



**Łukasiewicz**

Instytut Organizacji i Zarządzania  
w Przemysle ORGMASZ



## **BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH**

**IV - INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA  
TECHNOLOGII WODOROWYCH –  
BEZPIECZEŃSTWO W OBSZARZE  
MAGAZYNOWANIA WODORU**

# **BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH**

## **IV**

### **INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA TECHNOLOGII WODOROWYCH – BEZPIECZEŃSTWO W OBSZARZE MAGAZYNOWANIA WODORU**

Warszawa, czerwiec 2023 r.

Recenzenci: prof. dr. hab. inż. Piotr Wolański, dr inż. Katarzyna Stec, dr inż. Renata Kulesza, dr hab. inż. Grzegorz Wojtasiewicz, dr inż. Antoni Migdał, dr inż. Piotr Wieczorek, Damian Wijatyk, dr inż. Kamil Kulesza

Kierownik projektu: dr Katarzyna Iwińska

Zespół projektu: dr Katarzyna Iwińska, dr inż. Kamil Kulesza, dr hab. Michał Wróblewski, Joanna Grudowska

Publikacja dofinansowana ze środków budżetu państwa w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Nauka dla Społeczeństwa” nr projektu NdS 545480/2022/2022, kwota dofinansowania 1 410 152 zł, całkowita wartość projektu 1 410 152 zł.



Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Organizacji i Zarządzania w Przemysle ORGMASZ  
ul. Żelazna 87 00-879 Warszawa

## SPIS TREŚCI

Spis treści .....	2
1. Wstęp – cel opracowania .....	3
2. Analiza obowiązujących przepisów prawa, standardów, wytycznych oraz kryteriów oceny bezpieczeństwa .....	5
3. Definiowanie obszaru projektowego i jego elementów .....	5
3.1. Definiowanie obszaru projektowego dotyczącego bezpieczeństwa, w przypadku przechowywania wodoru podejście ogólne .....	5
3.2. Definiowanie obszaru projektowego .....	6
4. Analiza podsystemów technicznych w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa .....	9
4.1. Zagadnienia związane z oddziaływaniem instalacji wodorowