapłonu:** wodór ma szeroki zakres zapłonu, co oznacza, że jest zdolny do zapalenia się w różnych warunkach.
6. **Elektryczność statyczna:** wodór może łatwo naładować się statycznie, co zwiększa ryzyko zaiskrzenia. Dlatego konieczne jest stosowanie odpowiednich środków bezpieczeństwa, aby zapobiec potencjalnym sytuacjom niebezpiecznym.
7. **Względna przezroczystość:** wodór jest bezbarwny i bezwonny, co sprawia, że trudno go zauważyć. To z kolei zwiększa ryzyko niewykrytych wycieków, które mogą prowadzić do niebezpiecznych sytuacji.

2. Produkcja wodoru

Polska jest znaczącym producentem wodoru, zajmując trzecie miejsce w Unii Europejskiej i piąte na świecie pod względem rocznej produkcji, która sięga ponad milion ton. Wodór jest wykorzystywany głównie w przemyśle chemicznym, rafineryjnym i spożywczym. Obecnie wodór w Polsce jest pozyskiwany głównie w procesie reformingu parowego metanu z wykorzystaniem gazu ziemnego lub węglowodorów. Jest to metoda emisyjna, generująca dwutlenek węgla (CO_2). Polska dąży do rozwoju produkcji zielonego wodoru, czyli produkowanego z odnawialnych źródeł energii, takich jak energia słoneczna, wiatrowa i wodna. Polska Strategia Wodorowa zakłada, że do 2030 r. moc zainstalowanych elektrolizerów w Polsce ma osiągnąć 2 GW, co umożliwi produkcję 193,6 tys. ton wodoru rocznie.



Ryc. 11. Poglądowy schemat procesu produkcji, magazynowania oraz wykorzystania zielonego wodoru

Źródło: https://www.poprostuslonce.pl/poprostuslonce-pl/rozwiązania-wodorowe?gad_source=1&gc-lid=EAlaIQobChMlofnmx3PhQMVB62DBx18mAurEAAYASAAEgKmBPD_BwE [dostęp: 11.06.2024].

Istnieje szereg wyzwań w zakresie rozwoju produkcji wodoru w Polsce:

- wysokie koszty produkcji: produkcja zielonego wodoru jest wciąż droższa niż wodoru szarego,
- niewystarczająca infrastruktura: brakuje stacji tankowania wodoru i magazynów,
- niewystarczająca świadomość: należy zwiększyć świadomość społeczeństwa na temat potencjału wodoru jako paliwa czystego i odnawialnego.

Mimo powyższych trudności, Polska ma duży potencjał do stania się liderem w produkcji i wykorzystaniu wodoru.

3. Ogniwa paliwowe: zasada działania i zastosowania

Technologie wodorowych ogniw paliwowych (FCH) dla pojazdów drogowych i specjalistycznych mają coraz większe znaczenie. Ważnym krokiem ku upowszechnianiu się tych pojazdów jest dostępność infrastruktury do tankowania. Niektórzy producenci samochodów, np. Toyota, rozpoczęli już sprzedaż pojazdów FCH w regionach, w których istnieje już infrastruktura do tankowania. Przykłady pojazdów drogowych obejmują samochody osobowe, autobusy, skutery, lekkie pojazdy użytkowe itp. Wykorzystują one wodór jako paliwo i nie mają tradycyjnych silników spalinowych – zamiast nich stosowane są silniki elektryczne i ogniwa paliwowe (FC). Pod względem wyglądu pojazdy z napędami wodorowymi nie różnią się istotnie od innych pojazdów. Nie emitują zanieczyszczeń i są bardzo ciche podczas użytkowania. Kolejnym ważnym zastosowaniem napędów wodorowych są pojazdy specjalne, np. wózki widłowe FC, których zapotrzebowanie na moc wynosi od 1,5 do 10 kW. Obecnie coraz więcej firm inwestuje we flotę wózków widłowych FC i infrastrukturę do tankowania, ponieważ mogą od razu czerpać korzyści z ich użytkowania.

Ogniwo paliwowe to ogniwo galwaniczne, które wymaga stałego zewnętrznego dopływu reagentów, ponieważ produkty reakcji są na bieżąco usuwane. W przeciwieństwie do baterii, nie przechowuje ono energii chemicznej ani elektrycznej; ogniwo paliwowe umożliwia pozyskiwanie energii elektrycznej bezpośrednio z reakcji chemicznej.

3.1. Wodorowe ogniwa paliwowe – działanie, zalety, zastosowania

Ogniwa paliwowe to urządzenia elektrochemiczne, które zamieniają energię chemiczną paliwa i utleniacza na energię elektryczną.

Zasada działania ogniw paliwowych jest następująca:

1. Paliwo (np. wodór, metan, gaz ziemny) i utleniacz (np. tlen z powietrza) są doprowadzane do elektrod ogniwa.
2. Na anodzie (elektrodzie ujemnej) paliwo ulega utlenieniu, oddając elektrony.
3. Elektrony przepływają przez zewnętrzny obwód elektryczny, generując prąd elektryczny.

4. Na katodzie (elektrodzie dodatniej) utleniacz ulega redukcji, łącząc się z elektronami i jonami wodoru (H^+), tworząc wodę (H_2O) jako produkt uboczny.

Zalety ogniw paliwowych:

1. Wysoka sprawność – mogą osiągać sprawność do 60%, co oznacza, że 60% energii chemicznej paliwa przekształca się w energię elektryczną.
2. Czysta praca – nie emitują szkodliwych substancji spalinowych, w wyniku czego nie zanieczyszczają środowiska.
3. Cicha praca – są idealnym źródłem zasilania dla obszarów wrażliwych na hałas.
4. Modułowa budowa – pozwala to na dostosowanie ich mocy do potrzeb użytkownika.

Zastosowania ogniw paliwowych:

1. Transport – zasilanie samochodów osobowych, autobusów, ciężarówek, statków i pociągów.
2. Energetyka – jako stacjonarne źródła zasilania dla budynków i elektrowni.
3. Urządzenia przenośne – do zasilania laptopów, telefonów i innych urządzeń przenośnych.
4. Wojsko – do zasilania sprzętu wojskowego, takiego jak generatory prądu i systemy łączności.

3.2. Ogniw paliwowe zasilane metanolem: zasada działania, zalety i wady, zastosowania

Ogniw paliwowe mogą być także zasilane metanolem – alkoholem o wzorze chemicznym CH_3OH .

Zasada działania ogniw paliwowych zasilanych metanolem:

1. Metanol w postaci ciekłej lub gazowej jest doprowadzany do anody ogniwa.
2. Na anodzie katalizator utlenia metanol do dwutlenku węgla (CO_2) i jonów wodoru (H^+).
3. Jony wodoru przenikają przez membranę oddzielającą anodę od katody.
4. Na katodzie katalizator redukuje tlen (O_2) z powietrza do jonów tlenowych (O_2).
5. Jony wodoru i jony tlenowe łączą się ze sobą, tworząc wodę (H_2O), która jest produktem ubocznym procesu.
6. Podczas przepływu jonów wodoru przez membranę generowany jest prąd elektryczny.

Zalety ogniw paliwowych zasilanych metanolem:

1. Wysoka sprawność – mogą osiągać sprawność do 60%, co oznacza, że 60% energii chemicznej metanolu zamienia się w energię elektryczną.

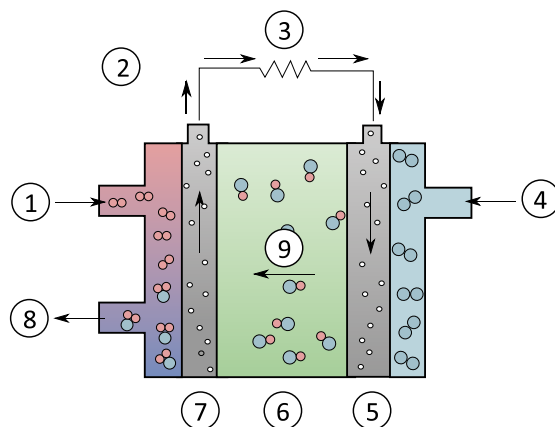
2. Czysta praca – emitują mniej szkodliwych substancji spalinowych niż silniki spalinowe, co czyni je bardziej przyjaznymi dla środowiska.
3. Cicha praca – są idealnym źródłem zasilania dla obszarów wrażliwych na hałas.
4. Dostępność paliwa – metanol jest łatwo dostępnym paliwem, które można produkować z różnych surowców, takich jak biomasa, gaz ziemny i węgiel.

Wady ogniw paliwowych zasilanych metanolem:

1. Wysoki koszt – ogniwa paliwowe zasilane metanolem są drogie w produkcji.
2. Toksyczność – może być niebezpieczny w przypadku połknięcia lub wchłonięcia przez skórę.
3. Niewystarczająca infrastruktura – brakuje stacji tankowania metanolu, co utrudnia stosowanie ogniw paliwowych zasilanych tym paliwem.

Zastosowania ogniw paliwowych zasilanych metanolem:

1. Transport – zasilanie samochodów osobowych, autobusów, ciężarówek i innych pojazdów.
2. Energetyka – jako stacjonarne źródła zasilania dla budynków i elektrowni.
3. Urządzenia przenośne – zasilanie laptopów, telefonów i innych urządzeń przenośnych.
4. Wojsko – wykorzystywane do zasilania sprzętu wojskowego, takiego jak generatory prądu i systemy łączności.



Ryc. 12. Schemat alkalicznego ogniwa paliwowego (1 – wodór; 2 – przepływ elektronów; 3 – ładunek; 4 – tlen; 5 – katoda; 6 – elektrolit; 7 – anoda; 8 – woda; 9 – jony wodorotlenkowe)

Źródło: W.M. Lewandowski, *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, Warszawa 2006.

Podobnie jak pojazdy w pełni elektryczne, pojazdy elektryczne z ogniwami paliwowymi wykorzystują energię elektryczną wytwarzaną przez ogniwo paliwowe do zasilania silnika elektrycznego. W przeciwieństwie do innych pojazdów elektrycznych, pojazdy FCEV wytwarzają energię elektryczną za pomocą ogniwa paliwowego zasilanego wodorem, zamiast pobierać energię elektryczną tylko z akumulatora. Podczas projektowania pojazdu, producent definiuje moc pojazdu poprzez rozmiar silnika elektrycznego (silników elektrycznych), który otrzymuje energię elektryczną z odpowiednio dobranej kombinacji ogniwa paliwowego i akumulatora. Większość dzisiejszych pojazdów z ogniwami paliwowymi wykorzystuje akumulator do odzyskiwania energii hamowania, dostarczania dodatkowej mocy podczas krótkich przyspieszeń oraz do wygładzania mocy dostarczanej z ogniwa paliwowego z opcją pracy na biegu jałowym lub wyłączenia ogniwa paliwowego przy niskim zapotrzebowaniu na moc. Ilość energii przechowywanej na pokładzie zależy od wielkości zbiornika paliwa wodorowego. Jest to różnica w porównaniu z pojazdami w pełni elektrycznymi, w których ilość dostępnej mocy i energii jest ściśle związana z rozmiarem akumulatora.

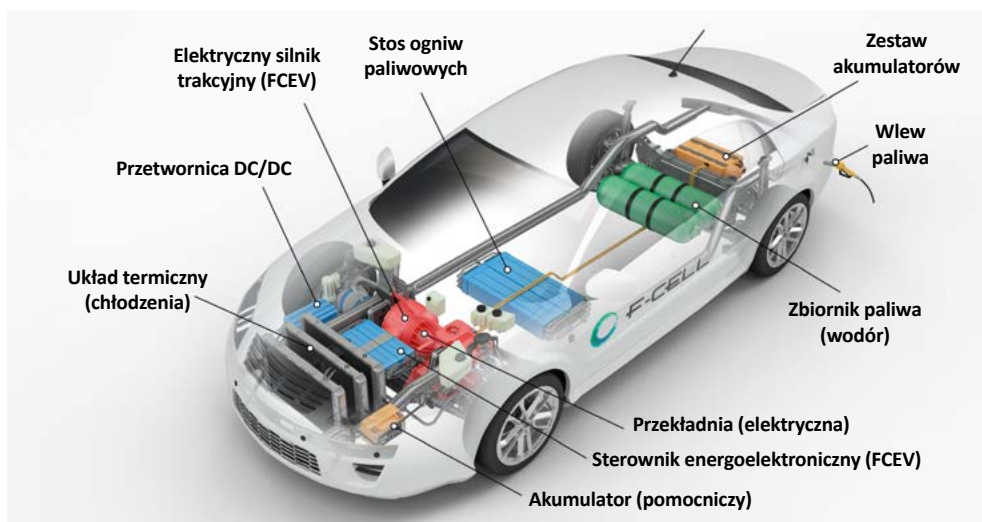
Energia wiązania wodoru i tlenu w cząsteczce wody H_2O jest mniejsza niż łączna energia wiązania cząsteczek wodoru H_2 i tlenu O_2 . Dlatego też podczas reakcji wiązania wodoru i tlenu w cząsteczki wody powstaje ciepło. Może być ono odprowadzane z układu właśnie w postaci ciepła (które jest przetwarzane na energię mechaniczną w silniku spalinowym) lub w postaci energii elektrochemicznej (w ogniwach paliwowych).

W samochodach, które stosują ogniwa paliwowe, wykorzystywane są zbiorniki do magazynowania sprężonego wodoru. Cylindrycznym kształtem przypominają te używane do paliw LPG. Konstrukcyjnie i technologicznie są jednak znacznie bardziej zaawansowane. Wewnętrzna warstwa wykonana jest z aluminium lub stali (ok. 20% całkowitej masy), natomiast z zewnątrz całość jest obłana tworzywem kompozytowym. Dzięki temu mają dużą odporność na uszkodzenia mechaniczne oraz stosunkowo niewielką masę. Zasada działania samochodu z ogniwem paliwowym jest stosunkowo prosta. Poniżej przedstawione zostały definicje wybranych elementów pojazdu napędzanego wodorowymi ogniwami paliwowymi oraz rozmieszczenie tych elementów na schemacie (ryc. 13).

Akumulator (pomocniczy) – w pojeździe z napędem elektrycznym niskonapięciowy akumulator pomocniczy zapewnia energię elektryczną do uruchomienia samochodu przed włączeniem akumulatora trakcyjnego; zasila również akcesoria pojazdu.

Zestaw akumulatorów – wysokonapięciowy akumulator przechowuje energię generowaną z hamowania odzyskowego i zapewnia dodatkowe zasilanie elektrycznego silnika trakcyjnego.

Przetwornica DC/DC – to urządzenie konwertuje prąd stały o wyższym napięciu z akumulatora trakcyjnego na prąd stały o niższym napięciu potrzebny do zasilania akcesoriów pojazdu i ładowania akumulatora pomocniczego.



Ryc. 13. Schemat pojazdu napędzanego wodorowymi ogniwami paliwowymi

Źródło: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work> [dostęp: 11.06.2024].

Elektryczny silnik trakcyjny – wykorzystując energię z ogniwa paliwowego i akumulatora trakcyjnego, silnik ten napędza koła pojazdu. Niektóre pojazdy wykorzystują generatory silników, które pełnią zarówno funkcję napędu, jak i regeneracji.

Stos ogniw paliwowych – zespół pojedynczych elektrod membranowych, które wykorzystują wodór i tlen do produkcji energii elektrycznej.

Wlew paliwa – dysza dystrybutora paliwa podłączana do zbiornika pojazdu w celu jego napełnienia.

Zbiornik paliwa (wodór) – przechowuje wodór w pojeździe, dopóki nie będzie potrzebny ogniwu paliwowemu.

Sterownik energoelektroniczny – jednostka ta zarządza przepływem energii elektrycznej dostarczanej przez ogniwo paliwowe i akumulator trakcyjny, kontrolując prędkość elektrycznego silnika trakcyjnego i wytwarzany przez niego moment obrotowy.

Układ termiczny (chłodzenia) – system ten utrzymuje właściwy zakres temperatur pracy ogniwa paliwowego, silnika elektrycznego, elektroniki mocy i innych podzespołów.

Przekładnia (elektryczna) – przekładnia przenosi moc mechaniczną z elektrycznego silnika trakcyjnego do napędu kół.

4. Oznakowanie pojazdów z napędami alternatywnymi i ich osprzętu zgodnie z ISO 17840-4

Dla podjęcia prawidłowych działań ratowniczych w przypadku zagrożenia niezmiernie ważną jest szybka i prawidłowa identyfikacja sposobu zasilania napędu pojazdu przez zespół ratowniczy. Równie istotne jest posiadanie aktualnych i przystępnie opisanych informacji o rodzaju zastosowanego napędu i związanych z nim niebezpieczeństwach. Dane te powinny znajdować się na samym pojeździe oraz w przypisanej do danego modelu karcie ratowniczej.

Z elementami karty ratowniczej można zapoznać się na stronie internetowej CTIF: <https://www.ctif.org/commissions-and-groups/iso-17840-first-worldwide-firefighter-s-standard>.



Na poniżej wymienionych stronach internetowych są zawarte informacje dotyczące stosowania normy ISO 17840-4:

1. CTIF ISO 17840 pakiet informacyjny. Pojazdy ratownicze

<https://drive.google.com/drive/folders/1FALiFpQYdDv0qcDAmOeYgvjpARvcP8Cv>



2. CTIF ISO 17840 pakiet informacyjny. Pojazdy ciężarowe:

https://drive.google.com/drive/folders/1U9UDbQ4A-k4FugImg6_leTCm2oGRxHf3



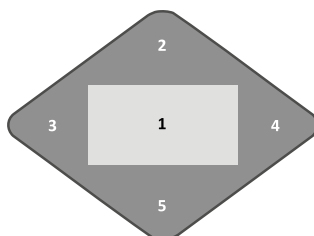
3. CTIF ISO 17840 pakiet informacyjny. Transport publiczny:

<https://drive.google.com/drive/folders/1EDtG2RVjK50F1o603OG-5fodJQZpN40t>



Układ i treść etykiety identyfikacyjnej na temat rodzaju energii napędowej pojazdu

Etykieta ma kształt rombu z określonymi strefami zgodnie z poniższą ryciną. Wszystkie informacje na etykiecie są przedstawione w formie piktogramu. Wygląd etykiety jest identyczny na całym świecie.










Ryc. 14. Schemat etykiety identyfikacyjnej (1 – strefa środkowa, 2 – strefa górna, 3 – strefa lewa, 4 – strefa prawa, 5 – strefa dolna)

Źródło: ISO 17840-4 Road vehicles – Information for first and second responders.

Tło etykiety jest w kolorze głównego źródła energii. W przypadku pojazdów z napędem hybrydowym lub na paliwo alternatywne, w odniesieniu do pierwszego źródła energii pokazanego w strefie środkowej stosuje się następującą kolejność:





- paliwo gazowe,
- energia elektryczna,
- paliwo płynne.

Tabela 4. Przykładowe wzory etykiet w zależności od rodzaju napędu

Opis	Etykieta
Pojazd na CNG	
Pojazd na LPG	
Pojazd na LNG	
Pojazd na DME*	
Podwójne paliwo – CNG i Diesel	
Pojazd elektryczny	
Pojazd elektryczny hybrydowy na paliwo z grupy płynów 2	

Ciąg dalszy tabeli na następnej stronie

Działania ratownicze podczas zdarzeń, w których występują instalacje
i urządzenia z wodorem

Pojazd na wodór Pojazd elektryczny na napęd na ogniwa paliwowe	
Pojazd na paliwo z grupy płynów 1	
Pojazd na paliwo z grupy płynów 2	
Hybrydowy pojazd z wysokociśnieniowym akumulatorem oleju hydraulicznego (zasilany sprężonym gazem) na paliwo z grupy płynów 1	

* DME – eter dimetylowy (dimetyloeter, DME), CH_3OCH_3 – organiczny związek chemiczny z grupy eterów, bezbarwny gaz o charakterystycznym zapachu, umiarkowanie rozpuszczalny w wodzie. Używany jest jako gaz pędny w rozpylaczach aerozolowych oraz w mieszaninie z izobutanem. Może również stanowić paliwo alternatywne dla LPG, LNG, benzyny i oleju napędowego. Może być produkowany z gazu ziemnego, węgla lub biomasy.

Źródło: opracowanie własne na podstawie normy ISO 17840-4 Road vehicles – Information for first and second responders – Part 4: Propulsion energy identification.

Wiele z wymagań dotyczących GHRS ma zastosowanie także do innych typów stacji tankowania, takich jak te przeznaczone dla motocykli, wózków widłowych, tramwajów czy stacji mobilnych. Stacje tankowania wodoru, które są kluczowym ogniwem w infrastrukturze związanej z paliwami alternatywnymi, muszą być odpowiednio zabezpieczone przed różnymi potencjalnymi zagrożeniami. Poniżej przedstawiono najważniejsze z nich, a także środki bezpieczeństwa, które należy wdrożyć w celu minimalizacji ryzyka.

Zagrożenia:

1. **Nagle zwiększenie ciśnienia w zbiornikach magazynowych** może prowadzić do katastrofalnych awarii strukturalnych lub nawet wybuchów, zagrażając bezpieczeństwu personelu i infrastruktury.
2. **Uszkodzenie sprężarki** może prowadzić do przerwania dostawy wodoru lub nawet wycieku tego gazu, co stanowi istotne zagrożenie pożarowe lub wybuchowe.
3. **Wycieki wodoru** – niebezpieczne ze względu na jego wysoką łatwopalność. Mogą tworzyć mieszanki wybuchowe z powietrzem, zwiększając ryzyko pożaru lub eksplozji.
4. **Przekroczenie maksymalnej temperatury pracy w układzie** może prowadzić do przegrzania sprężarki, zbiorników lub innych komponentów, co może skutkować awarią lub wybuchem.

Zabezpieczenia:

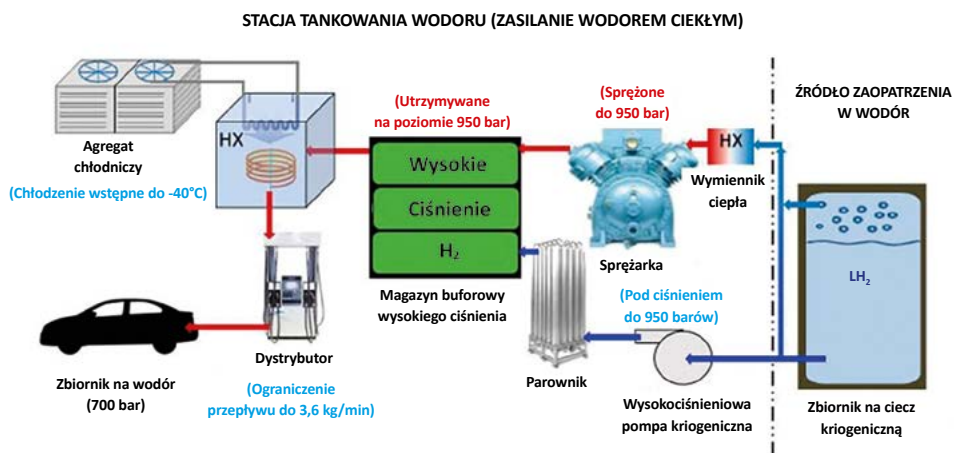
1. **Systemy zabezpieczające przed nadciśnieniem** – wykorzystanie zaworów bezpieczeństwa lub innych systemów, które automatycznie zwalniają nadmiar ciśnienia w zbiornikach buforowych lub w układzie sprężania, aby zapobiec nagłemu wzrostom ciśnienia.
2. **Systemy wykrywania wycieków** – instalacja czujników wodoru w celu szybkiego wykrywania wycieków i uruchamiania alarmów oraz procedur bezpieczeństwa w przypadku wycieku.
3. **Wyposażenie w systemy monitorowania i kontroli temperatury** w celu zapobiegania przekroczeniu maksymalnych dopuszczalnych temperatur w układzie.
4. **Izolacja i segregacja** różnych części instalacji w celu minimalizacji ryzyka rozprzestrzeniania się zagrożeń w przypadku awarii.
5. **Regularne przeglądy sprzętu i konserwacja** zapewniają odpowiednie działanie systemów bezpieczeństwa i minimalizują ryzyko awarii.
6. **Szkolenie personelu** w zakresie bezpiecznej obsługi i eksploatacji instalacji, w tym postępowania w przypadku awarii lub wycieku.
7. **Wykorzystanie materiałów i konstrukcji, które są odpowiednie do pracy w ekstremalnych warunkach ciśnienia i temperatury**, może zwiększyć bezpieczeństwo instalacji.
8. **Zapewnienie zgodności instalacji z obowiązującymi przepisami i normami**

dotyczącymi bezpieczeństwa wodoru oraz stosowanie najlepszych praktyk branżowych w celu minimalizacji ryzyka.

Zastosowanie tych środków pozwoli na utrzymanie wysokiego poziomu bezpieczeństwa w stacjach tankowania wodoru, co jest niezbędne dla rozwoju tej ekologicznej formy energii.

5.2. Technologia i wyposażenie LHRS

Obok stacji tankowania wodoru gazowego istnieją także stacje tankowania ciekłego wodoru (LHRS). Tego rodzaju stacje wymagają specjalnego wyposażenia do magazynowania, chłodzenia i dystrybucji ciekłego wodoru. Ważne jest, aby zarówno GHRS, jak i LHRS były projektowane i eksploatowane zgodnie z odpowiednimi normami i przepisami, aby zapewnić bezpieczeństwo i skuteczność działania tych stacji. W trakcie przechowywania i dystrybucji ciekłego wodoru istnieje szereg potencjalnych zagrożeń, które mogą prowadzić do poważnych incydentów lub awarii systemu.



Ryc. 16. Ilustracja przykładowej stacji tankowania wodoru ciekłego (LHRS)

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Model analizy stacji tankowania wodoru (HRSAM), Argonne National Laboratory, <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hdsam> [dostęp: 10.03.2024].

Wśród głównych zagrożeń należy wymienić:

1. **Nagły wzrost ciśnienia w zbiornikach** – ze względu na ekstremalne warunki przechowywania ciekłego wodoru, takie jak bardzo niska temperatura i wysokie

ciśnienie, istnieje ryzyko nagłego wzrostu ciśnienia w zbiornikach. Taka sytuacja może prowadzić do katastrofalnych awarii strukturalnych lub nawet wybuchów.

2. **Awaria kriopompy** – kriopompa jest kluczowym elementem w procesie transferu ciekłego wodoru. Jej awaria może prowadzić do przerwania dostawy wodoru lub nawet jego wycieku, co stanowi istotne zagrożenie dla bezpieczeństwa.
3. **Wycieki ciekłego wodoru** – są niezwykle niebezpieczne ze względu na wysoką łatwopalność tego gazu. Mogą prowadzić do powstania mieszanki wybuchowej z powietrzem, co zwiększa ryzyko poważnych incydentów.
4. **Nieprawidłowa izolacja zbiorników lub przewodów** – może prowadzić do wzrostu temperatury ciekłego wodoru, co z kolei zwiększa ryzyko eksplozji lub innych sytuacji awaryjnych.

Aby zapewnić bezpieczne przechowywanie i dystrybucję ciekłego wodoru, konieczne jest zastosowanie odpowiednich zabezpieczeń i procedur.

Poniżej scharakteryzowano najważniejsze środki bezpieczeństwa.

1. **Zastosowanie izolacji wielowarstwowej** pozwala utrzymać niską temperaturę ciekłego wodoru, minimalizując ryzyko wzrostu ciśnienia i temperatury.
2. **Wyposażenie zbiorników w zintegrowane zabezpieczenia przed uderzeniem** zapewnia ochronę przed mechanicznymi uszkodzeniami, które mogą prowadzić do wycieków lub awarii strukturalnych.
3. **Wykorzystanie zaawansowanych systemów detekcji wycieków i gazów** pozwala szybko reagować na potencjalne zagrożenia, umożliwiając szybką identyfikację i eliminację problemów.
4. **Regularne przeglądy i konserwacja** – kluczowe dla zapewnienia ich prawidłowego działania i minimalizacji ryzyka awarii.
5. **Zabezpieczenia awaryjne** – obecność przycisków awaryjnego wyłączenia oraz systemów automatycznego wyłączenia w przypadku wykrycia awarii lub niebezpieczeństwa zapewnia szybką reakcję na potencjalne zagrożenia.
6. **Zgodność z normami bezpieczeństwa** – zachowanie zgodności wszystkich komponentów i procedur z obowiązującymi normami bezpieczeństwa w zakresie przechowywania i dystrybucji ciekłego wodoru jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa systemu.

6. Zagrożenia związane ze stosowaniem wodoru

6.1. Pojazdy z napędem wodorowym – zagrożenia

Pojazdy elektryczne z wodorowymi ogniwami paliwowymi posiadają zbiorniki wodoru o ciśnieniu 700 barów w przypadku samochodów osobowych lub o ciśnieniu 350 barów w przypadku samochodów ciężarowych i autobusów. Zbiorniki pojazdów FC mają pojemność około 80 l (2 zbiorniki) lub 140 l, co pozwala na przechowywanie od 5 do 7 kg H₂.

W przypadku pojazdu elektrycznego z ogniwami paliwowymi głównymi zagrożeniami mogą być:

- uwolnienie wodoru z TPRD lub innego sprzętu (np. pęknięcie rurociągu, utrata szczelności połączeń), w wyniku czego może dojść do wypływu wodoru bez zapłonu lub z zapłonem,
- uwolnienie wodoru z natychmiastowym zapłonem wywołujące pożar strumieniowy,
- uwolnienie wodoru powodujące powstanie łatwopalnej chmury i potencjalną eksplozję chmury oparów lub
- mechaniczne rozerwanie zbiornika wywołujące falę uderzeniową.

Jeśli chodzi o wzrost ciśnienia, zjawisko to obserwuje się w przypadku gazów, które są znacznie lżejsze od powietrza, co może skutkować nadciśnieniem przekraczającym granicę wytrzymałości obudowy lub konstrukcji budynku. Do takiej sytuacji może dojść, gdy wodór uwalniany jest z wystarczająco dużą szybkością.

Obudowa może zostać poważnie uszkodzona, a nawet ulec całkowitemu zniszczeniu. Ta sytuacja nie została jednak opisana w niniejszej publikacji, ponieważ jest zjawiskiem natychmiastowym, a zatem nie jest to główne zdarzenie, którego obawiają się ratownicy. W rzeczywistości ma ono zwykle miejsce przed podjęciem interwencji ratowniczej.

6.1.1. Potencjalne konsekwencje uwolnienia wodoru bez zapłonu

Tabela poniżej podaje czas trwania wypływu wodoru w przypadku jego uwolnienia bez zapłonu. Dane przedstawiono dla kilku objętości zbiornika i różnych średnic uwolnienia.

Tabela 5. Czas trwania przedmuchiwania zbiornika dla różnych objętości i średnic otworu

Pojemność zbiornika	Ciśnienie przechowywania	Czas trwania przedmuchiwania przez otwory			
		0,1 mm	1 mm	2 mm	4 mm
80 l	350 b	25 h	13 min 20 s	3 min 40 s	52 s
150 l	350 b	47 h	28 min 10 s	7 min	1 min 40 s
80 l	700 b	29 h	17 min 10 s	4 min 10 s	56 s
150 l	700 b	54 h	32 min 20 s	8 min	1 min 50 s

Źródło: opracowanie własne na podstawie: *Deliverable European Emergency Response Guide*.

Za wypływ z otworu o średnicy 0,1 i 1 mm może odpowiadać przypadkowy wyciek spowodowany brakiem szczelności połączeń i podłączonego sprzętu. Z kolei otwory o średnicy 2 i 4 mm są bardziej typowe dla uwolnienia przez TPRD. Wartości te mogą być pomocne przy ocenie czasu wymaganego do całkowitego opróżnienia zbiornika i oceny ryzyka jego rozerwania w przypadku pożaru oraz minimalnego czasu potrzebnego do ochrony zbiornika, aby do wspomnianego rozerwania nie dopuścić.

W przypadku uwolnienia z natychmiastowym zapłonem dochodzi do pożaru strumieniowego, który wiąże się z niebezpiecznymi skutkami oddziaływania termicznego.

Uwolnienie wodoru z opóźnionym zapłonem

W przypadku uwolnienia wodoru z opóźnionym zapłonem powstaje łatwopalna chmura, której zapłon wywołuje niebezpieczną falę uderzeniową wynikającą z różnicy ciśnień pomiędzy wnętrzem zbiornika a otoczeniem. Różnica ciśnień zmniejsza się wraz z odległością od punktu zapłonu.

Mechaniczne pęknięcie zbiornika magazynowego

W celu oszacowania bezpiecznej odległości w przypadku mechanicznego pęknięcia zbiornika magazynowego autorzy projektu HyResponder przeprowadzili pożar testowy na samodzielnym zbiorniku kompozytowym (typ IV) przy maksymalnym ciśnieniu roboczym. Wynik badania przedstawiono w opracowaniu pt. *European Emergency Response Guide*¹⁹.

¹⁹ https://ctif.org/sites/default/files/2023-05/Final-English-EERG-December-2022_VFfinal.pdf

Wykazano ponadto, że ciśnienie rozrywające jest 1,9 razy większe od maksymalnego ciśnienia roboczego.

6.1.2. Autobusy, pociągi i ciężarówki z ogniwami paliwowymi zasilanymi wodorem

Użytkowane obecnie autobusy i pociągi napędzane ogniwami paliwowymi posiadają jedynie gazowe zbiorniki wodoru.

Niebezpieczne zjawiska

Główne zagrożenia związane FCEV dotyczą opisanego już wyżej uwolnienia wodoru.

W pojazdach wodorowych, takich jak autobusy i pociągi, urządzenie TPRD znajduje się na dachu i tam można zaobserwować ewentualne uwolnienie wodoru w przypadku nadmiernego wzrostu ciśnienia.

Na dachach autobusów i pociągów ulokowane są również zbiorniki magazynowe wodoru. Natomiast w samochodach ciężarowych usytuowane są one na dole. W ich przypadku ciśnienie przechowywania wynosi 350 barów, a zbiorniki mają większą objętość w porównaniu do pojazdów osobowych, w których stosuje się zbiorniki o ciśnieniu 700 bar.

Pojemność zbiorników wynosi około 170 l (autobusy, ciężarówki) lub 240 l (pociągi). Liczba zbiorników pokładowych zależy od docelowego zasięgu pojazdu. Z tego powodu na jeden autobus lub wagon kolejowy może przypadać od 5 do 10 butli.

Ilość H_2 wynosi od 30 do 45 kg w przypadku autobusów oraz do 180 kg w przypadku pociągów.

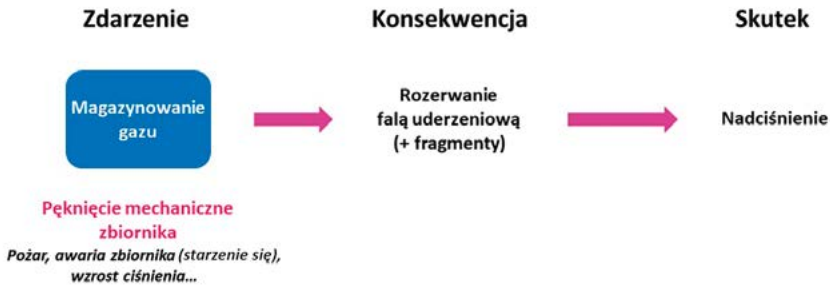
Jak wspomniano wcześniej, obecne na rynku samochody ciężarowe z ogniwami paliwowymi mają na wyposażeniu 350-barowe gazowe zbiorniki wodoru. Aby zwiększyć ich niezależność, prowadzone są prace nad zintegrowaniem 700-barowych gazowych zbiorników wodoru na pokładzie. Aktualnie ich zasięg wynosi około 500–600 km. Docelowa autonomia takiej ciężarówki to 1000 kilometrów.

Ciekły wodór zapewnia więcej energii na pokładzie w tej samej przestrzeni w porównaniu do sprężonego wodoru lub akumulatorów.

Rozwiązania techniczne z zastosowaniem ciekłego wodoru na statkach i w samolotach są w trakcie badań i prób, dlatego autorzy nie podejmują się szerszego rozwinięcia tego zagadnienia w tej publikacji.

6.1.4. Przyczepy i stacje paliw LH₂

Poniższe schematy przedstawiają główne wydarzenia związane z przyczepami do transportu gazu na stacjach tankowania.



Ryc. 17. Zagrożenia zdarzeniami związanymi z magazynowaniem wodoru

Źródło: L. Lecomte, F. Verriest, S. Wilfried, HyResponder, *European Emergency Response Guide*, 2022.



Ryc. 18. Zagrożenia zdarzeniami z natychmiastowym zapłonem wodoru, wywołanymi nieszczelnościami na połączeniach lub podłączeniem nieszczelnych urządzeń

Źródło: L. Lecomte, F. Verriest, S. Wilfried, HyResponder, *European Emergency Response Guide*, 2022.



Ryc. 19. Zagrożenia związane z opóźnionym zapłonem wodoru wywołanie utratą szczelności na połączeniach lub nieszczelnościami innych elementów

Źródło: L. Lecomte, F. Verriest, S. Wilfried, HyResponder, *European Emergency Response Guide*, 2022.

6.2. Rodzaje pożarów i płomieni wodorowych

Wodór może spalać się w różnych trybach spalania, np. jako pożar powierzchniowy, pożar strumieniowy, deflagracja, detonacja itp. Pożary wodoru mogą obejmować zarówno mikropłomienie o masowym natężeniu przepływu rzędu 10^{-9} kg/s, jak i płomienie o wysokim masowym natężeniu przepływu (setki kg/s).

W scenariuszach, w których możliwa jest awaria zbiornika magazynowego z natychmiastowym uwolnieniem wodoru do otaczającej atmosfery, mogą powstawać pożary kuliste o dużych rozmiarach (dziesiątki metrów). Obecność przeszkód, powierzchni i obudów znacząco wpływa na płomień strumienia²⁰.

6.2.1. Pożar powierzchniowy

Pożar powierzchniowy wodoru to gwałtowny i szybki pożar, który rozprzestrzenia się w bardzo krótkim czasie, obejmując dużą powierzchnię w wyniku zapłonu łatwopalnej mieszanki wodoru w powietrzu. Jest to typ pożaru, który charakteryzuje się intensywnym wzrostem temperatury oraz szybkim rozprzestrzenianiem się ognia, ale bez wybuchu.

Cechy charakterystyczne pożaru powierzchniowego:

1. Szybki rozwój: pożar może rozprzestrznić się w ciągu kilku sekund do kilku minut, zależnie od warunków, w tym stężenia substancji łatwopalnych, ciśnienia i wentylacji.
2. Brak wybuchu: choć pożar powierzchniowy wodoru może być bardzo gwałtowny,

²⁰ Lecture 9: Hazard distances from hydrogen flames and firefighting, HyRESPONDER, s. 9, <https://hyresponder.eu/e-platform/training-materials/educational-training/lecture-9-hazard-distances-from-hydrogen-flames-and-firefighting/> [dostęp: 01.10.2024].

nie jest to wybuch. Zamiast tego dochodzi do rozprzestrzeniania się płomieni w przestrzeni, gdzie obecna jest mieszanina wodoru w odpowiednich proporcjach z powietrzem.

3. Wysoka temperatura: w wyniku zapłonu mieszaniny temperatura wokół ognia może wzrosnąć bardzo szybko, co sprawia, że strefa objęta pożarem osiąga skrajnie wysokie temperatury, które mogą uszkodzić otoczenie i zagrażać życiu.
4. Skrócony czas reakcji: pożar mieszaniny rozprzestrzenia się bardzo szybko, czas reakcji i czas na ewakuację w przypadku zagrożenia są ograniczone. Dlatego też w razie wystąpienia pożaru ludziom może być bardzo trudno uciec, zwłaszcza jeśli nie mają dostępu do odpowiednich dróg ewakuacyjnych.

Wodór jako gaz o bardzo szerokim zakresie wybuchowości jest szczególnie podatny na spalanie wybuchowe. W wyniku wycieku wodoru do powietrza, w zależności od stężenia, może dojść do powstania łatwopalnej mieszanki, która przy zapłonie wywoła szybko rozprzestrzeniający się pożar.

Wodór ma niską temperaturę zapalenia (około 560°C) i szerokie granice wybuchowości (od 4% do 75% wodoru w powietrzu), co oznacza, że łatwo może utworzyć mieszaninę wybuchową. Ponadto płomień wodoru jest praktycznie niewidoczny w świetle dziennym, co dodatkowo zwiększa ryzyko niebezpieczeństwa w przypadku wycieku i zapłonu.

Płomień wodorowy emituje minimalne promieniowanie podczerwone i praktycznie nie emituje promieniowania widzialnego. Ze względu na brak pasm promieniowania CO₂ i silną absorpcję przez otaczającą parę wodną, stosunek widzialnych płomieni wodorowych do podczerwonych wynosi 0,88, a stosunek długości płomienia ultrafioletowego do podczerwonego 0,78. Niemniej jednak oddziaływanie konwekcyjnych i radiacyjnych strumieni ciepła pozostaje ważne i musi być brane pod uwagę w celu ochrony życia, mienia i środowiska.

6.2.2. Porównanie pożarów strumieniowych wodoru i zwykłych paliw

Pożar strumieniowy to rodzaj pożaru, który występuje, gdy dochodzi do zapłonu palącego się gazu lub wyciekającej pod wysokim ciśnieniem cieczy w wyniku kontaktu z iskrą, płomieniem lub wysoką temperaturą. W efekcie tworzy się silny, skoncentrowany strumień ognia, który porusza się w jednym kierunku, zwykle w kierunku wypływu substancji palnej.

Pożar strumieniowy zwykle powstaje w wyniku wycieków materiału palnego (gazu lub cieczy) z instalacji przemysłowych lub transportowych, w postaci np.:

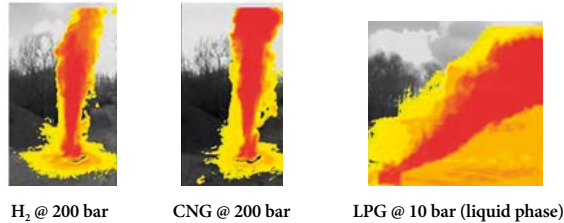
1. Wycieków gazów palnych: gazy takie jak metan, propan, butan, etylen, wodór (czyli tzw. paliwa gazowe) mogą łatwo tworzyć pożar strumieniowy w wyniku uszkodzenia rurociągów lub zbiorników ciśnieniowych.

2. Wycieków paliw ciekłych: na przykład ropa naftowa, benzyna, alkohol lub inne łatwopalne ciecze, które w wyniku wypływu i zapłonu tworzą strumień ognia.
3. Gwałtownego wypływu gazu lub cieczy palnej z zaworów, rur, połączeń: w miejscach, gdzie instalacje rurociągowo lub zbiorniki są pod dużym ciśnieniem, a elementy te są uszkodzone (np. pęknięcia, awarie zaworów).

Cechy pożaru strumieniowego:

1. Skoncentrowany i silny płomień: ogień strumieniowy tworzy skupiony strumień płomieni, który może osiągać bardzo wysoką temperaturę (od 1000°C do 1500°C, a w niektórych przypadkach nawet wyżej). Płomień ten jest bardzo intensywny, ale wąski, co sprawia, że jego energia cieplna jest skoncentrowana w jednym kierunku.
2. Wysokie ciśnienie: ogień strumieniowy najczęściej powstaje, gdy gaz lub ciecz wydostaje się pod wysokim ciśnieniem z uszkodzonej instalacji (np. rury, zaworu, zbiornika) i zapala się od źródła zapłonu. Wysokie ciśnienie i duża prędkość wypływu paliwa powodują, że ogień ma postać strumienia płomieni, który może sięgać setek metrów.
3. Długość i zasięg płomienia: zasięg ognia strumieniowego palącego się wodoru zależy od wielu czynników, w tym od ciśnienia wypływu, wielkości otworu wycieku, a także warunków atmosferycznych. Płomień strumieniowy może rozciągać się na kilka, kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt metrów. Może również prowadzić do poważnych uszkodzeń w obrębie swojej drogi, niszcząc instalacje, urządzenia oraz narażając ludzi na poważne poparzenia.
4. Płomień o charakterze „pionowym” lub „poziomym”: w zależności od ukształtowania terenu i kąta wypływu gazu, pożar strumieniowy może występować w postaci płomienia skierowanego w górę (np. w przypadku wycieku gazu na powierzchni gruntu) lub rozciągać się poziomo, na przykład w przypadku wycieku gazu w zamkniętym pomieszczeniu lub wzdłuż rurociągów.
5. Trwałość: pożar strumieniowy może trwać od kilku minut do nawet godzin, w zależności od wielkości wycieku i zapasu materiału palnego. W przypadku wycieków gazów (np. metanu, propanu, wodoru) ogień może trwać do momentu, gdy wyciek gazu zostanie opanowany lub dopóki nie wyczerpie się materiał palny.
6. Intensywność ciepła: pożar strumieniowy generuje bardzo wysoką temperaturę, dlatego jest w stanie spalić lub stopić niektóre materiały w swojej okolicy (np. metal, drewno, tworzywa sztuczne), a także uszkodzić instalacje i konstrukcje.
7. Nieprzewidywalność: ogień strumieniowy może zmieniać swój kierunek w zależności od zmiany ciśnienia, intensywności wypływu gazu lub wpływu wiatru. Na przykład silny wiatr może powodować, że płomień zmieni kierunek, co może wpłynąć na dalsze zagrożenie w innych częściach obiektu.

8. Powstawanie strefy niebezpiecznej: wokół ognia strumieniowego tworzy się tzw. strefa niebezpieczna, gdzie panują ekstremalne temperatury, a ludziom grożą poparzenia. W tej strefie materiał może zostać poddany intensywnemu działaniu wysokiej temperatury, co może prowadzić do zapłonu innych substancji palnych lub zniszczenia elementów infrastruktury.

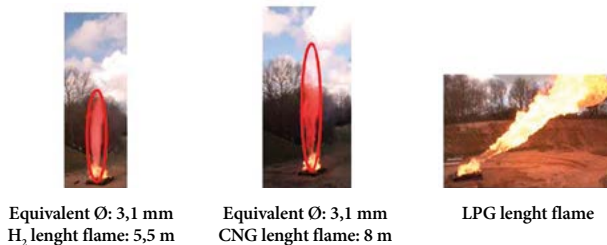


Ryc. 20. Obraz w podczerwieni pokazujący promieniowanie ciepłe wytwarzane podczas spalania: wodoru (200 bar), CNG (200 bar) i LPG (10 bar)

Źródło: *Europäisches Train the Trainer-Programm für Responder, Lektion 9 Gefahrenabstände durch Wasserstoffflammen und Brandbekämpfung.*

Z powyższej ryciny wynika, że w rezultacie niepełnego spalania CNG i LPG powstaje CO₂, CO, sadza i inne produkty, które mają większy wpływ na promieniowanie w porównaniu z wodorem.

Zjawisko to stanowi wytłumaczenie, dlaczego spalanie wodoru wiąże się z mniejszymi efektami termicznymi niż spalanie innych popularnych paliw, nawet jeśli temperatura płomienia wodoru przekracza temperaturę płomienia CNG. Rycina 20 przedstawia porównanie promieniowania ciepłego wytwarzanego przez H₂ (200 bar), CNG (200 bar) i LPG (10 bar) – sygnatura cieplna pożaru strumieniowego wodoru jest nieco mniejsza niż CNG, a obie są znacznie mniejsze niż promieniowanie ciepłe z pożaru LPG.



Ryc. 21. Porównanie długości płomienia dla pożarów strumieniowych wodoru (średnica kryzy 3,1 mm), CNG (średnica kryzy 3,1 mm) i LPG

Źródło: *Europäisches Train the Trainer-Programm für Responder, Lektion 9 Gefahrenabstände durch Wasserstoffflammen und Brandbekämpfung.*

7. Zagrożenia oraz postępowanie w przypadku eksplozji wodoru

Pojazdy napędzane wodorem są coraz powszechniejsze i będzie ich coraz więcej. Jednym z zagrożeń związanych z użytkowaniem tych samochodów, które należy szacować, analizować, ale także przeciwdziałać mu, jest eksplozja wodoru. Mogą one generować wysokie poziomy nadciśnienia, a tym samym stanowić istotne zagrożenie dla życia i mienia. Bezpieczeństwo wodorowych zastosowań motoryzacyjnych i związanej z nimi infrastruktury, w tym garaży, warsztatów konserwacyjnych, parkingów i tuneli, nadal jest jednym z obszarów budzących pewne obawy.

Dotychczas omówione zostały specyficzne właściwości i zagrożenia związane z różnymi rodzajami zastosowań FCH. Poniżej przedstawiono wybrane informacje dotyczące eksplozji spowodowanych reakcją chemiczną (tj. spalaniem) i „eksplozją fizyczną”²¹ (tj. bez udziału spalania).

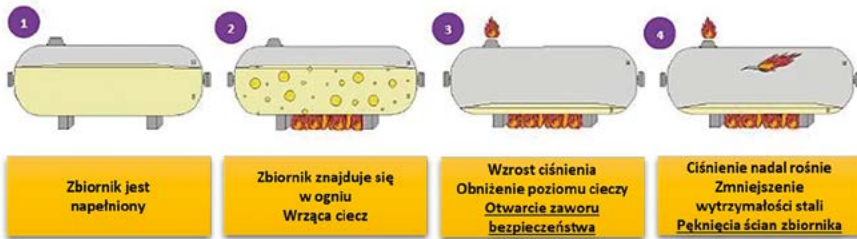
Istnieją dwa rodzaje „spalania wybuchowego”, tj. deflagracja oraz detonacja. Występują też inne rodzaje „eksplozji”, np. „eksplozje fizyczne” zbiorników spowodowane nadciśnieniem przekraczającym ustalony limit z powodu przepełnienia, w wyniku niekontrolowanej reakcji, itp.

7.1. Zdarzenia i zjawiska niebezpieczne

BLEVE (ang. *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*) to akronim opisujący zjawisko wybuchu par cieczy wrzącej. Jest to gwałtowna eksplozja, która ma miejsce, gdy naczynie zawierające ciecz pod ciśnieniem ulega uszkodzeniu, powodując nagły spadek ciśnienia i gwałtowne wrzenie cieczy. W wyniku tego dochodzi do szybkiego wydzielenia dużej ilości pary, co prowadzi do wybuchu. BLEVE może być bardzo niebezpieczne i jest istotnym zagrożeniem w wielu gałęziach przemysłu.

²¹ To proces fizyczny, który zachodzi, gdy odpowiednie masy dwóch cieczy, gorącej i zimnej, mieszają się.

BLEVE → Nadciśnienie i strumienie radiacyjne Wybuch rozszerzających się par wrzącej cieczy

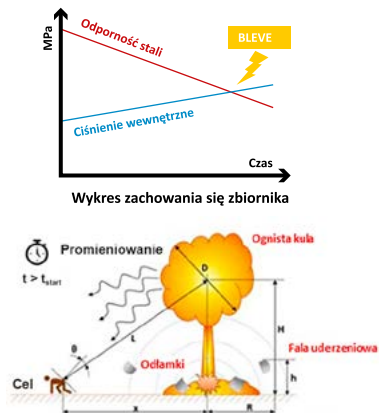


Ryc. 22. Schemat efektu BLEVE

Źródło: Bank Obrazów Air Liquide, <https://hyresponder.eu>.

Przykłady substancji podatnych na BLEVE:

- węglowodory: takie jak propan, butan i inne skroplone gazy naftowe.
- inne gazy w postaci cieczy pod ciśnieniem: takie jak amoniak, chlor oraz różne chemikalia przemysłowe.



Ryc. 23. Przedstawienie efektu BLEVE

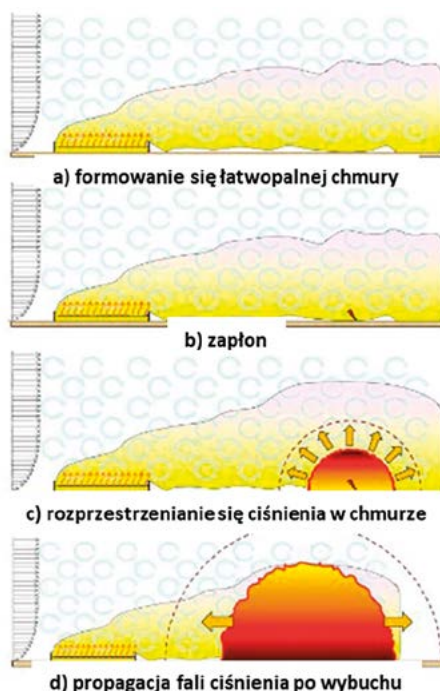
Źródło: Bank Obrazów Air Liquide, <https://hyresponder.eu>.

Deflagracja

Deflagracja, inaczej spalanie poddźwiękowe, to rodzaj reakcji chemicznej polegającej na spalaniu, które generuje falę uderzeniową poruszającą się z prędkością mniejszą niż prędkość dźwięku w danym środowisku. W przeciwieństwie do detonacji, która jest reakcją nadprzewodzącą i rozprzestrzenia się w formie fali uderzeniowej z prędkością

przekraczającą prędkość dźwięku, deflagacja to bardziej kontrolowany i wolniejszy proces spalania²².

Podczas deflagacji ciepło i światło są wydzielane, ale reakcja przebiega stosunkowo powoli i z mniejszą siłą eksplozji niż detonacja. Przykładem deflagacji jest zwykle spalanie drewna w kominku czy palenie się świeczki. Przebieg deflagacji można obserwować w wielu codziennych sytuacjach, kiedy materiał palny reaguje z tlenem z powietrza, powodując spalanie materiału, ale bez gwałtownej eksplozji.



Ryc. 24. Przedstawienie masowego rozlewu

Źródło: Bank Obrazów Air Liquide, <https://hyresponder.eu>

7.2. Wpływ fal uderzeniowych na ludzi i budynki

Fale uderzeniowe stwarzają określone zagrożenia. Ich skutki można podzielić na:

- pierwotne (podstawowe):
 - uszkodzenie słuchu,

²² Wikipedia. Wolna encyklopedia, <https://pl.wikipedia.org/wiki/Deflagacja> [dostęp: 10.03.2024].

- uszkodzenie płuc i innych narządów wewnętrznych.
- wtórne (uboczne):
 - urazy spowodowane przez latające odłamki (np. szkła),
 - upadek konstrukcji na ludzi, skutkujący poważnymi obrażeniami lub śmiercią.
- trzeciorzędne:
 - przemieszczenie całego ciała danej osoby.

Fala nadciśnienia powoduje nie tylko obrażenia ciała, ale także uszkodzenia budynków, generując przy tym promieniowanie cieplne i szkodliwe produkty spalania.

Tabela 6. Wartości progowe nadciśnienia stwarzające zagrożenie dla ludzi (na zewnątrz obiektów)

Efekt	Nadciśnienie [kPa]
Tymczasowe przesunięcie progu słyszenia	1,35
1% prawdopodobieństwa pęknięcia błony bębenkowej (próg „urazu”)	16,5
1% prawdopodobieństwa krwotoku do płuc ze skutkiem śmiertelnym (próg „śmiertelności”)	100

Źródło: L10_HyResponder_Level4_DE [dostęp: 10.03.2024].

Tabela 7. Wartości progowe nadciśnienia powodujące uszkodzenia budynków

Poziom uszkodzenia	Nadciśnienie [kPa]
Niewielkie uszkodzenie domu	4,8
Częściowa rozbiórka domu – nadal nadaje się do zamieszkania	6,9
Niemal całkowite zniszczenie domu	34,5–48,3

Źródło: L10_HyResponder_Level4_DE [dostęp: 10.03.2024].

7.3. Przestrzenie zamknięte – zagrożenia

Ze względu na rosnące rozpowszechnienie technologii wodorowych, systemy FCH są stosowane nie tylko na zewnątrz, ale także w pomieszczeniach. Wiąże się to z wyższym prawdopodobieństwem akumulacji wodoru. Do systemów stosowanych w pomieszcze-

niach należą: wózki widłowe FC w magazynach; pojazdy FC na parkingach, w tunelach i garażach; elektrolizery i ogniwa paliwowe do użytku domowego itp. W przypadku incydentu związanego ze sprzętem FCH wewnątrz budynków, należy wziąć pod uwagę następujące scenariusze: mieszkańcy mogą nie być w stanie opuścić budynku/obiektu; ratownicy mogą nie móc wykonywać swoich zadań bez narażania własnego życia; częściowe lub całkowite zniszczenie zagrozi życiu zarówno ratowników, jak i osób znajdujących się w strefie zagrożenia.

Bezpieczne korzystanie z wodoru i ogniw paliwowych w pomieszczeniach ma ogromne znaczenie dla służb ratowniczych. Gwałtowne uwolnienie wodoru w zamkniętej przestrzeni może prowadzić do wzrostu lub akumulacji ciśnienia, a tym samym do poważnych konsekwencji.

Istnieje wiele scenariuszy, w których FCH są umieszczone w obudowach. Całkowita objętość obudów może się różnić, począwszy od małego garażu, przez obudowę w kształcie pudełka dla stacjonarnego ogniwa paliwowego (FC), po duży magazyn. Szybkość uwalniania wodoru także może być różna, od niskiego przepływu masowego z linii zasilającej do FC do uwolnienia na dużą skalę z magazynu wysokociśnieniowego, np. uwolnienie z TPRD pojazdu FC zaparkowanego w garażu budynku mieszkalnego. W przypadku incydentów lub wypadków w systemach FCH znajdujących się w pomieszczeniach, służby ratownicze mają następujące priorytety: ratowanie życia, ochrona mienia i środowiska.

Zagrożenia związane z incydem/wypadkiem wewnątrz obiektów z FCH obejmują:

- brak tlenu i późniejsze uduszenie,
- wpływ wysokiej temperatury i strumienia ciepła pożarów strumieniowych,
- oparzenia zimnem spowodowane rozlanym ciekłym wodorem,
- skutki nadciśnienia,
- ryzyko zgonu i utraty zdrowia,
- efekty „domina”,
- szkody dla środowiska.

W przypadku uwolnienia wodoru zarówno na dużą, jak i małą skalę, może wystąpić szereg zjawisk:

1. Uwolnienie niezapalonego wodoru. W przypadku takiego uwolnienia w pomieszczeniu należy przestrzegać następujących zasad:

- ocenić wielkość powłoki palnej,
- określić poziom potencjalnego nadciśnienia (bez zapłonu),
- ocenić zależności między szybkością wentylacji a wyciekami.

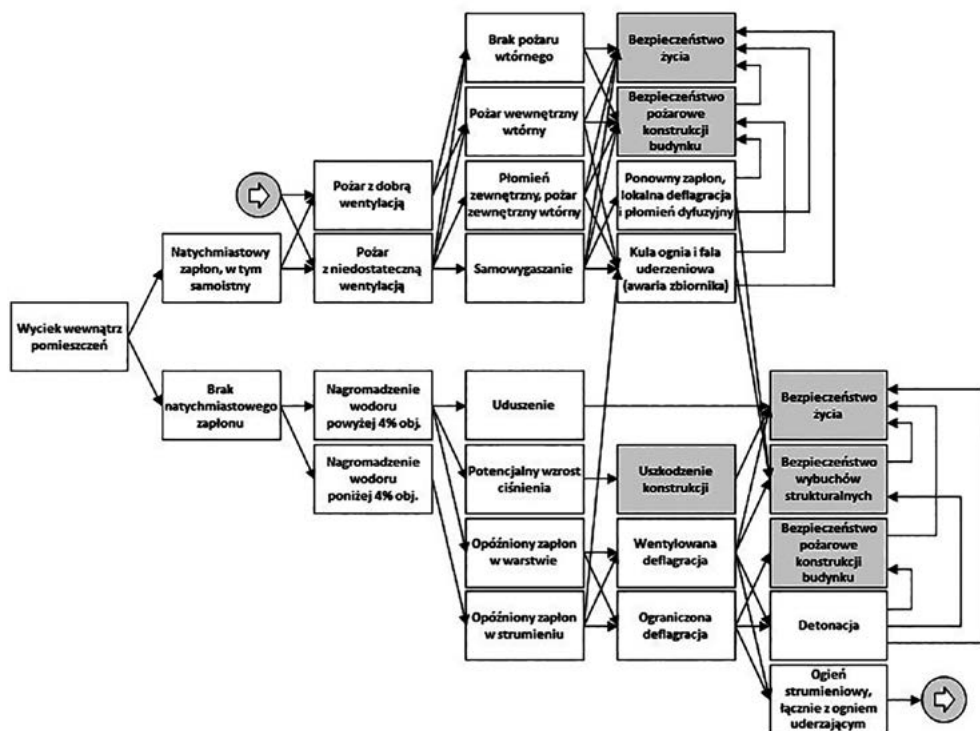
- 2. Uwolnienie z zapłonem.** Jeśli uwalniający się wodór ulegnie zapaleniu z natychmiastowym utworzeniem ognia, należy wziąć pod uwagę szereg aspektów, takich jak przenoszenie ciepła do otoczenia; trwałość pożaru (tj. czy jest wystarczająca ilość tlenu, aby go podtrzymać, czy też zgaśnie); związek między wentylacją a zachowaniem ognia; możliwość ponownego zapłonu.
- 3. Wybuch.** W tym miejscu należy zadać następujące pytania: Jeśli wodór uwolni się, nagromadzi, a następnie zapali, prowadząc do deflagracji lub detonacji, jakie będą tego konsekwencje? Jaki jest związek między odpowietrzaniem a nadciśnieniem deflagracji?

Wodór ma tendencję do ulatniania się, co może stanowić problem w pomieszczeniach. Nagromadzenie wodoru w obudowie może prowadzić do powstania łatwopalnej mieszaniny z powietrzem (lub tlenem). Ponadto istnieją inne problemy związane z niepożądanymi uwolnieniami, takie jak zjawisko ciśnienia szczytowego i skutki wyczerpania się tlenu. Odpowiednia wentylacja może złagodzić te skutki. Gdy dojdzie do zapłonu wyciekającego wodoru, płomień będzie rozprzestrzeniał się i rozwijał w obudowie.

Oprócz płomienia i związanych z nim zagrożeń, takich jak temperatura i przepływ ciepła, powstają gorące gazowe produkty spalania, które również mogą stanowić zagrożenie. Gdy te produkty gazowe unoszą się, pod sufitem obudowy może utworzyć się warstwa gorącego gazu. Przebieg pożaru zależy od rodzaju spalania, interakcji z otoczeniem i dostępu do tlenu. W zależności od wielkości i lokalizacji wycieku, sam płomień może rozprzestrzenić się na elementy konstrukcyjne obudowy.

Na poniższym schemacie przedstawiono możliwy rozwój zdarzeń po wycieku wodoru do wnętrza pomieszczeń i potencjalne ich konsekwencje²³.

²³ *Lecture 11: Confined spaces*, <https://hyresponder.eu/e-platform/training-materials/educational-training/lecture-11-confined-spaces/>



Ryc. 25. Zjawiska i skutki istotne dla bezpieczeństwa po wycieku wodoru do wnętrza pomieszczeń. Białe pola odpowiadają zjawiskom związanym z wodorem, a pola szare konsekwencjom

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: *Europäisches Trainthe-Trainer-Programm für Responder Lektion 11 Begrenzte Räume STUFE IV Experte.*

Jak pokazano na rycinie 25, po wycieku wodoru w pomieszczeniu możliwe są dwa scenariusze:

- **brak natychmiastowego zapłonu** (dolna gałąź wykresu),
- **natychmiastowy zapłon, w tym samozapłon** (górną gałąź wykresu).

Zapłon wycieku wodoru może być spowodowany kontaktem z otwartym ogniem, gorącą powierzchnią, iskrą elektryczną lub mechaniczną i innymi czynnikami, a także specyficznym dla wodoru zjawiskiem samozapłonu (w rurociągach wypełnionych powietrzem) poprzez tzw. mechanizm dyfuzji.

Jeśli wyciek ulegnie natychmiastowemu zapaleniu, pożar może rozwinąć się na dwa sposoby:

- z dobrą lub,
- niedostateczną wentylacją.

Dobrze wentylowany pożar charakteryzuje się stosunkowo niską szybkością uwalniania wodoru i całkowitym spalaniem wodoru w obudowie. Zagrożenia związane z dobrze wentylowanym pożarem obejmują:

- bezpośrednie narażenie na płomień i strumień gorących produktów spalania,
- promieniowanie z gorącej warstwy, która utworzyła się pod sufitem,
- gorące powierzchnie stałe, takie jak dachy, uszkodzenia strukturalne elementów nośnych spowodowane bezpośrednim działaniem płomienia itp.

Wzrost szybkości uwalniania wodoru może prowadzić do przejścia do **pożaru z niedostateczną wentylacją**. Stan taki ma miejsce, gdy tlen jest zużywany szybciej niż może być dostarczany przez system wentylacyjny. To z kolei może prowadzić do dwóch sytuacji: **zewnętrznego płomienia** w otworach wentylacyjnych (bez spalania wewnątrz obudowy) i całkowitego **ugaszenia pożaru** wewnątrz obudowy.

Wymienione rodzaje pożarów mogą prowadzić do zapłonu materiałów łatwopalnych wewnątrz obudowy, co skutkuje wtórnym pożarem wewnętrznym. Ogień nadal utrzymuje się, nawet jeśli uwalnianie wodoru zostanie zatrzymane, np. poprzez zamknięcie zaworów bezpieczeństwa. Mogą pojawić się dodatkowe zagrożenia, takie jak emisja toksycznych oparów. Pożar z niedostateczną wentylacją charakteryzuje się stosunkowo dużą szybkością uwalniania się wodoru.

Jeśli obydwa rodzaje pożarów, a także pożary wtórne, nie zostaną ugaszone i będą nadal trwać, może dojść do katastrofalnej awarii wewnętrznych zbiorników magazynowych, skutkującej gwałtownym uwolnieniem energii, a następnie zapłonem dużych ilości wodoru, utworzeniem kuli ognia i fali uderzeniowej. Zewnętrzne płomienie i wtórne pożary zewnętrzne mogą również prowadzić do awarii zewnętrznych zbiorników magazynowych wodoru. W związku z tym należy podjąć środki zapobiegawcze, np. umieszczając zewnętrzne zbiorniki wodoru w pewnej odległości od otworów wentylacyjnych obudowy.

Samogasnący, niedostatecznie wentylowany pożar może ulec ponownemu zapłonowi, gdy do obudowy dostanie się świeże powietrze. Może to prowadzić do lokalnej deflagracji i płomienia dyfuzyjnego w obszarach zawierających wodór powyżej dolnej granicy palności, tj. > 4% objętościowych. Wszystkie rodzaje pożarów stanowią zagrożenie dla bezpieczeństwa życia ludzkiego (bezpośrednie uszkodzenia termiczne spowodowane płomieniem, uszkodzenia spowodowane promieniowaniem cieplnym, nadciśnienie spowodowane PPP i toksyczność produktów spalania wynikających z pożarów wtórnych) oraz dla bezpieczeństwa pożarowego konstrukcji (osłabienie integralności konstrukcji i możliwe zawalenie się budynku w wyniku długotrwałego pożaru).

Jeśli wyciek wodoru nie ulegnie zapaleniu natychmiast po uwolnieniu, doprowadzi to do stopniowego gromadzenia się wodoru w budynku lub obudowie. Uwolnienie z wysokim natężeniem przepływu, które przekracza wydajność wentylacji, może spowodować stężenie wodoru powyżej DGW, co stwarza możliwość opóźnionego zapłonu w warstwie i jego deflagracji. Dodatkowo, uwolnienie z wysokim natężeniem przepływu może spowodować uduszenie.

Chociaż wodór nie jest trujący/toksyczny, to podobnie jak w przypadku wszystkich innych gazów (z wyjątkiem tlenu), generuje ryzyko uduszenia, zwłaszcza w zamknię-

tych przestrzeniach, z powodu niedoboru tlenu. Uwalnianie wodoru w mniejszym tempie, które nie prowadzi do jego akumulacji powyżej 4% objętości w warstwie, może nadal przyczyniać się do opóźnionego zapłonu w strumieniu. Oba rodzaje opóźnionego zapłonu mogą prowadzić do deflagracji mieszaniny wodoru i powietrza z nadciśnieniem, co może zniszczyć obudowę. Łagodzenie skutków eksplozji poprzez odpowiednie deflagracji jest powszechnie stosowaną techniką. Jeśli obudowa jest wyposażona w otwory wentylacyjne, które umożliwiają rozproszenie nadciśnienia deflagracji, może wystąpić **deflagracja wentylowana**. Innym zjawiskiem jest **deflagracja zamknięta**. Różni się ona od deflagracji wentylowanej brakiem znaczących otworów prowadzących do atmosfery, co zapobiega redukcji ciśnienia w obudowie. Szczyt ciśnienia w zamkniętym pojemniku dla stechiometrycznej mieszaniny wodoru i powietrza może początkowo osiągnąć do 815 kPa w NTP, co zniszczyłoby każdą konstrukcję cywilną (która generalnie może wytrzymać nadciśnienie około 10–20 kPa).

W niektórych przypadkach deflagracja może prowadzić do **detonacji**, które stanowią większe zagrożenie dla otoczenia niż deflagracja ze względu na większą prędkość rozprzestrzeniania się płomienia i nadciśnienie. Zarówno deflagracja, jak i detonacja są zagrożeniem dla życia ze względu na ciśnienie i efekty termiczne. Są one również zagrożeniem dla bezpieczeństwa strukturalnego wybuchu, prowadząc w najgorszym przypadku do zniszczenia budynku lub obudowy. Wreszcie, wspomniane wcześniej dwa możliwe przypadki opóźnionego zapłonu mogą wiązać się z pożarami strumieniowymi oraz wpływać na ściany i/lub sufit budynku lub obudowy. Gdy rozgorzeje pożar strumieniowy, może on płonąć zarówno w dobrze wentylowanym, jak i niedostatecznie wentylowanym obszarze, a kolejne zjawiska i konsekwencje dla bezpieczeństwa będą przebiegać zgodnie ze schematem wskazanym w górnej gałęzi diagramu (rycina 25).

7.4. Wyciek, przenikanie

Przenikanie wodoru przez ściany zbiorników magazynowych nie jest uważane za problem dla służb ratowniczych, gdyż intensywność ta nie doprowadza zwykle do utworzenia mieszanin wodoru z powietrzem o stężeniu powyżej V_d . Wynika to z tego, że intensywność przenikania przez ścianki zbiorników nie jest duża, a wodór poprzez jego niską gęstość względem powietrza szybko przemieszcza się do góry.

Uwalnianie i rozpraszanie wodoru w pomieszczeniach

Zastosowania energii wodorowej często wymagają, aby systemy były używane w pomieszczeniach, np. wózki przemysłowe do transportu materiałów w magazynie, ogniwa paliwowe w pomieszczeniu lub wodór przechowywany i rozprowadzany w szafie gazowej. Ze względów bezpieczeństwa może być również konieczne lub pożądane

umieszczenie niektórych elementów/urządzeń systemu wodorowego w pomieszczeniach lub na zewnątrz, w celu zabezpieczenia ich przed dostępem osób postronnych.

Dotychczas uzyskane doświadczenia i sformułowane wnioski zostały wykorzystane do stworzenia wytycznych dotyczących bezpieczeństwa, w tym konkretnych narzędzi pozwalających na ich wdrażanie. Sformułowano zalecenia dotyczące koniecznych zmian w przepisach, kodeksach i normach na poziomie europejskim i międzynarodowym w celu wsparcia bezpiecznego wprowadzenia ogni w paliwowych i wodoru na rynki.

Istnieją trzy ogólne cele ochronne w zakresie ochrony przed możliwymi zagrożeniami związanymi z użyciem wodoru:

- ochrona zdrowia i życia,
- ochrona mienia,
- ochrona środowiska.

Przede wszystkim należy wziąć pod uwagę bezpieczeństwo życia ludzkiego, np. pracowników, klientów i ogółu społeczeństwa. Cele w zakresie bezpieczeństwa życia obejmują między innymi doprowadzenie do sytuacji, w której:

- osoby są w stanie opuścić budynek/obiekt w rozsądnym czasie lub konsekwencje dla osób są akceptowalnie niskie,
- osoby udzielające pierwszej pomocy mogą pracować w bezpiecznych warunkach,
- upadek lub odłamki nie zagrażają osobom postronnym, służbom ratowniczym i innym osobom znajdującym się w pobliżu instalacji²⁴.

²⁴ <https://hyresponder.eu/e-platform/training-materials/educational-training/lecture-II-confined-spaces/>.

8. Ogólne zasady bezpieczeństwa podczas stosowania wodoru

8.1. Strategie i zalecenia dotyczące projektowania i użytkowania infrastruktury wodorowej

Projektując i użytkując infrastrukturę wodorową, należy mieć na uwadze poniższe strategie i zalecenia:

1. Rozważyć, czy rzeczywiście konieczne jest umieszczenie instalacji wodorowej w pomieszczeniu/budynku, czy też można ją przenieść na zewnątrz, gdzie w razie przypadkowego wycieku prawdopodobieństwo nagromadzenia się wodoru w łatwopalnych stężeniach byłoby mniejsze ze względu na lepszą wentylację.
2. Zmniejszyć średnicę przewodu doprowadzającego wodór i ciśnienie robocze do minimum niezbędnego do spełnienia wymagań technicznych dotyczących masowego natężenia przepływu. Jeśli zmniejszenie średnicy przewodu jest niemożliwe lub niepożądane, należy zastosować ograniczniki przepływu.
3. W miarę możliwości należy minimalizować ciśnienie robocze wodoru.
4. Zaprojektować infrastrukturę wodorową w taki sposób, aby strumień ulegał rozproszению, zanim uderzy w sąsiednie przeszkody – ma to zapobiec powstawaniu warstw o podwyższonym stężeniu łatwopalnego wodoru.
5. Zidentyfikować i, jeśli to możliwe, zmniejszyć liczbę potencjalnych źródeł zapłonu, te obecne odizolować.
6. Stosować zbiorniki magazynowe o wysokiej odporności ogniowej w celu zapewnienia wystarczającej ilości czasu na ewakuację osób.
7. Zminimalizować ilość wodoru, aby zapobiec tworzeniu się łatwopalnej mieszaniny w zamkniętej przestrzeni (nawet po całkowitym uwolnieniu i rozproszению wodoru) lub ograniczyć jego zawartość do poziomu, który nie spowoduje uszkodzeń strukturalnych sprzętu o niskiej wytrzymałości i budynków – w przypadku deflagracji.
8. Bezpieczne odległości można obliczyć dla uwolnień bez zapłonu i dla dobrze wentylowanych pożarów strumieniowych przy użyciu opublikowanych i zatwierdzonych nomogramów.

9. W celu poprawienia wentylacji pasywnej należy rozważyć użycie wywietrzników bocznych zamiast wywietrzników dachowych, a także pionowych otworów wentylacyjnych zamiast poziomych w ramach jednego obszaru wentylacji.
10. Rozważyć zastosowanie wielu otworów wentylacyjnych zamiast pojedynczego otworu wentylacyjnego dla jednego obszaru, przy czym różnica wysokości między otworami wentylacyjnymi powinna być jak największa, a otwory wentylacyjne powinny znajdować się po wszystkich stronach budynku, aby poprawić wentylację wspomaganą wiatrem niezależnie od jego kierunku,
11. W miarę możliwości należy zrezygnować z rur i kanałów wentylacyjnych.

8.2. Wentylacja naturalna i wymuszona

Wentylacja może być: naturalna/pasywna lub wymuszona/mechaniczna/aktywna. Wentylację naturalną zapewniają stałe otwory wentylacyjne. W przypadku wodoru zalecane jest równoczesne zastosowanie górnych i dolnych otworów wentylacyjnych. Jeżeli jest to możliwe, naturalna wentylacja powinna zapewniać całkowitą wymaganą wentylację oraz dodatkowy nawiew powietrza.

Wentylacja pasywna to wentylacja naturalna, która jest preferowaną opcją, ponieważ jest tania, niezawodna, nie zależy od źródła energii i zawsze działa. Wentylacja naturalna jest realizowana przez stałe otwory wentylacyjne. Lokalizacja tych otworów wentylacyjnych jest ważna i powinna zapewniać maksymalny przepływ powietrza i odprowadzanie łatwopalnego gazu poza pomieszczenie. Jeśli pożar nie jest wystarczająco wentylowany, cały wodór nie zostanie spalony w pobliżu wycieku, ale tylko tam, gdzie obecny jest tlen.

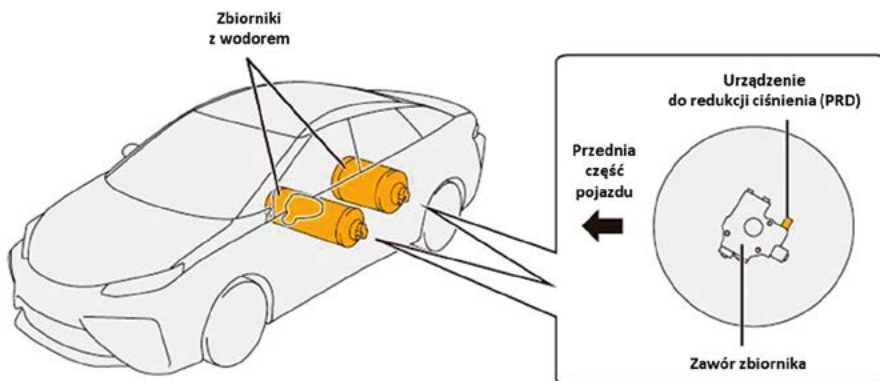
8.3. Wodór – paliwo dla pojazdów z ogniwami paliwowymi

8.3.1. Magazynowanie wodoru

W pojazdach wodór jest zwykle przechowywany w formie gazu pod ciśnieniem. Głównym zagrożeniem związanym ze zbiornikami jest ich rozerwanie w wyniku wzrostu ciśnienia spowodowanego zwiększeniem się temperatury.

Aby zapobiec pęknięciu zbiorników z powodu wzrostu ciśnienia, każdy z nich jest wyposażony w termiczne urządzenie nadmiarowe (TPRD). Urządzenie to jest zaprojektowane tak, aby otwierało się, gdy temperatura otoczenia osiągnie 110°C i upuszczało wodór do atmosfery.

Przewód odpowietrzający znajduje się na dachu – w przypadku autobusów, z boku – w przypadku wózków widłowych. W samochodach może być zlokalizowany na dachu, ale najczęściej znajduje się między tylnymi kołami i jest skierowany na tył pojazdu.



Ryc. 26. Lokalizacja TPRD

Źródło: Przewodnik reagowania kryzysowego Toyota.

8.3.2 Uzupelnianie paliwa – stacje paliw

Stacje tankowania wodoru (HRS) służą do napełniania wodorem zbiorników pojazdów (wózków widłowych, autobusów, samochodów) zasilanych ogniwami paliwowymi. Większość stacji tankowania dostarcza wodór gazowy, który początkowo znajduje się pod ciśnieniem 200 barów i jest sprężony w magazynie wysokiego ciśnienia (HP). Podczas napełniania następuje równoważenie ciśnienia. Ciśnienie w zbiorniku wodoru, z którego tankowane są pojazdy, wynosi 450 barów dla wózków widłowych i autobusów oraz do 1000 barów dla samochodów osobowych. Ciśnienie w zbiorniku samochodowym wynosi od 350 barów dla wózków widłowych i autobusów aż do 700 barów dla samochodów osobowych.

Aby jak najszybciej napełnić samochód, wodór jest chłodzony podczas napełniania za pomocą skroplonego azotu lub agregatu chłodniczego. Dystrybutor zwykle jest umieszczony w dedykowanym budynku lub na zewnątrz. Zbiorniki z wodorem napełniane są na stacjach paliwowych przez specjalny otwór wlewowy.



Ryc. 27. Nasada do tankowania wodoru w samochodzie Toyota Mirai

Źródło: *European Train the Trainer Programme for Responders.*



Ryc. 28. Dozownik do wózka widłowego (Air Liquide)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie *European Train the Trainer Programme for Responders Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU).*

9. Ryzyka związane z pojazdami na ogniwa paliwowe

Pojazdy z ogniwami paliwowymi są jednocześnie pojazdami elektrycznymi. Zagrożenia w przypadku awarii, pożaru i/lub wypadku drogowego z udziałem tych pojazdów podzielono na te związane ze stosowaniem napędu elektrycznego (tabela 8) oraz te wynikające z obecności paliwa wodorowego (tabela 9).

Tabela 8. Zagrożenia związane ze stosowaniem napędu elektrycznego

Ryzyko	Źródło zagrożenia	Sytuacja
Porażenie prądem	Baterie	Porażenie prądem elektrycznym w wyniku nieprawidłowego działania, pożaru, wypadku, wyciągnięcia z wody
Oparzenia	Superkondensatory	Wypływ stopionego metalu w wyniku użycia nieodpowiedniego środka (wody) do gaszenia pożaru
Gwałtowny, niedający się ugasić pożar	Spalanie stopów metali	Rozładowanie akumulatorów podczas pożaru
Zatrucie	Baterie	Pożar lub awaria obudowy (wypadek)

Źródło: Opracowanie własne wykonane na podstawie *European Train the Trainer Programme for Responders*.

Tabela 9. Zagrożenia związane ze stosowaniem wodoru

Zagrożenia	Źródło zagrożenia	Sytuacja
Uduszenie	Wodór (zwykły duszący)	Niezapalony wyciek wodoru w zamkniętej przestrzeni
Oparzenia	Niewidoczny płomień H ₂	Pożar pojazdu oraz aktywacja TPRD
Fala uderzeniowa	Rozerwanie zbiornika H ₂	Pożar pojazdu oraz uszkodzenie TPRD
Fala uderzeniowa i fala ciepła	Eksplozja chmury H ₂ (UVCE)	Wyciek H ₂ i źródło zapłonu

Źródło: Opracowanie własne wykonane na podstawie *European Train the Trainer Programme for Responders*.

9.1. Miejsca parkingowe

Podziemne, otwarte lub zadaszone parkingi dostępne dla samochodów z napędem alternatywnym są koniecznością w obliczu rosnącej na całym świecie liczby pojazdów napędzanych wodorem. Należy rozważyć praktyczne scenariusze i kwestie, które mogą wystąpić w codziennym użytkowaniu takich pojazdów. Zagrożenia związane z umieszczaniem ich w ograniczonych pomieszczeniach można ograniczyć – np. poprzez zastosowanie specjalistycznych konstrukcji takich jak TPRD.

Termiczne urządzenia nadmiarowo-ciśnieniowe (TPRD) są zwykle montowane w pokładowych zbiornikach wodoru. Zapewniają szybkie uwolnienie tego gazu w celu zminimalizowania możliwości katastrofalnego uszkodzenia zbiornika w przypadku wystawienia go na działanie ognia. W razie niezamierzonego uwolnienia wodoru, wysokie przepływy masowe z TPRD są dopuszczalne na zewnątrz, ponieważ wyporność wodoru sprzyja jego rozproszeniu do stężenia poniżej V_d . W zamkniętych przestrzeniach jednak szybkie uwolnienie może sprzyjać gromadzeniu się wodoru i tworzeniu w górnej części pomieszczeń łatwopalnej mieszaniny.

9.2. Tunele

Wykorzystanie pojazdów FCH lub transport sprężonego wodoru gazowego (CGH_2) i kriogenicznego wodoru ciekłego (LH_2) w tunelach i podobnych przestrzeniach zamkniętych stanowi nowe wyzwanie dla ochrony życia ludzkiego, mienia i środowiska. Dotychczasowe badania wykazały, że wypadki w tunelach (ograniczona przestrzeń i wentylacja) mogą mieć poważniejsze konsekwencje niż wypadki w otwartej przestrzeni. Krytyczna analiza zagrożeń i powiązanego ryzyka związanego z wykorzystaniem pojazdów FCH w podziemnych systemach transportowych została przeprowadzona w ramach projektu „HyTunnel-CS” (Rezultat 1.2)²⁵.

9.3. Wpływ prędkości wentylacji na rozpraszanie wodoru w tunelach

Pasywna wentylacja w tunelach zwykle opiera się na efekcie tłoka wywołanym przez poruszające się pojazdy. Może również zachodzić na skutek oddziaływania warunków meteorologicznych. Bardzo często, zwłaszcza w długich tunelach, stosuje się wentylację aktywną, której zadaniem jest usuwanie zanieczyszczeń ze spalin samochodowych oraz – w przypadku pożaru – dymu.

²⁵ https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.2_Risks-and-Hazards.pdf

Wentylacja ma ogromny wpływ na rozpraszanie niebezpiecznych gazów. Dokładna lokalizacja pojazdów i geometria tunelu mogą być ważne, ponieważ wpływają na generowane pole przepływu. Wentylacja może mieć zarówno pozytywny, jak i negatywny wpływ na rozpraszanie wodoru.

Pozytywne aspekty to:

- rozcieńczenie stężenia wodoru i minimalizowanie rozmiaru łatwopalnej chmury;
- bezpieczny transport nieograniczonej ilości wodoru z tunelu przez jego przestrzeń i otwory, gdy wartość stężenia wodoru jest mniejsza od poziomu palności.

Z kolei do negatywnych aspektów należą:

- przemieszczanie się wodoru dalej od miejsca uwolnienia²⁶;
- turbulencje, które mogą być wywołane przez wentylację, która może zwiększyć szybkość spalania, a tym samym nadciśnienie w przypadku zapłonu (z tego powodu szybkość wentylacji w tunelach jest zwykle zmniejszana w razie wykrycia pożaru).

Wentylacja wzdłużna wymaga minimalnej prędkości powietrza w celu usunięcia niebezpiecznego gazu i dymu. Wodór zachowuje się podobnie jak dym pożarowy ze względu na swoją wysoką wyporność. W temacie pożarów w tunelach powstało wiele opracowań, w których zbadano prędkość krytyczną jako funkcję szybkości uwalniania ciepła. Wartość prędkości wentylacji wynosząca 3,5 m/s jest uznawana za wystarczającą dla większości pożarów tuneli, aby zapobiec „efektowi cofania się”, nawet w przypadku dużych pożarów o mocy ponad 100 MW²⁷.

9.4. Organiczne nośniki ciekłego wodoru

Ciekłe organiczne nośniki wodoru (ang. *Liquid Organic Hydrogen Carriers*, LOHC) to substancje chemiczne, które mogą przechowywać i transportować wodór w sposób bezpieczny i efektywny. Koncepcja LOHC opiera się na wykorzystaniu związków organicznych zdolnych do wiązania wodoru (uwodornienia) i jego późniejszego uwalniania (odwodornienia). Te związki umożliwiają przechowywanie wodoru w stabilnej, płynnej formie, co rozwiązuje wiele problemów związanych z magazynowaniem i transportem wodoru w formie gazowej.

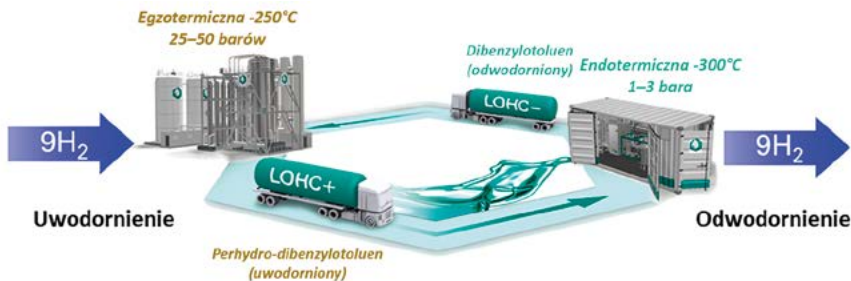
W przeciwieństwie do magazynowania wodoru poprzez uwodornienie gazów, takich jak CO₂ lub N₂, uwalnianie wodoru z systemów LOHC wytwarza czysty wodór po kondensacji wysokowrzących związków będących nośnikami.

²⁶ D1.2 Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spaces, 39, https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.2_Risks-and-Hazards.pdf [dostęp: 10.10.2024].

²⁷ https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.1-Effectiveness-of-conventional-safety-measures-.pdf.

Poszczególne etapy koncepcji LOHC są następujące:

1. Wytwarzanie wodoru.
Produkcja poprzez reforming parowy metanu, elektrolizę.
2. Uwodornienie (hydrogenacja).
Proces ten polega na chemicznym przyłączeniu wodoru do nośnika organicznego w obecności katalizatora. Nośnik organiczny przyjmuje wodór i staje się nasycony (uwodorniony).
3. Odwodornienie (dehydrogenacja).
Kiedy potrzebne jest uwolnienie wodoru, uwodorniony nośnik jest poddawany procesowi odwodornienia w obecności katalizatora, co prowadzi do uwolnienia wodoru i przekształcenia nośnika do formy pierwotnej (odwodornionej).
Proces uwalniania wodoru wymaga ciepła, które może być dostarczane przez wysokotemperaturowe ciepło odpadowe, gaz ziemny, energię elektryczną lub wódór.
4. Wykorzystanie wodoru.



Ryc. 29. Koncepcja ciekłego organicznego nośnika wodoru (LOHC Hydrogenious)

Źródło: <https://hydrogenious.net/how/#technology> [dostęp: 25.07.2024].

Zalety LOHC są następujące:

1. **Bezpieczeństwo:** LOHC są mniej łatwopalne i mniej wybuchowe niż wodór w formie gazowej, co poprawia bezpieczeństwo transportu i magazynowania.
2. **Stabilność:** są chemicznie stabilne i mogą być przechowywane przez długi czas bez utraty swoich właściwości.
3. **Kompatybilność z istniejącą infrastrukturą:** mogą być transportowane za pomocą istniejących systemów transportowych dla cieczy, takich jak cysterny czy rurociągi.
4. **Wysoka gęstość energii:** pozwalają przechowywać dużą ilość wodoru na jednostkę objętości, co jest korzystne z punktu widzenia efektywności energetycznej.

Wady technologii LOHC:

1. **Straty energetyczne:** procesy uwodornienia i odwodornienia wymagają energii, co prowadzi do strat energetycznych. Efektywność całkowita cyklu może być niższa w porównaniu do innych metod magazynowania wodoru.
2. **Wysokie koszty energii:** procesy te mogą być kosztowne ze względu na potrzebę dostarczania energii do katalizatorów i systemów grzewczych.
3. **Wysokie koszty:** katalizatory stosowane w procesach uwodornienia i odwodornienia są często drogie i mogą wiązać się z koniecznością użycia metali szlachetnych, co zwiększa koszty operacyjne.
4. **Wymagania technologiczne:** systemy LOHC wymagają specjalistycznego sprzętu do uwodornienia i odwodornienia, co może być skomplikowane i kosztowne w instalacji i utrzymaniu.
5. **Degradacja:** nośniki organiczne mogą ulegać degradacji po wielu cyklach uwodornienia i odwodornienia, co wpływa na ich długoterminową wydajność i może wymagać regularnej wymiany.

Zagrożenia dla bezpieczeństwa związane ze stosowaniem technologii LOHC:

1. **Toksyczność i zagrożenie zdrowotne:** niektóre związki organiczne stosowane jako nośniki mogą być toksyczne lub szkodliwe dla zdrowia. Kontakt z nimi może prowadzić m.in. do podrażnień skóry, dróg oddechowych i oczu.
2. **Zagrożenie pożarowe:** substancje stosowane jako nośniki wodoru w technologii LOHC są mniej łatwopalne niż wodór w formie gazowej, ale niektóre związki organiczne mogą nadal być łatwopalne, co stwarza ryzyko pożaru.
3. **Wysokie ciśnienie i temperatura:** procesy uwodornienia i odwodornienia często wymagają wysokich temperatur i ciśnień, co stwarza ryzyko eksplozji lub awarii systemów ciśnieniowych.
4. **Korozja i degradacja materiałów:** nośniki i procesy mogą powodować korozję i degradację materiałów używanych w systemach magazynowania i transportu, co może prowadzić do awarii sprzętu.
5. **Zagrożenia środowiskowe:** wycieki nośników organicznych mogą zanieczyszczać środowisko. Nieodpowiednie zarządzanie odpadami po procesach uwodornienia i odwodornienia może również stanowić zagrożenie dla środowiska.

Środki zaradcze:

1. **Odpowiednia regulacja i normy bezpieczeństwa:** stosowanie rygorystycznych standardów i norm bezpieczeństwa w projektowaniu, instalacji i eksploatacji systemów LOHC.
2. **Monitorowanie i konserwacja:** regularne monitorowanie stanu technicznego systemów oraz przeprowadzanie konserwacji w celu zapobiegania awariom.

3. **Szkolenie personelu:** edukacja i szkolenie personelu w zakresie bezpiecznego obchodzenia się z LOHC oraz postępowania w sytuacjach awaryjnych.
4. **Zastosowanie nowoczesnych technologii:** wykorzystanie zaawansowanych technologii monitorowania i automatyzacji w celu minimalizacji ryzyka i poprawy efektywności procesów.

Ze względu na swoją wysoką gęstość energetyczną, łatwość przechowywania i transportu oraz szeroką dostępność, jedną ze znanych substancji stosowanych jako nośnik wodoru jest metanol (CH_3OH). Znajduje on zastosowanie w procesach reformingu parowego, gdzie wodór jest produkowany przez reakcję metanolu z wodą w obecności katalizatora.

10. Zdarzenia związane z wodorem wymagające interwencji zespołów ratowniczych KSRG

10.1. Przyjmowanie zgłoszenia o awarii, w tym o pożarze z udziałem wodoru

Incydent rozpoczyna się w momencie, gdy do CPR dociera zgłoszenie alarmowe. Podczas zgłaszania do straży pożarnej zdarzenia awaryjnego, w tym pożaru, ważne jest przekazanie jak najbardziej kompletnych i precyzyjnych informacji. Dzięki temu ratownicy mogą odpowiednio przygotować się do akcji i zoptymalizować swoje działania, co jest kluczowe dla bezpieczeństwa osób oraz skuteczności interwencji. Świadkowie dzwoniący do służb ratunkowych są zwykle nadmiernie podekscytowani lub przerażeni. Oto kluczowe informacje, które straż pożarna powinna uzyskać podczas zgłoszenia:

1. Lokalizacja zdarzenia:

- dokładny adres, włącznie z numerem budynku, ulicą, miastem i wszelkimi dodatkowymi wskazówkami ułatwiającymi lokalizację, np. znakiem charakterystycznym czy szczegółami dojazdu;

2. Rodzaj zdarzenia:

- opis tego, co się stało, np. pożar, wyciek gazów, wypadek drogowy,
- w przypadku pożaru, informacja o tym, czy płonie budynek, pojazd, las, czy inne obiekty;

3. Znane zagrożenia:

- obecność materiałów niebezpiecznych, takich jak wodór, gaz ziemny, materiały chemiczne,
- szczegóły dotyczące rodzaju i ilości substancji niebezpiecznych, jeśli są znane;

4. Stan obiektu:

- czy budynek jest zamieszkały, pusty, czy znajdują się w nim obecnie jakieś osoby,
- szczególne warunki mogące wpływać na akcję ratunkową, jak zablokowane wyjścia, uszkodzenia strukturalne budynku;

5. Liczba i stan osób:

- informacja o liczbie osób znajdujących się w budynku lub na terenie zdarzenia,
- informacje o ewentualnych poszkodowanych lub zaginionych osobach;

6. Dostęp do obiektu:

- informacje o możliwym dostępie dla pojazdów ratunkowych, ograniczeniach drogowych, najlepszych trasach dojazdu;
- specyficzne utrudnienia mogące wpływać na dostęp, takie jak zamknięte drogi, ograniczenia wjazdu;

7. Szczegóły dotyczące pożaru:

- rodzaj pożaru, np. płomienie otwarte, tlenie,
- wstępna ocena rozmiaru pożaru,
- wizualne oznaki pożaru, takie jak dym, płomienie;

8. Kontakt do zgłaszającego:

- imię i nazwisko osoby zgłaszającej,
- numer telefonu do osoby zgłaszającej, aby ratownicy mogli uzyskać dodatkowe informacje lub wskazówki.

Dobrze przygotowane i precyzyjne zgłoszenie pozwala służbom ratunkowym na efektywniejsze i szybsze reagowanie, co ma bezpośredni wpływ na minimalizowanie skutków awaryjnych sytuacji oraz bezpieczeństwo osób zaangażowanych w zdarzenie.

Gdy zgłaszane jest zdarzenie awaryjne, takie jak wypadek komunikacyjny lub pożar z udziałem wodoru, informacje przekazywane straży pożarnej powinny być wyjątkowo szczegółowe i skoncentrowane na specyfice tego typu zagrożenia. Wodór jako gaz łatwopalny i niemal niewidoczny podczas spalania stwarza unikalne wyzwania dla służb ratunkowych. Oto kluczowe informacje, które są niezbędne podczas zgłaszania takiego zdarzenia:

1. Dokładna lokalizacja takiego zdarzenia:

- precyzyjny adres oraz informacje pomocnicze dotyczące lokalizacji, które mogą ułatwić szybkie dotarcie na miejsce.

2. Informacja o obecności wodoru:

- potwierdzenie, że wodór bierze udział w pożarze;
- lokalizacja źródeł wodoru (np. zbiorniki, instalacje przemysłowe).

3. Rodzaj i skala zagrożenia:

- szczegóły dotyczące tego, czy doszło do wycieku wodoru, czy jest to pożar z udziałem wodoru;
- oceniany rozmiar i intensywność pożaru.

4. Znane zagrożenia:

- informacja o potencjalnych innych materiałach niebezpiecznych w pobliżu miejsca zdarzenia;
- warunki, które mogą wpłynąć na rozprzestrzenianie się pożaru lub utrudnić akcję gaśniczą.

5. Stan i liczba osób w zagrożonym obszarze:

- liczba osób znajdujących się w budynku lub na terenie zdarzenia;
- informacja o tym, czy w wyniku incydentu zginęły, zostały ranne lub są zagrożone jakieś osoby;
- informacje o ewentualnych poszkodowanych lub osobach potrzebujących natychmiastowej pomocy.

6. Specyfika dostępu do miejsca zdarzenia:

- informacje o możliwych utrudnieniach dla pojazdów ratunkowych;
- najlepsze trasy dojazdu oraz ewentualne problemy z dostępem.

7. Środki bezpieczeństwa podjęte przed przybyciem straży:

- dane na temat działań, które zostały zrealizowane przed przybyciem straży pożarnej (np. ewakuacja, próby zabezpieczenia miejsca).

Przykładowo, jeśli wezwanie alarmowe dotyczy pojazdu z ogniwami paliwowymi, który zapalił się na ulicy, osobie zgłaszającej należy przekazać następujące zalecenia:

- upewnij się, że wszyscy pasażerowie opuścili pojazd;
- jeśli jest to bezpieczne, wyłącz klucz stykowy;
- udziel pierwszej pomocy poszkodowanym w bezpiecznym miejscu;
- jeśli jesteś przeszkolony i potrafisz używać gaśnicy, użyj jej, jeśli pożar jest niewielki;
- ewakuuj obszar, by uniemożliwić komukolwiek zbliżenie się do pojazdu przed przybyciem straży pożarnej.

8. Szczegóły kontaktowe osoby zgłaszającej:

- imię, nazwisko i numer telefonu osoby, która zgłasza zdarzenie, aby służby mogły uzyskać dodatkowe informacje lub dokładne wskazówki.

9. Specjalne wymagania dla ratowników:

- załoga jednostek ratowniczych biorących udział w zwalczaniu zdarzeń z występowaniem wodoru musi być wyposażona w kompletny sprzęt pożarniczy składający się w szczególności z następujących elementów: hełm z osłoną twarzy, kaptur, kurtka i spodnie ochronne oraz buty i rękawice strażackie; wszystkie ubrania ochronne muszą być noszone jako komplet.
- wskazanie jest używanie specjalnego sprzętu, takiego jak kamery termowizyjne do lokalizacji płomieni wodoru, oraz:
 - poliwalentny detektor gazów palnych,
 - detektor H₂,
 - kamera termowizyjna,
 - detektor O₂.
- obowiązkowe jest również używanie niezależnego aparatu oddechowego (SOUO).

Podawanie tych szczegółowych informacji jest niezwykle ważne, ponieważ właściwe zrozumienie sytuacji i przygotowanie do niej jednostek ratowniczych może znacząco wpłynąć na szybkość i skuteczność reakcji, a tym samym na minimalizację szkód i ochronę życia ludzkiego.

Przed opuszczeniem jednostki dowódca zdarzenia musi, korzystając z sugestii CPR lub SKKM/P, wybrać bezpieczną drogę dotarcia na miejsce zdarzenia, mając na uwadze to, aby zespół ratowniczy nie wszedł w kontakt z chmurą łatwopalnego gazu, a także to, aby nie dotrzeć na miejsce zdarzenia pod wiatr. Powinien ponadto dysponować odpowiednimi zasobami, w tym specjalistycznym wsparciem systemu ratowniczego KSRG i znacznymi zasobami wodnymi (jeśli zasoby na terenie, na którym ma miejsce zdarzenie, nie są wystarczające, należy przewidzieć zadysponowanie pojazdów umożliwiających dostarczenie wody, zgodnie z procedurami przewidzianymi na takie sytuacje).

10.2. Działania ratownicze zespołu ratowniczego

Działania ratownicze straży pożarnej i służb ratowniczych podczas niebezpiecznych zdarzeń związanych z wodorem wymagają specjalistycznej wiedzy i odpowiedniego podejścia, biorąc pod uwagę wspomniane już wcześniej unikalne właściwości wodoru, takie jak wysoka palność, niewidoczność płomienia i potencjalne ryzyko wybuchu.

Oto kluczowe elementy działań operacyjnych, które powinno się stosować podczas reagowania na takie zdarzenia:

1. Przygotowanie i podejście do miejsca zdarzenia:

- szybka ocena sytuacji: zbieranie informacji od osoby zgłaszającej i osób znajdujących się na miejscu, w celu określenia skali zdarzenia i potencjalnych zagrożeń;
- stosowanie odpowiedniego sprzętu: używanie aparatury do oddychania ze względu na możliwość obecności wodoru w powietrzu;
- ostrożne zbliżanie się: zachowanie bezpiecznej odległości, z uwagi na ryzyko wybuchu i niewidocznych płomieni;
- zapoznanie się z dostępnymi dokumentami, takimi jak instrukcja bezpieczeństwa pożarowego i plan ratowniczy dla obiektu, który znajduje się na miejscu zdarzenia, oraz karty ratownicze dla pojazdów uczestniczących w incydencie.

2. Zarządzanie miejscem zdarzenia:

- zabezpieczenie terenu: ustanowienie stref bezpieczeństwa, odcięcie dostępu dla osób niepowołanych;
- wentylacja obszaru: zapewnienie odpowiedniej wentylacji w celu rozproszenia nagromadzonego wodoru i minimalizacji ryzyka wybuchu;

- monitoring stężeń wodoru: używanie detektorów gazu do monitorowania poziomów wodoru i upewnienie się, że wartości są w bezpiecznym zakresie.

3. Działania gaśnicze i kontrola wycieków:

- używanie odpowiednich środków gaśniczych: w przypadku pożarów wodoru zalecane jest stosowanie proszków gaśniczych lub mgły wodnej, które wykazują najwyższą skuteczność;
- kontrola źródeł zapłonu: eliminacja potencjalnych źródeł zapłonu, w tym wyłączenie urządzeń elektrycznych w strefie zagrożenia;
- opanowanie wycieków: jeżeli to możliwe, próba zatrzymania wycieku przy użyciu specjalistycznego sprzętu, przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa.

4. Ewakuacja i ratownictwo:

- ewakuacja osób: zapewnienie szybkiej i bezpiecznej ewakuacji;
- poszukiwanie i ratowanie: poszukiwanie potencjalnie uwięzionych lub rannych osób, z uwzględnieniem środków ochrony osobistej.

5. Współpraca z innymi instytucjami:

- komunikacja z lokalnymi władzami i innymi służbami: współpraca z policją, pogotowiem ratunkowym, inspekcją środowiskową oraz innymi agencjami, które mogą wspierać działania ratunkowe i zarządzanie kryzysowe.
- dokładne informowanie o sytuacji: regularne informowanie mediów i społeczeństwa.

6. Postępowanie po zakończeniu interwencji:

- dokładne przeglądy i analiza zdarzenia: przegląd działań podjętych podczas interwencji w celu identyfikacji obszarów do poprawy i lepszego przygotowania na przyszłość;
- raportowanie i dokumentacja: dokumentowanie przebiegu zdarzenia, podjętych działań i wniosków, które mogą być użyteczne dla przyszłych czynności w tym zakresie i szkoleń.

Powyższe czynności wymagają odpowiedniego przeszkolenia i przygotowania personelu straży pożarnej i służb ratowniczych, pozwalających na efektywne i bezpieczne reagowanie na zdarzenia związane z wodorem.

10.3. Przykłady incydentów

Przykład 1

Samochód FCH płonie na małej drodze na wsi. Kierowca jest bezpieczny i znajduje się poza obszarem zagrożenia.

Urządzenie termowizyjne wykrywa duży płomień, słychać głośny syczący dźwięk.

Analiza

TPRD zbiornika H₂ jest otwarty, w bardzo krótkim czasie zapalony wyciek zostanie zgaszony. Płomień nie zagraża niczemu.

Wybór taktyczny

Zastosuj taktykę obronną: zamknij drogę w obu kierunkach, poczekaj na zgaszenie płomienia, przygotowując linie węzowe, a następnie ugaś pożar samochodu, stosując procedury pożaru dla samochodu elektrycznego.

Przykład 2

Samochód FCH płonie na zatłoczonej ulicy, w pobliżu 10-piętrowego budynku, nie słychać żadnego dźwięku, pożar rozpoczął się 2 minuty temu.

Zamiar taktyczny

Zastosuj taktykę ofensywną: zamknij drogę w obu kierunkach, nie pozwól nikomu zbliżyć się na mniej niż 150 metrów od samochodu. Rozwiń dwie linie węzowe i natychmiast wykonaj natarcie na pożar samochodu jednocześnie dwoma prądami z bezpiecznych kątów, zanim TPRD się otworzy. Stosuj osłony tj.: tarcza balistyczna, pojazd, budynek itp. Po ugaszeniu pożaru należy kontynuować chłodzenie zbiorników.

Ochrona obiektów zagrożonych

Etap „ochrony” ma na celu uniknięcie zniszczeń spowodowanych przez zdarzenie (pożar) lub przez to, co zostało użyte do jego ugaszenia (woda).

Na przykład, jeśli pożar ma miejsce na parkingu autobusowym, autobusy znajdujące się najbliżej pożaru są chronione za pomocą kurtyn wodnych, a te, które znajdują się nieco dalej, mogą po prostu odjechać z miejsca zdarzenia. W budynkach i zakładach przemysłowych destrukcyjne w skutkach może okazać się rozpylanie wody lub piany. KDR powinien używać ich tylko w ilościach niezbędnych. Na tym etapie konieczne może być również skrócenie czasu podawania środka gaśniczego.

Kontrola miejsca zdarzenia

Po ugaszeniu pożaru ważne jest, aby oczyścić miejsce zdarzenia, usunąć i sprawdzić wszystkie spalone fragmenty materiału, aby upewnić się, że pożar został całkowicie ugaszony.

Weryfikacja terenu działań

Po zakończeniu działań gaśniczych i przekazaniu miejsca zdarzenia ratownicy nie mogą zbyt wcześnie opuszczać terenu pożaru. Należy regularnie sprawdzać temperaturę zbiornika, który uległ spaleni.

Rozpoznanie terenu pożaru musi być przeprowadzane stale, dopóki istnieje jakiegokolwiek ryzyko.

10.4. Strategie interwencyjne działań dla instalacji FCH

Strategie interwencyjne w przypadkach niebezpiecznych zdarzeń związanych z instalacjami, w których stosowany jest wodór, obejmują kilka kluczowych kroków. Mają one na celu minimalizację ryzyka dla ludzi, mienia oraz środowiska. Poniżej przedstawiono zarys takich strategii.

10.4.1. Prewencja

- **Szkolenia i edukacja:** regularne szkolenia dla personelu w zakresie bezpiecznego operowania instalacjami FCH oraz postępowania w sytuacjach awaryjnych.
- **Procedury ratownicze:** opracowanie i wdrożenie szczegółowych procedur ratowniczych oraz standardów bezpieczeństwa.
- **Regularne inspekcje i konserwacja:** systematyczne przeglądy i konserwacja urządzeń oraz systemów zabezpieczeń.

10.4.2. Monitoring i wczesne wykrywanie

- **Systemy monitoringu:** instalacja czujników wykrywających wycieki wodoru, zmiany ciśnienia, temperatury oraz inne potencjalnie niebezpieczne zmiany.
- **Alarmy i systemy ostrzegawcze:** uruchamianie alarmów w przypadku wykrycia nieprawidłowości, umożliwiając szybkie reagowanie.

10.4.3. Reagowanie na incydent

- **Plan awaryjny:** opracowanie i regularne aktualizowanie planów awaryjnych, które zawierają szczegółowe procedury postępowania w przypadku różnych scenariuszy niebezpiecznych zdarzeń.
- **Ewakuacja:** zapewnienie klarownych procedur ewakuacyjnych oraz ich regularne ćwiczenia.
- **Zespoły interwencyjne:** ustalenie wyspecjalizowanych zespołów interwencyjnych, odpowiedzialnych za szybkie i skuteczne działania w przypadku awarii.

10.4.4. Neutralizacja i minimalizacja skutków

- **Środki neutralizujące:** stosowanie specjalistycznych środków i technologii do neutralizacji wycieków i zabezpieczania instalacji.
- **Kontrola rozprzestrzeniania:** zapewnienie odpowiednich środków do kontroli i ograniczania rozprzestrzeniania się substancji niebezpiecznych.

10.4.5. Postępowanie po incydencie

- **Ocena szkód:** przeprowadzenie dokładnej analizy szkód oraz ocena przyczyn incydentu.
- **Działania naprawcze:** szybkie usunięcie skutków awarii i naprawa uszkodzonych instalacji.
- **Raportowanie i dokumentacja:** sporządzenie szczegółowych raportów z incydentu oraz wdrożenie zaleceń wynikających z analizy.

10.4.6. Ciągłe doskonalenie

- Analiza incydentów: regularna analiza incydentów oraz wdrażanie wniosków w celu poprawy bezpieczeństwa.
- Aktualizacja procedur: ciągłe doskonalenie i aktualizowanie procedur bezpieczeństwa na podstawie najnowszych technologii oraz najlepszych praktyk branżowych.

Każdy z powyższych kroków powinien być dokładnie zaplanowany i dostosowany do specyficznych warunków i wymagań danej instalacji wodorowej. Takie podejście zapewni maksymalną skuteczność działań interwencyjnych w przypadku niebezpiecznych zdarzeń.

10.5. Działania jednostek KSRG

Sytuacje objęte tą sekwencją mogą obejmować następujące działania:

- uszkodzona osoba na terenie objętym zdarzeniem z występowaniem wodoru,
- uduszenie spowodowane wyciekiem H_2 w zamkniętej przestrzeni,
- porażenie prądem,
- oparzenia spowodowane wyciekiem H_2 .

Poniżej przedstawiono orientacyjne sekwencje postępowania zespołu ratowniczego podczas typowych zdarzeń z występowaniem wodoru.

10.5.1. Rodzaj zdarzenia: brak wycieku, brak pożaru (alarm techniczny, wypadek przy pracy, wypadek drogowy)

W przypadku zdarzenia, w którym nie doszło do wycieku ani pożaru, ale mamy do czynienia z alarmem technicznym, wypadkiem przy pracy lub wypadkiem drogowym, taktyka działań ratowniczo-gaśniczych powinna obejmować następujące kroki.

I. Ocena sytuacji/rozpoznanie w CPR / SKKM/P

1. Pozyskać możliwe i istotne dla zdarzenia informacje od osoby/osób zgłaszających.
2. Ustalić i zadysponować na miejsce zdarzenia jednostki ratownicze zgodnie z planem ratowniczym.
3. Ustalić optymalną trasę dojazdu, uwzględniając warunki atmosferyczne, w tym kierunek wiatru.
4. Po dotarciu na miejsce zdarzenia zatrzymać pojazd pożarniczy 50 m przed miejscem zdarzenia.

II. Działania po przybyciu na miejsce zdarzenia

1. Zidentyfikować źródła alarmu technicznego (np. systemy HVAC²⁸, instalacje elektryczne), współpracować z personelem technicznym w celu rozwiązania problemu.
2. Upewnić się, że miejsce zdarzenia jest bezpieczne dla ratowników.
3. Sprawdzić, czy nie ma zagrożenia dla osób postronnych.

III. Zabezpieczenie miejsca zdarzenia

1. Decyzje organizacyjne:
 - ustanowić strefę wydzieloną o promieniu nie mniejszym niż 150 m,
 - ewakuować osoby z obszaru zagrożenia, jeśli to konieczne przeprowadzić ewakuację ratowniczą,
 - udzielić pierwszej pomocy poszkodowanym,
 - wezwać wsparcie medyczne (jeśli to konieczne), ustabilizować poszkodowanych (jeśli zachodzi konieczność),
 - zabronić używania urządzeń elektrycznych lub elektronicznych w strefie zagrożenia innych niż ATEX (telefony komórkowe, radia itp.).
2. Kontrolować podłączenia budynku do sieci zewnętrznych (wodociągowej, kanalizacyjnej, energetycznej, gazowej, telekomunikacyjnej, ciepłowniczej, odprowadzenia wód opadowych).
3. Wyłączyć maszyny lub urządzenia.

²⁸ Systemy HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) to systemy ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji, które są zaprojektowane w celu utrzymania komfortowych warunków klimatycznych w budynkach mieszkalnych, komercyjnych i przemysłowych. HVAC to kompleksowa technologia obejmująca różnorodne urządzenia i instalacje, które współpracują ze sobą w celu zapewnienia odpowiednich warunków temperaturowych, jakości powietrza oraz wilgotności; źródło: OpenAI. ChatGPT. Wersja 4.0. 2024. OpenAI, <https://chatgpt.com/>.

IV. Działania ratowniczo-gaśnicze

1. W przypadku wycieku wodoru w przestrzeniach zamkniętych:
 - nosić niezależny SOUO,
 - usunąć uszkodzowanego poza wydzieloną strefę.
2. Jeśli istnieje ryzyko porażenia prądem lub śmierci ofiary:
 - aby usunąć uszkodzowanego, użyć sprzętu nieemitującego iskier,
 - unikać kontaktu osób udzielających pierwszej pomocy z elementami elektrycznymi.
3. Przeprowadzać badania stężenia wodoru (detektor H₂), gazowych węglowodorów, tlenu (detektor O₂) przy użyciu eksplozometru (od góry do dołu instalacji lub magazynu), kontrola temperatury przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej. Stosować urządzenia w wykonaniu ATEX.

V. Ochrona przed narażeniem

1. Działania zapobiegające ryzyku niedotlenienia:
 - zamknąć zawory zasilania wodorem,
 - wentylować obszar, stosować wentylację naturalną (nie używać wentylatorów elektrycznych i termicznych).
2. Działania związane z zagrożeniem elektrycznym:
 - nacisnąć wyłącznik awaryjny instalacji (opóźnienie 20 minut przy uwzględnieniu prądu szczątkowego).

VI. Wypadek drogowy

1. Ocena sytuacji:
 - ocena liczby i stanu uszkodzowanych,
 - identyfikacja zagrożeń (np. wyciek paliwa, przewrócone pojazdy).
2. Zabezpieczenie miejsca zdarzenia:
 - ustawienie znaków ostrzegawczych,
 - wyłączenie silników pojazdów biorących udział w wypadku.
3. Ratowanie uszkodzowanych:
 - udzielenie pierwszej pomocy,
 - współpraca z zespołami ratowniczymi i medycznymi.
4. Usunięcie przeszkód:
 - zabezpieczenie pojazdów,
 - uprzątnięcie drogi po zakończeniu działań ratowniczych.

VII. Działania ogólne²⁹

1. Komunikacja:
 - stała komunikacja między zespołami ratowniczymi a koordynatorem działań,
 - informowanie odpowiednich służb i jednostek o stanie sytuacji.
2. Ewakuacja:
 - jeśli istnieje zagrożenie, przeprowadzenie ewakuacji zgodnie z procedurami.
3. Dokumentacja:
 - dokładne dokumentowanie wszystkich działań i obserwacji na miejscu zdarzenia.

Zastosowanie odpowiedniej taktyki i przestrzeganie powyższych kroków w przypadku braku wycieku i pożaru, ale w obecności innego rodzaju zagrożeń, pozwoli na skuteczne i bezpieczne przeprowadzenie działań ratowniczo-gaśniczych.

10.5.2. Rodzaj zdarzenia: pożar elementów elektrycznych (w tym baterii) w instalacji FCH

Pożar elementów elektrycznych, w tym baterii, w instalacji FCH stanowi szczególne wyzwanie dla jednostek straży pożarnej ze względu na specyficzne właściwości i ryzyka związane z tymi elementami. Kroki i procedury, które jednostki straży pożarnej powinny podjąć w przypadku takiego pożaru, opisano poniżej.

I. Ocena sytuacji/rozpoznanie w CPR / SKKM/P

1. Pozyskać możliwe i istotne dla zdarzenia informacje od osoby/osób zgłaszających.
2. Ustalić i zadysponować na miejsce zdarzenia jednostki ratownicze zgodnie z planem ratowniczym.
3. Ustalić optymalną trasę dojazdu, uwzględniając warunki atmosferyczne, w tym kierunek wiatru.
4. Informować załogę o potencjalnych zagrożeniach, takich jak wybuchy, emisje toksycznych gazów czy ryzyko porażenia prądem.
5. Po dotarciu na miejsce zdarzenia zatrzymać pojazd pożarniczy 150 m przed miejscem zdarzenia.

²⁹ *European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders, Zalecenia dotyczące ogólnoeuropejskiego uznawania i kontynuacji szkoleń w zakresie bezpieczeństwa wodorowego dla ratowników*, <https://ctif.org/commissions-and-groups/hyresponder-european-hydrogen-train-trainer-programme-responders> [dostęp: 24.07.2024].

II. Działania po przybyciu na miejsce zdarzenia

1. Dokonać szybkiej oceny sytuacji:
 - strefa zagrożenia: ustalenie i oznaczenie strefy zagrożenia, aby zminimalizować ryzyko dla ratowników i osób postronnych,
 - informacje techniczne: konsultacja z personelem technicznym instalacji w celu uzyskania szczegółowych informacji na temat systemu FCH i lokalizacji elementów elektrycznych oraz baterii.
2. Zidentyfikować źródła alarmu technicznego (np. systemy HVAC, instalacje elektryczne), współpracować z personelem technicznym w celu rozwiązania problemu.
3. Upewnić się, że miejsce zdarzenia jest bezpieczne dla ratowników.
4. Sprawdzić, czy nie ma zagrożenia dla osób postronnych.

III. Zabezpieczenie miejsca zdarzenia

1. Decyzje organizacyjne:
 - strefa zagrożenia: ustanowić i oznaczyć strefę zagrożenia, aby zminimalizować ryzyko dla ratowników i osób postronnych.
2. Zabezpieczenie miejsca zdarzenia:
 - ewakuować osoby z strefy zagrożenia, jeśli to konieczne przeprowadzić ewakuację ratunkową,
 - udzielić pierwszej pomocy poszkodowanym,
 - wezwać wsparcie medyczne (jeśli to konieczne), ustabilizować poszkodowanych (jeśli to konieczne),
 - zabronić używania urządzeń elektrycznych lub elektronicznych w strefie wykluczenia innej niż ATEX (telefony komórkowe, radia itp.)
3. Kontrolować podłączenia budynku do sieci zewnętrznych (wodociągowej, kanalizacyjnej, energetycznej, gazowej, telekomunikacyjnej, ciepłowniczej, odprowadzenia wód opadowych).
4. Wyłączyć maszyny lub urządzenia.

IV. Działania gaśnicze

1. Środki gaśnicze: stosować odpowiednie środki gaśnicze:
 - do pożarów urządzeń elektrycznych: środki gaśnicze przeznaczone do pożarów grupy C, takie jak proszki gaśnicze, dwutlenek węgla (CO₂), suche chemiczne gaśnice,
 - do pożarów baterii litowych: woda w kontrolowanych ilościach może być uży-

- wana do chłodzenia baterii litowych, ale nie do gaszenia. Inne środki mogą obejmować specjalistyczne gaśnice do baterii litowych.
2. Zabezpieczenie przed wodorem: jeśli stosowana jest woda, unikanie kontaktu z obszarami, gdzie może być uwalniany wodór, aby zminimalizować ryzyko wybuchu.
 3. Chłodzenie:
 - chłodzenie elementów: chłodzenie sąsiadujących elementów instalacji, aby zapobiec rozprzestrzenianiu się pożaru i eksplozji baterii.
 - monitorowanie temperatury: ciągle monitorowanie temperatury w celu oceny ryzyka ponownego zapłonu.
 4. Wentylacja:
 - zapewnić wentylację: wykorzystanie wentylacji do usuwania dymu i gazów toksycznych, w tym wodoru, w celu zminimalizowania ryzyka wybuchu i poprawienia widoczności dla ratowników.

V. Po ugaszeniu pożaru³⁰

1. Kontrola i dogaszanie:
 - inspekcja: dokładna inspekcja miejsca zdarzenia w celu identyfikacji i ugaszenia wszelkich ukrytych zarzewi ognia,
 - chłodzenie baterii: dalsze chłodzenie baterii, aby zapobiec ponownemu zapłonowi.
2. Bezpieczeństwo wtórne:
 - monitoring: kontynuowanie monitorowania obszaru przez pewien czas po ugaszeniu pożaru, w celu upewnienia się, że nie ma ryzyka ponownego wybuchu lub zapłonu,
 - dekontaminacja: usunięcie zanieczyszczeń chemicznych i toksycznych pozostałości po pożarze.

Wnioski i informacja ze zdarzenia:

1. Dokumentacja: sporządzenie szczegółowego raportu z interwencji, uwzględniającego prawdopodobną przyczynę pożaru, skuteczność użytych środków gaśniczych oraz ewentualne problemy napotkane podczas akcji.
2. Szkolenia: analiza przeprowadzonej akcji i wnioski do dalszych szkoleń i przygotowań jednostki straży pożarnej w kontekście pożarów związanych z nowoczesnymi technologiami energetycznymi.

³⁰ *European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders, Zalecenia dotyczące ogólnoeuropejskiego uznawania i kontynuacji szkoleń w zakresie bezpieczeństwa wodorowego dla ratowników*, <https://ctif.org/commissions-and-groups/hyresponder-european-hydrogen-train-trainer-programme-responders> [dostęp: 24.07.2024].

Działania straży pożarnej w przypadku pożaru elementów elektrycznych w instalacji FCH muszą być precyzyjnie zaplanowane i realizowane z najwyższą ostrożnością, ze względu na specyficzne i niebezpieczne właściwości materiałów i technologii zaangażowanych w takie incydenty.

10.5.3. Rodzaj zdarzenia: pożar zewnętrzny zagrażający instalacji FCH

W przypadku pożaru zewnętrznego zagrażającego instalacji FCH (instalacji związanej z wodorem i ogniwami paliwowymi), straż pożarna powinna podjąć szereg działań mających na celu zapewnienie bezpieczeństwa, zminimalizowanie ryzyka eksplozji oraz skuteczne ugaszenie pożaru.

I. Ocena sytuacji/rozpoznanie w CPR / SKKM/P

1. Pozyskać możliwe i istotne dla zdarzenia informacje od osoby/osób zgłaszających.
2. Ustalić i zadysponować na miejsce zdarzenia jednostki ratownicze zgodnie z użytymi informacjami i planem ratowniczym (IBP).
3. Ustalić optymalną trasę dojazdu, uwzględniając warunki atmosferyczne, w tym kierunek wiatru.
4. Informować załogę o potencjalnych zagrożeniach, takich jak wybuchy, emisje toksycznych gazów czy ryzyko porażenia prądem.
5. Po dotarciu na miejsce zdarzenia zatrzymać pojazd pożarniczy 150 m przed miejscem zdarzenia.

II. Działania po przybyciu na miejsce zdarzenia

1. Dokonać szybkiej oceny sytuacji:
 - strefa zagrożenia: ustalenie i oznaczenie strefy zagrożenia, w celu zminimalizowania ryzyka dla ratowników i osób postronnych,
 - informacje techniczne: konsultacja z personelem technicznym w celu uzyskania szczegółowych informacji na temat instalacji, z której może mieć miejsce wyciek wodoru, a także lokalizacji elementów elektrycznych oraz baterii.
2. Izolacja obszaru:
 - wyznaczenie i zabezpieczenie strefy zagrożenia, aby odciąć dostęp dla osób postronnych,
 - ewakuacja osób znajdujących się w wyznaczonej strefie zagrożenia.
3. Ocenić niebezpieczeństwo dla ratowników i dla osób postronnych.

III. Zabezpieczenie miejsca zdarzenia

Zabezpieczenie miejsca zdarzenia należy przeprowadzić w następujący sposób:

1. Zapewnić bezpieczną strefę wokół miejsca wycieku, ewakuować ludzi ze strefy zagrożenia.
2. Jeśli to konieczne przeprowadzić ewakuację ratunkową.
3. Udzielić pierwszej pomocy poszkodowanym.
4. Wezwać wsparcie medyczne, przeprowadzić segregację medyczną poszkodowanych, jeśli to konieczne.
5. Użyć kurtyn wodnych w celu chłodzenia instalacji i ochrony przed oddziaływaniem ciepła na zbiorniki z wodorem lub ogniwa paliwowe.
6. Prowadzić stały monitoring temperatury instalacji.

IV. Działania gaśnicze

1. Środki gaśnicze: stosować odpowiednie środki gaśnicze:
 - do pożarów urządzeń elektrycznych: środki gaśnicze przeznaczone do pożarów klasy C, takie jak proszki gaśnicze, dwutlenek węgla (CO₂), suche chemiczne gaśnice,
 - do pożarów baterii litowych: woda w kontrolowanych ilościach może być używana do chłodzenia baterii litowych, ale nie do gaszenia. Inne środki mogą obejmować specjalistyczne gaśnice do baterii litowych.
2. Zabezpieczenie przed wodorem: jeśli wykorzystywana jest woda, unikanie kontaktu z obszarami, gdzie może być uwalniany wodór, aby zminimalizować ryzyko wybuchu.
3. Chłodzenie:
 - chłodzenie elementów: chłodzenie elementów sąsiadujących z instalacją, aby zapobiec rozprzestrzenianiu się pożaru i eksplozji baterii,
 - monitorowanie temperatury: ciągle monitorowanie temperatury w celu oceny ryzyka ponownego zapłonu.
4. Wentylacja:
 - zapewnić wentylację: wykorzystanie wentylacji do usuwania dymu i gazów toksycznych, w tym wodoru, w celu zminimalizowania ryzyka wybuchu i poprawienia widoczności dla ratowników.

V. Po ugaszeniu pożaru³¹

1. Kontrola i dogaszanie:
 - inspekcja: dokładna inspekcja miejsca zdarzenia w celu identyfikacji i ugaszenia wszelkich ukrytych zarzewi ognia,
 - chłodzenie baterii: dalsze chłodzenie baterii, aby zapobiec nagrzewaniu.
2. Bezpieczeństwo wtórne:
 - monitoring: kontynuowanie monitorowania obszaru przez pewien czas po ugaszeniu pożaru, aby upewnić się, że nie ma ryzyka ponownego wybuchu lub zapłonu,
 - dekontaminacja: usunięcie zanieczyszczeń chemicznych i toksycznych pozostałości po pożarze.
3. Wnioski i raport:
 - przegląd działań: przeprowadzenie analizy działań po zdarzeniu w celu wyciągnięcia wniosków i poprawy procedur do przyszłych działań.

10.5.4 Rodzaj zdarzenia: wyciek wodoru z zapłonem

I. Ocena sytuacji/rozpoznanie w CPR / SKKM/P

1. Pozyskać możliwe i istotne dla zdarzenia informacje od osoby/osób zgłaszających.
2. Ustalić i zadysponować na miejsce zdarzenia jednostki ratownicze zgodnie z uzyskanymi informacjami i planem ratowniczym (IBP).
3. Ustalić optymalną trasę dojazdu, uwzględniając warunki atmosferyczne, w tym kierunek wiatru.
4. Informować załogę o potencjalnych zagrożeniach, takich jak możliwe wybuchy, emisje toksycznych gazów czy ryzyko porażenia prądem.
5. Po dotarciu na miejsce zdarzenia zatrzymać pojazdy pożarnicze 150 m przed miejscem zdarzenia.
6. Przewidzieć konieczność użycia hydrantu.

II. Działania po przybyciu na miejsce zdarzenia

Po przybyciu na miejsce zdarzenia należy:

1. Dokonać szybkiej oceny sytuacji:
 - ustalić i oznaczyć strefę zagrożenia, aby zminimalizować ryzyko dla ratowników i osób postronnych,

³¹ European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders, Zalecenia dotyczące ogólnoeuropejskiego uznawania i kontynuacji szkoleń w zakresie bezpieczeństwa wodorowego dla ratowników, <https://ctif.org/commissions-and-groups/hyresponder-european-hydrogen-train-trainer-programme-responders> [dostęp: 24.07.2024].

- ustalić w drodze rozpoznania:
 - czy ktoś jest zagrożony przez pożar?
 - ile pojazdów jest objętych pożarem?
 - ile z tych pojazdów jest zasilanych wodorem lub innym sprężonym gazem (CNG, LPG)?
 - czy przed przybyciem jednostek ratowniczych słychać było głośny syczący dźwięk?
 - gdzie w pojeździe może być zlokalizowany zawór TPRD?
 - czy TPRD aktywował się? Czy wytwarza się płomień?
 - zażądać dodatkowego wsparcia, jeśli to konieczne,
 - zidentyfikować rodzaj napędu pojazdów.
- 2. Izolacja obszaru:
 - wyznaczenie i zabezpieczenie strefy zagrożenia, aby uniknąć dostępu osób postronnych (w przypadku autobusu utworzyć strefę bezpieczeństwa dla osób >200 m),
 - ewakuacja osób znajdujących się w wyznaczonej strefie zagrożenia.
- 3. Ocenić zagrożenie dla ratowników i osób postronnych.

III. Zabezpieczenie miejsca zdarzenia

1. Zabezpieczyć strefę zagrożenia przed dostępem osób postronnych.
2. Ewakuować osoby ze strefy zagrożenia, jeśli to konieczne przeprowadzić ewakuację ratunkową.
3. Udzielić pierwszej pomocy poszkodowanym.
4. Wezwać wsparcie medyczne, przeprowadzić segregację medyczną osób poszkodowanych, jeśli to konieczne.
5. Użyć kurtyn wodnych w celu chłodzenia instalacji i zapobiegnięcia przegrzaniu się zbiorników z wodorem lub ogniw paliwowych.
6. Prowadzić stały monitoring temperatury instalacji.

IV. Działania ratownicze

Jeśli człowiek jest zagrożony przez pożar:

1. Rota 1: wydobyć ofiarę (ofiary) ze strefy zagrożenia wszelkimi możliwymi sposobami. Ratownicy powinni być wyposażeni w SOUO.
2. Rota 2: rozwinąć linię gaśniczą, aby zabezpieczyć działania roty 1 prowadzącej ewakuację osób zagrożonych, w kierunku pod wiatr lub w najgorszym wypadku jak najdalej w kierunku wiatru.

V. Działania gaśnicze

1. Środki gaśnicze: stosować odpowiednie środki gaśnicze:
 - do pożarów urządzeń elektrycznych: środki gaśnicze przeznaczone do pożarów klasy C, takie jak proszki gaśnicze, dwutlenek węgla (CO_2), suche chemiczne gaśnice,
 - do pożarów baterii litowych: woda w kontrolowanych ilościach może być używana do chłodzenia baterii litowych, ale nie do gaszenia. Inne środki mogą obejmować specjalistyczne gaśnice do baterii litowych.
2. Zabezpieczenie przed wodorem: jeśli woda jest stosowana, unikanie kontaktu z obszarami, gdzie może być uwalniany wodór, aby zminimalizować ryzyko wybuchu.
3. Chłodzenie:
 - chłodzenie elementów: chłodzenie elementów sąsiadujących z instalacją, aby zapobiec rozprzestrzenianiu się pożaru i eksplozji baterii,
 - monitorowanie temperatury: ciągle monitorowanie temperatury w celu oceny ryzyka ponownego zapłonu.

VI. Ochrona przed narażeniem

1. Używaj tylko niezbędnego personelu.
2. Ewakuuj przyległe budynki.
3. Zapobiegaj rozprzestrzenianiu się pożaru na inne pojazd(y) lub budynek(i).
4. Przenieś sąsiednie, nieobjęte pożarem pojazdy w dowolny sposób (jazda, holowanie, pchanie itp.) w bezpieczne miejsce.
5. Jeśli pojazd znajduje się w budynku, zapobiegaj gromadzeniu się gazów spalinyowych i H_2 poprzez intensywne wentylowanie budynku.
6. Jeśli to możliwe i bezpieczne:
 - otwórz drzwi i maski (jeśli występują),
 - zaciągnij hamulec ręczny,
 - podłóż kliny w celu zabezpieczenia pojazdu przed stoczeniem się,
 - wyłącz kluczyk zapłonu (podczas gaszenia należy pamiętać o wysokim napięciu),
 - wciśnij urządzenie awaryjnego wyłączenia ogniwa paliwowego (autobusy i wózki widłowe). W autobusach urządzenie awaryjnego wyłączenia znajduje się zazwyczaj w pobliżu siedzenia kierowcy po lewej stronie, a drugie znajduje się na ogniwie paliwowym w komorze „silnikowej”, w tylnej części autobusu.
7. Wielokrotnie sprawdzaj obecność H_2 w atmosferze (środek zapobiegawczy).
8. Aktualizuj obszar bezpieczeństwa.
9. Wielokrotnie sprawdzaj temperaturę zbiorników H_2 za pomocą urządzenia termowizyjnego.

10. W przypadku sytuacji o wysokim poziomie zagrożenia:
 - przeprowadź intensywne natarcie gaśnicze,
 - każda rota powinna przygotować 80-metrową linię gaśniczą podłączoną do autopompy, rota 1 ma za zadanie schłodzenie zbiornika z H₂, zapobiegnie to uruchomieniu się TPRD, rota 2 ma na celu ugaszenie pożaru pojazdu.
11. Oceń możliwość dopuszczenia do bezpiecznego spalenia pojazdu – stosuj, gdy zawiodą inne metody.

VII. Po ugaszeniu pożaru³²

1. Kontrola i dogaszanie:
 - inspekcja: dokładna inspekcja miejsca zdarzenia w celu identyfikacji i ugaszenia wszelkich ukrytych zarzewi ognia,
 - chłodzenie baterii: dalsze chłodzenie baterii, aby zapobiec nagrzewaniu się.
2. Bezpieczeństwo wtórne:
 - monitoring: kontynuowanie monitorowania obszaru przez pewien czas po ugaszeniu pożaru, aby upewnić się, że nie ma ryzyka ponownego wybuchu lub zapłonu,
 - dekontaminacja: usunięcie zanieczyszczeń chemicznych i toksycznych pozostałości po pożarze.
3. Wnioski i informacja ze zdarzenia:
 - przeprowadzenie analizy działań po zdarzeniu w celu wyciągnięcia wniosków i poprawy procedur do przyszłych działań.

Ratowanie człowieka jest zawsze priorytetem ratowniczym!!!

³² *European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders, Zalecenia dotyczące ogólnoeuropejskiego uznawania i kontynuacji szkoleń w zakresie bezpieczeństwa wodorowego dla ratowników*, <https://ctif.org/commissions-and-groups/hyresponder-european-hydrogen-train-trainer-programme-responders> [dostęp: 24.07.2024].

Zakończenie

W powyższej, głównej części publikacji, przedstawione zostały najważniejsze informacje, które mogą być przydatne ratownikom KSRG podczas prowadzenia działań, w których występuje zagrożenie wodorowe. Na wstępie zaznaczono już, że wodór – ze względu na swoje unikalne właściwości chemiczne i fizyczne – ma szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu. Jesteśmy jednym z jego wiodących producentów (trzecie miejsce w Europie i piąte na świecie). Rosnący potencjał wykorzystania wodoru we wszystkich formach transportu, a także w gospodarstwach domowych, będzie skutkowało większą liczbą zdarzeń wymagających interwencji służb ratowniczych. Co ważne – dotyczyć to będzie wszystkich jednostek KSRG.

Aby być dobrze przygotowanym do takich działań, nie wystarczy wiedza zawarta w tej publikacji ani na stronach internetowych, do których znajdują się tu odwołania (linki oraz kody QR w załączniku 4). Niezbędne będą także odpowiednie szkolenia praktyczne.

Cenne i obszerne zalecenia opracowane przez autorów projektu HyResponder w tym zakresie, kierowane do wszystkich odpowiedzialnych za szkolenie pożarnicze w krajach EU, są zawarte w opracowaniu pt. *European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders, Recommendations on the Pan-European Recognition and Continuation of Hydrogen Safety Training for Responders* pod kierunkiem Dennisa Davisa (CTIF) wydanym w maju 2023 roku.

Załącznik 1.

Transport wodoru

Wodór jest wykorzystywany w przemyśle już przez wiele dziesięcioleci. Po wyprodukowaniu w zakładzie jest dostarczany do użytkowników końcowych lub odbiorców indywidualnych, gdzie znajduje odpowiednie zastosowania do ogniw paliwowych. Wodór może być transportowany w postaci sprężonego gazu lub cieczy kriogenicznej. W związku z tym istnieje wiele sposobów jego masowego transportu: drogami w ciężarówkach/przyczepach i kontenerach lub rurociągami.

Transport wodoru gazowego samochodami ciężarowymi

Aktualnie floty samochodów ciężarowych są często wykorzystywane przez firmy zajmujące się gazem przemysłowym do transportu sprężonego wodoru gazowego (CGH_2) na krótkie odległości, zazwyczaj w granicach 200–300 km od centralnych zakładów produkcyjnych. Transport odbywa się za pomocą różnych typów naczep, na których instalowane są butle, wiązki wielocylindrowe lub długie cylindryczne rury, zależnie od potrzeb.

Wodór przechowywany w butlach jest przewożony pod ciśnieniem od 200 do 300 barów, a przyczepy mogą pomieścić od 2000 do 6200 Nm^3 CGH_2 , z zachowaniem ograniczenia masy do 40 ton. W odniesieniu do całkowitej masy ciężarówki ilość wodoru jest jednak niewielka (wynosi 1–2%, od 180 do 540 kg). Obecnie wykorzystywane naczepy zwykle opierają się na stalowych zbiornikach typu I, choć możliwe jest przejście na lżejsze kompozytowe cylindry lub rury typu II w celu zwiększenia wydajności przewozu.

Transport wodoru samochodami ciężarowymi ma swoje ograniczenia, do których należą: wysokie koszty operacyjne i konserwacji, niska pojemność magazynowa oraz potrzeba dodatkowego sprężania wodoru na stacjach tankowania, co dodatkowo zwiększa koszty. Dlatego badane są nowe rozwiązania, takie jak butle kompozytowe o większej pojemności czy też technologie hybrydowe. Mają one pozwolić na zwiększenie pojemności magazynowej, obniżenie kosztów operacyjnych oraz poprawę efektywności transportu wodoru samochodami ciężarowymi. Jednocześnie stosowane są rygorystyczne procedury i urządzenia zapewniające bezpieczeństwo podczas transportu i obsługi wodoru.

Transport ciekłego wodoru samochodami ciężarowymi

Wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na wodór w roli nośnika energii, coraz większą uwagę zwraca się na nowe metody jego transportu, w tym w postaci ciekłej. Ciężarówki przystosowane do przewozu ciekłego wodoru (LH₂) mają zdolność przewożenia znacznie większych ilości w porównaniu do naczip rurowych używanych do transportu wodoru sprężonego. Dzięki temu stanowią preferowaną metodę dystrybucji średnich i dużych ilości wodoru na długie dystanse.

Transport wodoru koleją

Wraz z rozwojem technologii pociągów napędzanych ogniwami paliwowymi, coraz większy nacisk kładzie się na skuteczne dostarczanie wodoru do stacji tankowania tych pojazdów. Jedną z potencjalnych dróg jest transport wodoru koleją. Precyzyjne planowanie czasu przewozu, wysoki poziom niezawodności i bezpieczeństwa, możliwość transportu dużych ilości towaru oraz redukcja ruchu drogowego to główne korzyści tej formy transportu.



Ryc. 30. Wagony kolejowe transportujące wodór

Źródło: HyResponder_D1_1_H2-system-and-safety-features_Final-21122021.

Transport kolejowy wodoru skroplonego – w porównaniu z innymi metodami transportu, takimi jak transport drogowy lub lotniczy – ma następujące zalety:

1. **Bezpieczeństwo:** cysterny kriogeniczne są zaprojektowane tak, aby wytrzymać wysokie ciśnienie i ekstremalne temperatury, co minimalizuje ryzyko wycieków lub wybuchów.
2. **Wydajność:** pociągi mogą transportować duże ilości wodoru skroplonego jednocześnie, co czyni je bardziej wydajną metodą transportu niż mniejsze pojazdy.

3. **Przyjazność dla środowiska:** transport kolejowy jest bardziej przyjazny dla środowiska niż transport drogowy, ponieważ generuje mniej emisji gazów cieplarnianych. Problemy związane z transportem kolejowym wodoru skroplonego to głównie:

1. **Koszty:** budowa i utrzymanie cystern kriogenicznych oraz infrastruktury kolejowej może być kosztowne.
2. **Infrastruktura:** do transportu wodoru skroplonego koleją potrzebna jest specjalna infrastruktura, taka jak terminale przeładunkowe i tory przystosowane do obsługi cystern kriogenicznych.
3. **Kwestie bezpieczeństwa:** chociaż transport kolejowy wodoru skroplonego jest ogólnie bezpieczny, należy przestrzegać ścisłych procedur bezpieczeństwa, aby zminimalizować ryzyko wypadków.

Mimo tych wyzwań transport kolejowy wodoru skroplonego odgrywa coraz ważniejszą rolę w łańcuchu dostaw wodoru. Wraz z rosnącym zapotrzebowaniem na wodór jako czyste źródło energii, transport kolejowy prawdopodobnie będzie nadal odgrywać kluczową rolę w bezpiecznym i efektywnym transporcie tego gazu. W Europie wodór skroplony jest transportowany koleją przez kraje, takie jak: Francja, Niemcy, Polska i Hiszpania.

Transport wodoru rurociągami

Rurociągi wodorowe stanowią kluczowy element infrastruktury służącej do dystrybucji dużych ilości wodoru gazowego na rynek przemysłowy. Obecnie szacuje się, że sieci rurociągów wodorowych mają około 1600 km w Europie i 1100 km w Ameryce Północnej. Polska Strategia Wodorowa zakłada, że do 2030 roku powstanie w Polsce sieć dystrybucji zielonego wodoru o łącznej długości 1000 kilometrów. Sieć ta będzie składać się z rurociągów, stacji magazynowania i punktów tankowania. Niezależnie od sieci rurociągów niezbędne jest rozprowadzanie wodoru do powstających stacji tankowania wodoru. Te użytkowane są przez właścicieli pojazdów osobowych, autobusów, samochodów ciężarowych, ale także innych odbiorców, których liczba będzie szybko rosła.

Magazynowanie wodoru

W dziedzinie zastosowań ogniwi paliwowych i wodoru (FCH) istotne jest także jego przechowywanie, które musi spełniać różnorodne potrzeby, począwszy od pojazdów osobowych, po instalacje stacjonarne i przenośne źródła energii. Nie ma jeszcze jednego uniwersalnego sposobu przechowywania wodoru. Wybór technologii musi być starannie dostosowany do określonych wymagań systemowych. Na przykład, dla samochodów osobowych z ogniwami paliwowymi istotne są przestrzeń i masa, podczas gdy dla

wózków widłowych z ogniwami paliwowymi, czy obiektach pływających, masa może być kluczowym aspektem.

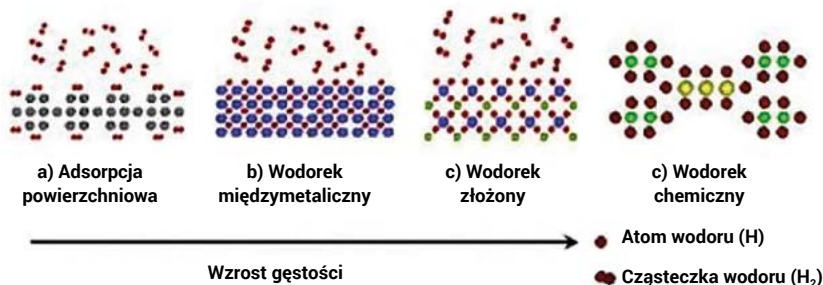
Wodór jest gazem o bardzo niskiej gęstości (0,09 g/l przy 288 K i 1 bar), co sprawia, że ma wysoką gęstość energii w jednostce masy, ale niską zawartość energii objętościowo w porównaniu do innych paliw.

Magazynowanie dużych ilości wodoru przez długi okres jest kluczowym etapem budowy infrastruktury FCH, która będzie regulować zużycie i produkcję wodoru oraz zapewni ciągłość jego dostaw do klientów. Badane są różne systemy podziemnego składowania wodoru w strukturach geologicznych, takich jak wyeksploatowane złoża gazu, warstwy wodonośne lub jaskinie solne. Inną opcją jest składowanie tego paliwa w zbiornikach zakopanych pod ziemią, w postaci sprężonego gazu lub w postaci ciekłej. Składowanie geologiczne jest zwykle zlokalizowane w pobliżu miejsca produkcji wodoru, natomiast zbiorniki podziemne są bliżej miejsca użytkowania, na przykład stacji paliw.

Dostępne są liczne technologie magazynowania wodoru, które można podzielić na następujące grupy:

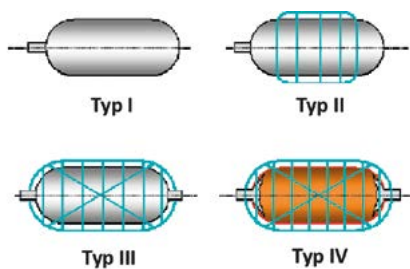
- magazynowanie sprężonego gazu,
- składowanie skroplone,
- składowanie stałe.

Najpopularniejszym sposobem przechowywania wodoru w postaci sprężonego gazu lub cieczy kriogenicznej są metalowe lub kompozytowe butle lub zbiorniki. Inną użyteczną alternatywą jest technologia kriokompresji, w której gazowy wodór pod wysokim ciśnieniem schładza się do niskich temperatur. Butle mogą mieć różne rozmiary, pojemności (20–300 l) i ciśnienie (20–70 MPa), a w niektórych zastosowaniach mogą być połączone w wiązkę lub zebrane w koszu do transportu.



Ryc. 31. Przechowywanie wodoru w strukturze lub na powierzchni niektórych materiałów stałych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie HyResponder_D1_1_H2-system-and-safety-features_Final-21122021 oraz <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/complex-hydride> i <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/chemical-hydride> [dostęp: 25.07.2024].



Ryc. 32. Rodzaje zbiorników wodoru do przechowywania sprężonego wodoru gazowego

Źródło: H. Barthelemy, *Hydrogen storage technologies: compatibility of materials with hydrogen*, w: *Teaching materials of the 4th ISCARW*, Corsica 2009.

Załącznik 2.

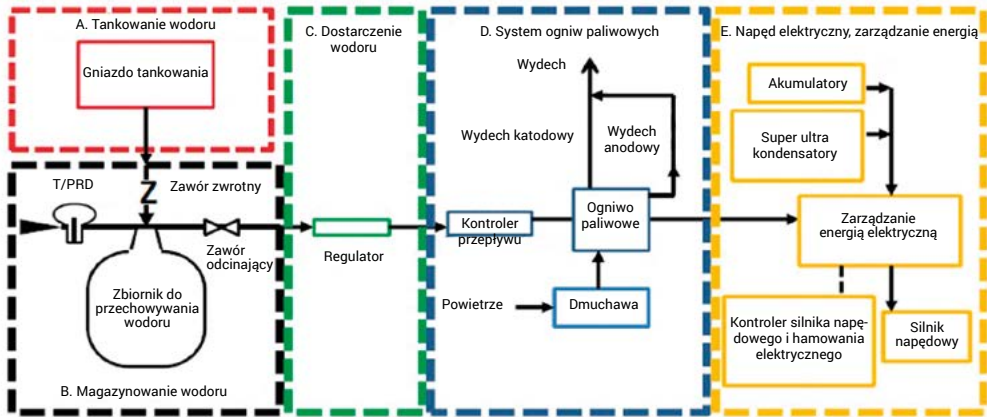
Zastosowanie wodoru w transporcie i logistyce (pojazdy, autobusy, lotnictwo, wózki widłowe)

Najważniejsze cechy pojazdów FC

Pojazdy FC mają elektryczny układ napędowy zasilany prądem z ogniwa paliwowego, które generuje energię elektryczną w reakcji elektrochemicznej z wodorem. Choć istnieje wiele prototypów pojazdów FC, większość z nich ma wspólne następujące systemy (zob. ryc. 33):

- tankowania wodoru,
- magazynowania wodoru,
- dostarczania paliwa wodorowego,
- FC,
- napędu elektrycznego,
- zarządzania energią.

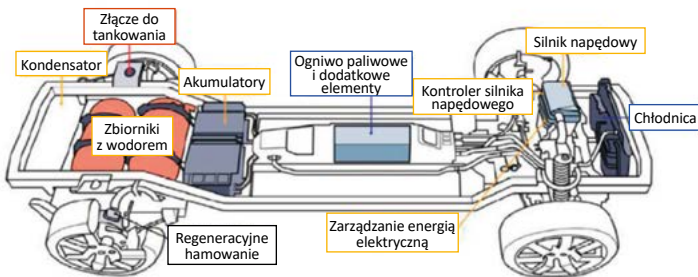
Podczas tankowania wódór jest dostarczany do pojazdu za pośrednictwem złącza tankowania (A), przez które wódór przepływa do układu magazynowania (B). Dostarczony wódór jest przechowywany w układzie magazynowania wodoru, zwykle w postaci sprężonego gazu. Po uruchomieniu pojazdu FC, gazowy wódór jest uwalniany z układu magazynowania. Regulatory ciśnienia i inne urządzenia w układzie dostarczania wodoru (C) redukują ciśnienie do poziomu odpowiedniego dla działania FC. Wódór jest elektrochemicznie łączony z tlenem w układzie FC (D) w celu wytworzenia energii elektrycznej o wysokim napięciu. Dalej energia elektryczna jest przekazywana do systemu zarządzania energią napędu elektrycznego (E), gdzie jest wykorzystywana do napędzania silników napędu elektrycznego lub ładowania akumulatorów i ultrakondensatorów.



Ryc. 33. Najważniejsze systemy pojazdu FC

Źródło: HyResponder_D1_1_H2-system-and-safety-features_Final-21122021.

Na rycinie niżej przedstawiono standardowe rozmieszczenie najważniejszych podzespołów typowego pojazdu FC. Zbiornik paliwa znajduje się w tylnej części pojazdu, podobnie jak w innych samochodach. Tak jak w przypadku zbiorników benzyny, zbiorniki wodoru są zwykle montowane poprzecznie z tyłu pojazdu, ale mogą być również montowane inaczej, np. wzdłuż środkowego tunelu pojazdu. Ogniwia paliwowe i akcesoria zazwyczaj znajdują się pod przedziałem pasażerskim wraz z układem zarządzania energią, kontrolerem silnika napędowego i silnikami napędowymi. Biorąc pod uwagę rozmiar i wagę akumulatorów trakcyjnych i ultrakondensatorów, komponenty te są zwykle umieszczone tak, aby utrzymać pożądaną równowagę masy, niezbędną do prawidłowego prowadzenia pojazdu. Wodór może być dostarczany do pojazdu na stacji tankowania. Obecnie najczęściej wodór tankowany jest w postaci sprężonego gazu pod ciśnieniem do 125% nominalnego ciśnienia roboczego pojazdu (NWP), aby skompensować tymczasowe nagrzewanie spowodowane sprężaniem adiabatycznym.



Ryc. 34. Przykład pojazdu z ogniwem paliwowym

Źródło: HyResponder_D1_1_H2-system-and-safety-features_Final-21122021.

System magazynowania wodoru w pojazdach

Kluczowymi funkcjami systemu magazynowania wodoru w pojazdach są:

- przyjmowanie wodoru podczas tankowania,
- przechowywanie go do czasu jego użycia,
- uwolnienie wodoru do układu FC w celu zasilania pojazdu.

Obecnie najpopularniejszą metodą przechowywania i dostarczania wodoru na pokładzie jest forma sprężonego gazu (CGH₂). Lekkie butle ze sprężonym gazem o ciśnieniu 700 barów zostały opracowane w celu zwiększenia pojemności magazynowej w pojazdach osobowych. Są one zbudowane z metalicznego (typ III) lub polimerowego (typ IV) wkładu umieszczonego w strukturze kompozytu wzmacnianego włóknem.

System dostarczania paliwa wodorowego

Układ zasilania paliwem wodorowym transportuje wodór z układu magazynowania do układu napędowego pod odpowiednim ciśnieniem i w temperaturze wymaganej do działania ogniwa paliwowego. Odbywa się to przez szereg zaworów sterujących przepływem, regulatorów ciśnienia, filtrów, przewodów paliwowych (rur) i wymienników ciepła. Większość przewodów paliwowych jest w kolorze srebrnym, ale zdarzają się również czerwone. Jeśli zbiornik zostanie zamknięty z powodu incydentu, w przewodach pozostanie niewielka ilość wodoru. Dlatego też służby ratunkowe nie powinny przecinać przewodów paliwowych podczas procedur wydobywania osób zagrożonych¹.

Napęd elektryczny i system zarządzania energią

Energia elektryczna generowana przez system FC (stos FC) jest wykorzystywana do napędu silników elektrycznych, które napędzają pojazd oraz do zasilania silnika pompy powietrza i silnika klimatyzacji. Wiele samochodów osobowych FC ma napęd na przednie koła, z elektrycznym silnikiem napędowym i układem napędowym zamontowanym w komorze silnika po drugiej stronie przedniej osi. Możliwe są jednak również inne konfiguracje i napęd na tylne koła. Większe samochody typu SUV z ogniwem paliwowym mogą być napędzane na cztery koła silnikami elektrycznymi na przedniej i tylnej osi lub z kompaktowymi silnikami w każdym z kół. Bateria o wysokim napięciu zazwyczaj jest umieszczana w metalowej obudowie i jest na stałe przymocowana do ramy. W pojaz-

¹ Bezpieczne wykorzystanie wodoru jako paliwa w komercyjnych zastosowaniach przemysłowych, Polski Rejestr Statków S.A., Gdańsk 2021.

dach FC mogą być zastosowane różne rodzaje baterii, np. niklowo-metalowo-wodorowe lub litowo-jonowe. Inne komponenty wysokiego napięcia mogą obejmować regulator FC, regulator napięcia akumulatora, przetwornicę DC-DC, jednostkę napędową i grzałkę elektryczną. Prąd ze stosu FC i akumulatora wysokonapięciowego jest dostarczany kablami do silników, które zwykle znajdują się pod lub za pojazdem w zamkniętych komponentach wysokonapięciowych. Można je łatwo zidentyfikować dzięki charakterystycznym pomarańczowym osłonom ochronnym.

Autobusy z napędem ogniwoami paliwowymi (FC)

Autobusy FC korzystające z technologii ogniwo paliwowych opierają się na tych samych zasadach, co samochody osobowe.

Wodór przechowywany jest w zbiornikach na dachu autobusu, o łącznej pojemności około 40 kilogramów, podczas gdy stos ogniwo paliwowych umieszczony jest zazwyczaj w tylnej komorze silnika. W porównaniu z pojazdami FC, autobusy takie mają większe stosy ogniwo, generujące wyższe napięcie wynoszące około 600 V. Główne zalety autobusów z napędem wodorowym obejmują mniejsze zanieczyszczenie, niższe stężenie gazów cieplarnianych, wyższą wydajność energetyczną i cichszą pracę.

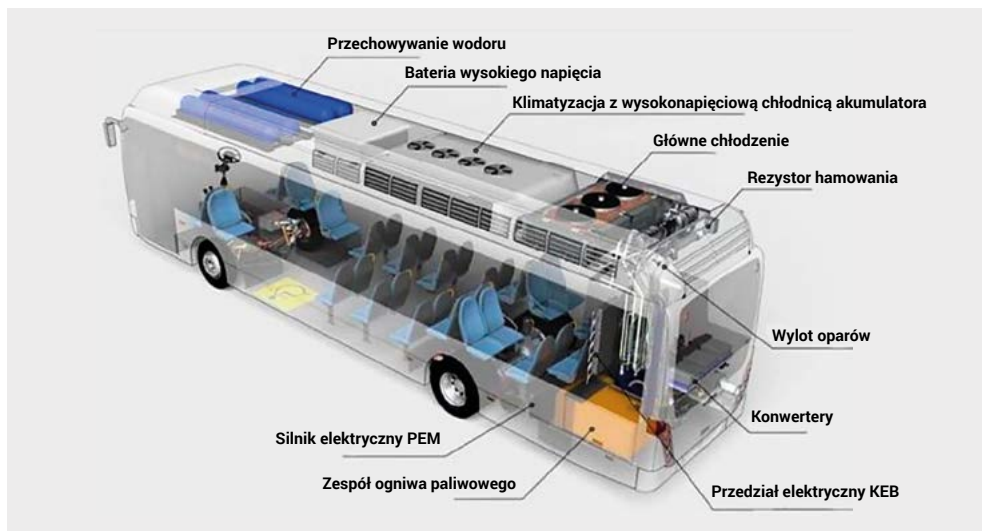


Ryc. 35. Autobus z napędem wodorowym w Poznaniu, gdzie użytkowanych jest już ponad 20 autobusów z takim napędem

Źródło: Archiwum S. Sowa.

Autobusy FC, ewoluując przez lata, korzystały z różnych konfiguracji projektowych, technologii ogniwo paliwowych i układów napędowych. Na rycinie 36 przedstawiono układ autobusu FC, w którym wodór jest przechowywany jako sprężony gaz (CGH_2).

Optymalne ciśnienie przechowywania wodoru dla nieprzegubowych jednopokładowych autobusów miejskich wynosi od 20 do 35 MPa. Bezpieczeństwo jest kluczowym zagadnieniem związanym z pojazdami FC, biorąc pod uwagę wysokie napięcie i ciśnienie gazu. Systemy zabezpieczające, takie jak ciśnieniowy zawór bezpieczeństwa (PRD) oraz aktywowane termicznie nadciśnieniowe urządzenia zabezpieczające (TPRD), są kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa w przypadku awarii.



Ryc. 36. Układ głównych komponentów w autobusie FC

Źródło: HyResponder_D1_1_H2-system-and-safety-features_Final-21122021.

Osoby udzielające pierwszej pomocy muszą być świadome zagrożeń związanych z wysokim napięciem i ciśnieniem gazu w pojazdach FC. Kluczowymi elementami dla zapewnienia bezpieczeństwa w przypadku wypadków drogowych jest odpowiednie oznakowanie pojazdów oraz dostępność kart ratunkowych. Konieczne jest także przekazywanie informacji o parametrach pojazdu osobom udzielającym pierwszej pomocy, aby umożliwić im odpowiednie działania w sytuacjach krytycznych.

Lotnictwo

Wodór jest wykorzystywany jako paliwo zamiast nafty w dużych samolotach lub źródło energii dla ogniw paliwowych PEM w małych samolotach śmigłowych. Jest to jedno z wielu podejść w kierunku dekarbonizacji i zrównoważonego rozwoju w przemyśle lotniczym, które ma na celu zmniejszenie jego wpływu na środowisko naturalne.

Wózki widłowe zasilane ogniwami paliwowymi (FC)

Wiele firm posiadających magazyn lub centra dystrybucyjne coraz częściej stosuje wózki widłowe zasilane ogniwami paliwowymi (FC). Wózki te, będące hybrydami, łączą w sobie ogniwa paliwowe o mocy od 1,5 do 10 kW z akumulatorem. Przechowywanie wodoru odbywa się poza obiektem, a samo tankowanie wodoru może być przeprowadzane w pomieszczeniach lub z zewnętrznych dystrybutorów. W porównaniu do tradycyjnych wózków widłowych zasilanych bateriami, wózki FC oferują dłuższą żywotność, większą moc i szybsze tankowanie, co przekłada się na niższe koszty operacyjne i zwiększoną produktywność poprzez mniejszą liczbę postojów na stanowiskach do ładowania. Ponadto brak potrzeby ładowania akumulatorów oraz przechowywania czy wymiany ich pozwala na zaoszczędzenie większej przestrzeni magazynowej.

Bezpieczeństwo zbiornika wodoru jest zapewnione przez różne zabezpieczenia, takie jak TPRD (zabezpieczenie termiczne) i zawór zwrotny, a także przez żeliwną obudowę, która chroni wszystkie elementy FC przed uszkodzeniami mechanicznymi i termicznymi.

Inne zastosowania wodoru

Systemy skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej (CHP)

Tradycyjne metody wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, oparte głównie na spalaniu gazu ziemnego w silnikach spalinowych lub turbinach, zostały poddane rewolucji dzięki nowoczesnym technologiom. W ramach systemów CHP (ang. *combined heat and power*) opartych na ogniwach paliwowych energia elektryczna jest produkowana w procesach elektrochemicznych, a ciepło jest skutkiem ubocznym tych procesów. Obejmuje to dwie główne technologie ogniw paliwowych: ogniwa paliwowe ze stałym tlenkiem (ang. *solid oxide fuel cell*, SOFC) oraz z polimerowym elektrolitem (ang. *polymer electrolyte fuel cell*, PEM FC). W obu przypadkach – w celu uzyskania wodoru wykorzystywanego w procesie generowania energii w ogniwach paliwowych – przetwarzany jest gaz ziemny.

Wytwarzanie energii elektrycznej w sytuacjach awaryjnych

Jednym z kluczowych zastosowań nowoczesnych technologii CHP opartych na ogniwach paliwowych jest zapewnienie zasilania awaryjnego w przypadku przerw w dostawie energii. Instalacje te charakteryzują się mocą od 16 do 80 kW i mogą być wyposażone w maksymalnie dziewięć butli wodoru. Główne zalety tego rodzaju rozwiązań obejmują wysoką niezawodność, szybki rozruch, skalowalną autonomię oraz niskie koszty utrzymania. Ponadto praca

tych systemów jest czysta i cicha, co czyni je atrakcyjnymi dla wielu sektorów, w tym telekomunikacji, centrów danych, szpitali, wojska, przemysłu czy luksusowych hoteli.

System o mocy 30 kW, zainstalowany w 2008 roku, jest pierwszym tego typu rozwiązaniem kontenerowym. Dzięki wewnętrznemu magazynowi gazu może działać przez około 4 godziny.

Bezpieczeństwo systemu zasilania awaryjnego FC jest krytyczne, zwłaszcza ze względu na obecność wodoru, substancji łatwopalnej i wybuchowej. Aby zapewnić bezpieczną eksploatację, zastosowano szereg środków zapobiegawczych i procedur, obejmujących m.in.:

- separację przewodów odprowadzających tlen i wodór, aby uniknąć mieszania się gazów;
- wykorzystanie czujników wodoru, które w przypadku wykrycia nieprawidłowego stężenia mogą uruchomić procedury awaryjne;
- stałe monitorowanie stężenia wodoru nawet w trybie gotowości systemu;
- wyposażenie zbiorników w czujniki przeciwpożarowe i środki izolacyjne w razie potrzeby.

Ogólnie rzecz biorąc, projektowanie i eksploatacja systemów zasilania awaryjnego FC wymagają ścisłego przestrzegania procedur bezpieczeństwa oraz stosowania odpowiednich technologii i materiałów, aby minimalizować ryzyko awarii i zapewnić niezawodność działania nawet w najbardziej krytycznych sytuacjach.

Poniżej pokazano przykład agregatu prądotwórczego zasilanego ogniwami paliwowymi.



Ryc. 37. Przykład mobilnego agregatu energii z wodorowymi ogniwami paliwowymi jednego z producentów

Źródło: <https://www.efoy-pro.com/> [dostęp: 01.10.2024].

Zasilanie wodorem dla zastosowań mobilnych i półstacjonarnych jest możliwe dzięki mobilnemu generatorowi energii z wodorowymi ogniwami paliwowymi. Takie agregaty wykorzystywane są w obszarach bez dostępu do konwencjonalnej sieci energetycznej, np. na placach budowy, podczas imprez plenerowych, do tymczasowego zasilania masztów telekomunikacyjnych lub jako mobilne zasilanie awaryjne w przypadku

poważnych awarii. Opcjonalnie można go również skonfigurować jako mobilny system zasilania awaryjnego bez konieczności posiadania fundamentów lub pozwolenia na budowę. Dzięki mocy szczytowej do 20 kW agregat taki może być wykorzystywany w wielu obszarach, takich jak:

- budownictwo i inżynieria lądowa,
- zasilanie awaryjne infrastruktury krytycznej,
- budowa i konserwacja dróg,
- organizacja pomocy technicznej,
- przemysł eventowy i filmowy,
- przemysł leśny,
- wojsko.

Załącznik 3.

Strategia bezpieczeństwa wodorowego

Strategia bezpieczeństwa wodorowego jest kluczowa przy wprowadzaniu wodoru jako nośnika energii, zwłaszcza w kontekście jego zastosowań w transporcie, przemyśle i energetyce. Wodór, choć oferuje znaczące korzyści związane z redukcją emisji dwutlenku węgla, jest także wysoce palny i wymaga szczególnej ostrożności przy przechowywaniu, transporcie i wykorzystaniu. Poniżej przedstawiono kilka podstawowych elementów, które powinna zawierać strategia bezpieczeństwa wodorowego.

Planowanie przed wystąpieniem awarii

1. **Przestrzeganie norm i regulacji:** ważne jest przestrzeganie istniejących norm bezpieczeństwa i regulacji dotyczących wodoru, w tym standardów odnoszących się do instalacji, obsługi i transportu.
2. **Szkolenia i edukacja:** personel pracujący z wodorem powinien być odpowiednio przeszkolony w zakresie właściwości tego gazu, związanych z nim potencjalnych zagrożeń oraz procedur postępowania awaryjnego.
3. **Zapobieganie wyciekom:** systemy wodorowe powinny być projektowane i utrzymywane tak, aby minimalizować ryzyko wycieków. Wycieki wodoru, ze względu na jego niewidoczność i łatwopalność, mogą być trudne do wykrycia. Dlatego też stosowanie systemów wykrywania wycieków jest niezbędne.
4. **Zarządzanie ryzykiem i analiza zagrożeń:** przed wprowadzeniem systemów wodorowych powinna zostać przeprowadzona szczegółowa analiza ryzyka, która pomoże w identyfikacji potencjalnych zagrożeń i opracowaniu metod ich minimalizacji.
5. **Bezpieczne przechowywanie:** wodór powinien być przechowywany w odpowiednio zaprojektowanych zbiornikach, które mogą wytrzymać wysokie ciśnienia i są odporne na uszkodzenia zewnętrzne.
6. **Systemy wentylacyjne:** w pomieszczeniach, gdzie wodór jest używany lub prze-

chowywany, niezbędne jest zapewnienie skutecznej wentylacji, aby uniknąć akumulacji tego gazu i potencjalnego ryzyka wybuchu.

7. **Planowanie odpowiedzi awaryjnej:** instalacje wodorowe powinny być wyposażone w plany awaryjne, w tym procedury ewakuacji, odpowiedni sprzęt gaśniczy i środki pierwszej pomocy.
8. **Innowacje w technologii bezpieczeństwa:** stosowanie nowoczesnych technologii, takich jak inteligentne sensory i systemy zarządzania bezpieczeństwem, może znacząco poprawić bezpieczeństwo operacji związanych z wodorem.

Implementacja tych zasad i praktyk może znacznie przyczynić się do bezpiecznego i efektywnego wykorzystania wodoru jako zrównoważonego źródła energii, minimalizując jednocześnie potencjalne zagrożenia dla zdrowia i bezpieczeństwa.

Ocena zagrożenia wodorowego

Ocena zagrożenia wodorowego jest kluczowym elementem zarządzania ryzykiem przy używaniu wodoru jako nośnika energii. Wodór, mimo swoich zalet jako czyste paliwo, posiada właściwości, które mogą stanowić zagrożenie. Są to: wysoka palność, niewidoczność płomienia i tendencja do szybkiego rozprzestrzeniania się w przestrzeni. Oto kilka głównych aspektów, które należy uwzględnić w ocenie zagrożenia wodorowego:

1. Charakterystyka wodoru:

- wysoka palność: wodór zapala się przy niskim stężeniu w powietrzu (4–75% objętościowo), co oznacza, że może łatwo zapalić się nawet przy niewielkich wyciekach;
- niski próg zapłonu: wodór ma bardzo niską energię zapłonu, co oznacza, że może zapalić się od bardzo małej iskry lub nawet od statycznego ładunku elektrycznego;
- niewidoczny płomień: płomień wodoru jest prawie niewidoczny w świetle dziennym, co utrudnia wykrycie i skuteczne reagowanie na wczesnym etapie pożaru.

2. Sposoby przechowywania i transportu:

- ciśnieniowe zbiorniki: wodór jest przechowywany i transportowany w zbiornikach ciśnieniowych, co stwarza ryzyko wybuchu zbiornika w przypadku awarii;
- szczelność instalacji: nieszczelności mogą prowadzić do wycieków, które są trudne do wykrycia i mogą prowadzić do powstawania mieszanin wybuchowych i ich eksplozji.

3. Infrastruktura i wyposażenie:

- wykrywanie wycieków: instalacje wodorowe muszą być wyposażone w zaawansowane systemy wykrywania wycieków w potencjalnych miejscach ich wystąpienia oraz połączone z systemami alarmowymi;

- wentylacja: skuteczne systemy wentylacyjne są niezbędne w miejscach używania i przechowywania wodoru, aby zapobiegać akumulacji tego gazu;
- używanie materiałów odpornych na korozję i niskie temperatury w instalacjach wodorowych;
- stosowanie systemów uruchamiających wentylatory w razie wykrycia podwyższonego stężenia wodoru;
- instalacja redundantnych systemów detekcji, wentylacji i gaśniczych;
- zapewnienie zasilania awaryjnego dla kluczowych systemów bezpieczeństwa.

4. Procedury awaryjne:

- plany awaryjne: należy opracować i wdrożyć szczegółowe plany działania na wypadek pożaru czy innych incydentów z udziałem wodoru;
- szkolenie personelu: pracownicy powinni być regularnie szkoleni w zakresie procedur bezpieczeństwa i reagowania w przypadku awarii;
- umieszczanie tablic informacyjnych i oznaczeń w miejscach zagrożonych;
- regularne przeglądy i konserwacja instalacji, systemów detekcji i gaśniczych;
- regularne testowanie systemów alarmowych i ochronnych w warunkach symulowanych;
- ścisła współpraca z lokalnymi służbami ratunkowymi, strażą pożarną i służbami medycznymi;
- organizowanie wspólnych ćwiczeń awaryjnych z udziałem wszystkich zaangażowanych służb.

5. Analiza ryzyka:

- identyfikacja zagrożeń: regularna ocena i analiza potencjalnych zagrożeń są kluczowe;
- zarządzanie ryzykiem: opracowanie strategii zarządzania ryzykiem, w tym identyfikacja obszarów krytycznych, które wymagają dodatkowych środków bezpieczeństwa.

6. Normy prawne i regulacje

- przestrzeganie norm: instalacje wodorowe muszą spełniać lokalne, krajowe i międzynarodowe normy bezpieczeństwa i ochrony środowiska.

Ocena zagrożenia wodorowego wymaga kompleksowego podejścia, które obejmuje zarówno techniczne aspekty bezpieczeństwa, jak i szkolenia, procedury awaryjne, a także przestrzeganie regulacji prawnych. Takie podejście pozwala na minimalizację ryzyka i zapewnia bezpieczne wykorzystanie wodoru jako nośnika energii.

Procedury awaryjne

Procedury awaryjne są kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa podczas pracy z wodorem. Oto szczegółowe procedury awaryjne, które powinny być wdrożone na wypadek zdarzeń niebezpiecznych związanych ze stosowaniem wodoru:

1. Procedury awaryjne:

• **Wyciek wodoru bez zapłonu:**

- natychmiastowe powiadomienie odpowiedniego personelu (np. kierownictwo zakładu, dział bezpieczeństwa);
- użycie wykrywaczy wodoru do zlokalizowania źródła wycieku;
- zabezpieczenie miejsca wycieku i zapewnienie odpowiedniej wentylacji;
- wyłączenie potencjalnych źródeł zapłonu w pobliżu wycieku;
- ewakuacja personelu z zagrożonego obszaru zgodnie z ustalonymi drogami ewakuacji.

• **Pożar wyciekającego wodoru:**

- natychmiastowe powiadomienie straży pożarnej i kierownictwa zakładu;
- użycie odpowiednich środków gaśniczych (np. gaśnic z proszkowych lub mgły wodnej wysokociśnieniowej);
- ewakuacja osób z zagrożonego obszaru;
- zadbanie o to, by straż pożarna była świadoma niewidzialności płomienia wodoru i stosowała specjalne kamery termowizyjne do lokalizacji ognia.

• **Wybuch:**

- zachowanie spokoju i natychmiastowa ewakuacja zgodnie z ustalonymi procedurami;
- liczenie personelu po ewakuacji, aby upewnić się, że nikt nie pozostał w strefie zagrożenia;
- ponowna ocena ryzyka przed powrotem do obszaru zagrożonego.

2. Szkolenia i ćwiczenia:

- regularne szkolenia z procedur awaryjnych dla wszystkich pracowników;
- ćwiczenia ewakuacyjne przeprowadzane regularnie, aby personel był przygotowany na realne sytuacje awaryjne;
- szkolenia z zakresu udzielania pierwszej pomocy oraz obsługi sprzętu gaśniczego.

3. Komunikacja awaryjna:

- stałe linie komunikacyjne, takie jak alarmy, megafony i systemy komunikacji wewnętrznej, aby szybko informować personel o awarii;
- wyraźne oznakowanie dróg ewakuacyjnych i lokalizacji środków gaśniczych.

4. Systematyczna analiza i przegląd procedur:

- regularne przeglądy procedur awaryjnych i aktualizacje w oparciu o nowe informacje i zdarzenia z przeszłości.

- analiza każdego incydentu po jego zaistnieniu, aby zrozumieć przyczyny i wprowadzić niezbędne zmiany w procedurach.

Implementacja tych procedur awaryjnych jest niezbędna do zapewnienia bezpieczeństwa w miejscach, gdzie wodór jest wykorzystywany jako nośnik energii. Dzięki starannemu planowaniu i regularnym ćwiczeniom możliwe jest minimalizowanie ryzyka i skutków ewentualnych zdarzeń niebezpiecznych.

Załącznik 4. Materiały ilustracyjne (filmy wideo, VR) z kodami QR

W niniejszym załączniku zawarte są linki do materiałów ilustracyjnych dostępnych w Internecie wraz z kodami QR, które ten dostęp ułatwiają.

Autobusy wodorowe

https://www.youtube.com/watch?v=_M7ND5hrO2o



BLEVE (*Boiling Liquid Vapor Explosion*)

https://www.youtube.com/watch?v=UM0jtD_OWLU



Ciekły wodór. Wyciek z rury zasilającej sferę

<https://www.youtube.com/watch?v=d2Do03pE8Gc>



Działanie pojazdów wodorowych

<https://www.youtube.com/watch?v=wWOVzSmc72E>



Eksplozja kontenera z ogniwem paliwowym w porcie

<https://www.youtube.com/watch?v=LUy-xHDJURk>



Gaszenie pożaru w kontenerze z ogniwem paliwowym

<https://www.youtube.com/watch?v=OMU00ddvSJk>



Gaszenie samochodu z napędem wodorowym

<https://www.youtube.com/watch?v=NE3tpRFPUjs>



Informacje o TPRD

<https://www.youtube.com/watch?v=-WyqLVOMaRU>



Małe magazyny – przemysłowa instalacja produkcji wodoru

<https://www.youtube.com/watch?v=gT4FCDJqwHw>



Mobilny agregat wodorowy

<https://youtu.be/rSXLyt8zFfE>



Porównanie płomieni wodoru i propanu podczas dnia i nocy

<https://www.youtube.com/watch?v=r-8H5u4YzuY>



Pożar autobusu na wodór w centrum miasta

<https://www.youtube.com/watch?v=DJNz0HohuAY>



Pożar ciężarówki przewożącej paliwo wodorowe

<https://www.youtube.com/watch?v=tkIcjjHrNTw>



Pożar ogniwa paliwowego w przemysłowej dzielnicy, obok linii produkcji wodoru

<https://www.youtube.com/watch?v=4QQbtwTk5GQ>



Požary pojazdów. Płonący pojazd na otwartej przestrzeni

<https://www.youtube.com/watch?v=bKRACeIt3xc>



Pożar zdalnej instalacji zasilania

<https://www.youtube.com/watch?v=M5qh7WurHNk>



Produkcja wodoru z wody – elektroliza

<https://www.youtube.com/watch?v=38ULHoKWZag>



Produkcja wodoru w procesie reformingu parowego

<https://www.youtube.com/watch?v=xAjHJ49VOUM>



Samoloty na wodór

<https://www.youtube.com/watch?v=TCELVvDChYk>



Stacje tankowania wodoru

<https://www.youtube.com/watch?v=soC2YIGULNU>



Systemy bezpieczeństwa na stacjach tankowania wodoru

<https://www.youtube.com/watch?v=OGyUtR2VGrQ>



Taktyka operacyjna dla ratowników – pożar cysterny

<https://www.youtube.com/watch?v=1RxjTdx0VBo>



Transport oraz magazynowanie wodoru

<https://www.youtube.com/watch?v=weaZGdKHTGo>



Transport. Pożar pociągu na wodór

<https://www.youtube.com/watch?v=qhwjcx66esc>



Uwolnienie z zapłonem w magazynie

https://www.youtube.com/watch?v=rtrEc_GlouE



Wskazówki dotyczące gaszenia pożarów zbiorników wodoru

<https://www.youtube.com/watch?v=Ulfdf4BfuSM>



Wskazówki przy początku akcji gaśniczej pojazdu

<https://www.youtube.com/watch?v=jakRI7lvEP8>



Wyciek ciekłego wodoru

<https://www.youtube.com/watch?v=Gazip3ru6so>



Wyciek gazu

<https://www.youtube.com/watch?v=o9Oa0YI60Vo>



Wyciek ze stacji tankowania wózków w magazynie

<https://www.youtube.com/watch?v=njlEFihCsms>



Wypadek ciężarówki z ciekłym wodorem w strefie usługowej

<https://www.youtube.com/watch?v=KPGBMzPyV60>



Wypadek w tunelu z udziałem kilku samochodów (różne napędy)

<https://www.youtube.com/watch?v=cz9pISBwyHc>



Zdemontowana przyczepa na wodór na autostradzie

<https://www.youtube.com/watch?v=rx3gouJZSJU>



Literatura

Opracowania zwarte, artykuły

1. *Bezpieczne wykorzystanie wodoru jako paliwa w komercyjnych zastosowaniach przemysłowych*, Polski Rejestr Statków S.A., Gdańsk 2021, https://prs.pl/wp-content/uploads/2024/03/p11i_pl.pdf.
2. Buttner W., Coldrick S., Hall J., *Hydrogen Wide Area Monitoring of LH₂ Releases at HSE for the PRESHLY Project*, International Conference on Hydrogen Safety, Edinburgh 2021, https://hysafe.info/uploads/2021_presentations/153.pdf.
3. Cimolino U., *Einsatzleiter-Handbuch Feuerwehr*, Ecomed Sicherheit, 2024.
4. Cirrone D., Shentsov V., Kashkarov S. i in., *Deliverable 1.2 Report on hydrogen hazards and risks in tunnels and similar confined spaces*, https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/09/HyTunnel-CS_D1.2_Risks-and-Hazards.pdf.
5. Davis D., *European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders, Recommendations on the Pan-European Recognition and Continuation of Hydrogen Safety Training for Responders*, CTIF 2023.
6. *DGUV Information 209-072*, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., 2021, <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/265>.
7. Ehret O., *Mobilność wodorowa: stan, trendy, perspektywy*, Centrum Zarządzania Motoryzacją (CAM).
8. Europäisches Train-the-Trainer-Programm für Responder Lektion 11 Begrenzte Räume STUFE IV Experte, https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L11_HyResponder_Level4_DE.pdf [dostęp: 12.05.2024]..
9. *European Train the Trainer Programme for Responders, Lecture 7. Unignited hydrogen releases outdoors and their mitigation. LEVEL I.*
10. Houssin D., Brennan S., Van Esbroeck T., Bouix D., *Deliverable D1.1, Report on hydrogen safety aspects of technologies, systems and infrastructures pertinent to responders*, https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2022/01/HyResponder_D1_1_H2-systems-and-safety-features_Final-21122021.pdf.
11. Lecomte L., Verriest F., Wilfried S., i in., *HyResponder, European Emergency Response Guide*, 2022, https://ctif.org/sites/default/files/2023-05/Final-English-EERG-December-2022_VFinal.pdf.
12. Lewandowski W.M., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT, W-wa 2006.
13. Molkov V., *Fundamentals of hydrogen safety engineering*, Part I, Ventus Publishing ApS 2012, <https://lib.manaraa.com/books/fundamentals-of-hydrogen-safety-engineering-ii.pdf>.https://www.poprostuslonce.pl/poprostuslonce-pl/rozwiązania-wodorowe?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIofnmxf3PhQMVB62DBx18mAurEAAAYASAAEgKmBPD_BwE.
14. Schmidt K., Schmidt J., Rivkin C., *Hydrogen Fuel Cell Vehicles – What First Responders Need to Know*, <https://www.firehouse.com/rescue/article/12385113/>

- hydrogen-fuel-cell-vehicles-what-first-responders-need-to-know-firehouse.
15. Vereš J., Ochodek T., Koloničný J., *Safety Aspects of Hydrogen Fuelling Stations*, "Chemical Engineering. Transactions" 2022, 91, 49-54, <https://doi.org/10.3303/CET2291009>.

Normy

1. CTIF-ISO 17840, Pakiet informacyjny pojazdy ratownicze, <https://drive.google.com/drive/folders/1KO-uKItx2m1QmNBKnGdWijA5Ky1uswDW> [dostęp: 1.10.2024].
2. IEC 62282-3-100:2019 Fuel cell technologies – Part 3-100: Stationary fuel cell power systems – Safety [Technologie ogniw paliwowych – Część 3-100: Stacjonarne systemy zasilania ogniwami paliwowymi – Bezpieczeństwo].
3. IEC 62282-4-101:2014 Fuel cell technologies – Part 4-101: Fuel cell power systems for propulsion other than road vehicles and auxiliary power units (APU) – Safety of electrically powered industrial trucks [Technologie ogniw paliwowych – Część 4-101: Systemy zasilania ogniwami paliwowymi do napędów innych niż pojazdy drogowe i pomocnicze jednostki zasilające (APU) – Bezpieczeństwo wózków przemysłowych z napędem elektrycznym].
4. IEC 62282-5-100:2018 Fuel cell technologies – Part 5-100: Portable fuel cell power systems. Safety [Technologie ogniw paliwowych – Część 5-100: Przenośne systemy zasilania ogniwami paliwowymi – Bezpieczeństwo].
5. IEC 62282-6-100:2010 Fuel cell technologies – Part 6-100: Micro fuel cell power systems – Safety [Technologie ogniw paliwowych – Część 6-100: Mikrosystemy zasilania ogniwami paliwowymi – Bezpieczeństwo].
6. IEC PAS 62282-6-150:2011 Fuel cell technologies – Part 6-150: Micro fuel cell power systems – Safety -- Water reactive (UN Devison 4.3) compounds in indirect PEM fuel cells [Technologie ogniw paliwowych – Część 6-150: Mikroukłady ogniw paliwowych – Bezpieczeństwo – Związki reagujące z wodą (UN Devison 4.3) w pośrednich ogniwach paliwowych PEM].
7. ISO 17840-4 Road vehicles – Information for first and second responders – Part 4: Propulsion energy identification
8. ISO 19880-1: Stacje tankowania gazowego wodoru, 2020.
9. NFPA 2 Hydrogen Technologies Code – Comprehensive code for hydrogen technologies con-structed of extract material from documents such as NFPA 55 and 853 and original material – [Kompleksowy kodeks dla technologii wodorowych, składający się z fragmentów dokumentów takich jak NFPA 55 i 853 oraz materiałów oryginalnych].
10. NFPA 55 Compressed Gas and Cryogenic Fluids Code - Comprehensive gas safety code that addresses flammable gases as a class of hazardous materials and also contains hydrogen specific requirements [Kompleksowy kodeks bezpieczeństwa gazowego, który dotyczy gazów palnych jako klasy materiałów niebezpiecznych, a także zawiera wymagania dotyczące wodoru].

11. NFPA 853 Standard for the Installation of Stationary Fuel Cell Power Systems – Covers installation of all commercial fuel cells including hydrogen PEM fuel cells [Standard instalacji stacjonarnych systemów zasilania ogniwami paliwowymi – Obejmuje instalację wszystkich komercyjnych ogniw paliwowych, w tym wodorowych ogniw paliwowych PEM].

Witryny internetowe:

1. <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>
2. <https://chatgpt.com/>
3. <https://cordis.europa.eu/article/id/157607-minimising-risk-of-hydrogen-technologies/pl>
4. <https://cordis.europa.eu/project/id/875089/pl>
5. <https://ctif.org/commissions-and-groups/hyresponder-european-hydrogen-train-trainer-programme-responders>
6. <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hrsam>
7. <https://hyfindr.com/en/shop/products/thermal-pressure-relief-device>
8. <https://hyresponder.eu>
9. <https://hyresponder.eu/e-platform/training-materials/educational-training/lecture-9-hazard-distances-from-hydrogen-flames-and-firefighting/>
10. <https://hyresponder.eu/e-platform/training-materials/educational-training/lecture-11-confined-spaces/>
11. <https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/HyResponder-Glossary-DE.pdf>
12. <https://pl.wikipedia.org/wiki/Deflagracja>
13. <https://sjp.pwn.pl/>
14. <https://www.auto-swiat.pl/ev/wiadomosci/nesobus-pokazano-polski-autobus-wodorowy-będzie-produkowany-w-swidniku/fhkv7lf>
15. <https://www.gov.pl/web/klimat/paliwa-alternatywne-w-transporte>
16. https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/wydarzenia/grupa-polsat-plus-chwalisie-osiagnieciem-samochody-wodorowe-przejechaly-potezny/0t0lq3p?utm_campaign=cb
17. <https://www.messer.pl>
18. https://www.poprostuslonce.pl/poprostuslonce-pl/rozwiązania-wodorowe?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIofnmxf3PhQMVB62DBx18mAurEAAYASA-AEgKmBPD_BwE
19. <https://www.portalsamorzadowy.pl/ochrona-srodowiska/w-bydgoszczy-powstajapaszerskie-pociagi-wodorowe-dla-kolei-regionalnych,469220.html>
20. <https://www.prawo.pl/kadry/clp-zasady-oznakowania-i-opakowania-substancji-i-mieszanin,187058.html>
21. <https://www.youtube.com/watch?v=F9dhZJQk80A&feature=youtu.be&t=291>

Spis rycin

Ryc. 1. Przykład pojazdu osobowego z napędem wodorowym przy stacji paliw do tankowania wodoru	8
Ryc. 2. Zestaw butli z wodorem V18, obok tablice ostrzegawcze.....	19
Ryc. 3. Butla do przechowywania wodoru o poj. 50 l.....	20
Ryc. 4. Oznakowanie wodoru zgodnie z ADR, IMDG, IATA.....	20
Ryc. 5. Diagram fazowy wodoru	26
Ryc. 6. Przykładowe rozmieszczenie czujników w pojeździe FCEV	29
Ryc. 7. Temperatury samozapłonu wybranych paliw.....	31
Ryc. 8. Zakres górnej oraz dolnej granicy wybuchowości wybranych gazów.....	31
Ryc. 9. Uwalnianie LH ₂ na dużą skalę i opóźniony zapłon	32
Ryc. 10. Uwalnianie zapalonego wodoru w wolnej przestrzeni	34
Ryc. 11. Poglądowy schemat procesu produkcji, magazynowania oraz wykorzystania zielonego wodoru	39
Ryc. 12. Schemat alkalicznego ogniwa paliwowego	43
Ryc. 13. Schemat pojazdu napędzanego wodorowymi ogniwami paliwowymi.....	45
Ryc. 14. Schemat etykiety identyfikacyjnej.....	48
Ryc. 15. Ilustracja przykładowej stacji tankowania wodoru gazowego (GHRS)	51
Ryc. 16. Ilustracja przykładowej stacji tankowania wodoru ciekłego (LHRS)	53
Ryc. 17. Zagrożenia zdarzeniami związanymi z magazynowaniem wodoru	58
Ryc. 18. Zagrożenia zdarzeniami z natychmiastowym zapłonem wodoru, wywołanymi nieszczelnościami na połączeniach lub podłączeniem nieszczelnych urządzeń....	58
Ryc. 19. Zagrożenia związane z opóźnionym zapłonem wodoru wywołanie utratą szczelności na połączeniach lub nieszczelnościami innych elementów	59
Ryc. 20. Obraz w podczerwieni pokazujący promieniowanie cieplne wytwarzane podczas spalania: wodoru (200 bar), CNG (200 bar) i LPG (10 bar)	62
Ryc. 21. Porównanie długości płomienia dla pożarów strumieniowych wodoru (średnica kryzy 3,1 mm), CNG (średnica kryzy 3,1 mm) i LPG.....	62
Ryc. 22. Schemat efektu BLEVE.....	64
Ryc. 23. Przedstawienie efektu BLEVE	64
Ryc. 24. Przedstawienie masowego rozlewu.....	65
Ryc. 25. Zjawiska i skutki istotne dla bezpieczeństwa po wycieku wodoru do wnętrza pomieszczeń. Białe pola odpowiadają zjawiskom związanym z wodorem, a pola szare konsekwencjom	69
Ryc. 26. Lokalizacja TPRD.....	75
Ryc. 27. Nasada do tankowania wodoru w samochodzie Toyota Mirai	76
Ryc. 28. Dozownik do wózka widłowego (Air Liquide)	76
Ryc. 29. Koncepcja ciekłego organicznego nośnika wodoru (LOHC Hydrogenious)	80
Ryc. 30. Wagony kolejowe transportujące wodór.....	106

Ryc. 31. Przechowywanie wodoru w strukturze lub na powierzchni niektórych materiałów stałych.....	108
Ryc. 32. Rodzaje zbiorników wodoru do przechowywania sprężonego wodoru gazowego.....	109
Ryc. 33. Najważniejsze systemy pojazdu FC.....	112
Ryc. 34. Przykład pojazdu z ogniwem paliwowym.....	112
Ryc. 35. Autobus z napędem wodorowym w Poznaniu, gdzie użytkowanych jest już ponad 20 autobusów z takim napędem.....	114
Ryc. 36. Układ głównych komponentów w autobusie FC.....	115
Ryc. 37. Przykład mobilnego agregatu energii z wodorowymi ogniwami paliwowymi jednego z producentów	117

Spis tabel

Tabela 1. Właściwości wodoru w porównaniu z innymi źródłami energii	23
Tabela 2. Gęstość wodoru i innych popularnych paliw względem powietrza	25
Tabela 3. Źródła wycieków i scenariusze opracowane przez EIGA (2007)	28
Tabela 4. Przykładowe wzory etykiet w zależności od rodzaju napędu	49
Tabela 5. Czas trwania przedmuchiwania zbiornika dla różnych objętości i średnic otworu.....	56
Tabela 6. Wartości progowe nadciśnienia stwarzające zagrożenie dla ludzi (na zewnątrz obiektów)	66
Tabela 7. Wartości progowe nadciśnienia powodujące uszkodzenia budynków	66
Tabela 8. Zagrożenia związane ze stosowaniem napędu elektrycznego	77
Tabela 9. Zagrożenia związane ze stosowaniem wodoru	77

Ze względu na znikomą liczbę opracowań ujmujących całościowo przedmiotową problematykę, która ma charakter interdyscyplinarny, recenzowany poradnik jest doskonałym materiałem dydaktycznym dedykowanym dla wszystkich ratowników realizujących zadania z zakresu reagowania na wypadki związane z wodorem. Powinien wejść on do podstawy programowej szkoleń i doskonałeń zawodowych związanych z ratownictwem technicznym.

dr hab. Jarosław Struniawski, profesor uczelni

Materiał kompleksowo opisuje charakterystykę wodoru, zagrożenia z nim związane oraz podstawowy sposób podejścia ratowników do działań w zdarzeniach, w których występuje wodór. (...) Może być przydatny również dla firm zajmujących się przechowywaniem wodoru lub prowadzących procesy technologiczne z wykorzystaniem wodoru.

st. bryg. mgr inż. Tomasz Jonio

(...) Bezpieczeństwo nowych technologii jest aktualnym zagadnieniem badań i analiz m.in. w dyscyplinach: nauki o bezpieczeństwie, inżynieria bezpieczeństwa, a także inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Poza cennymi wynikami badań, publikacjami naukowymi – jak widać na przykładzie przedmiotowego opracowania – możliwe jest powstawanie publikacji dedykowanych praktyce ratowniczej w oparciu o wiedzę, badania naukowe, wyniki i doświadczenia, a także wiedzę techniczną.

nadbryg. dr inż. Mariusz Feltynowski

Szczególnie istotne są wytyczne dotyczące odpowiedniego zabezpieczenia ratowników, stosowania sprzętu ochronnego, a także taktyki działań ratowniczych w zależności od rodzaju zagrożenia (np. wycieki wodoru, pożary strumieniowe). Ponadto opisano scenariusze zróżnicowanych działań w zależności od miejsca wystąpienia zagrożeń np. w tunelach, na stacjach paliw czy w pojazdach napędzanych wodorem. (...) Wskazano na konieczność dalszego szkolenia ratowników, w szczególności w kontekście nowych technologii wodorowych ze względu na rosnące znaczenie wodoru jako paliwa przyszłości.

dr hab. Maria Zielecka, profesor instytutu



ISBN: 978-83-971388-3-4

DOI: 10.17381/2025.1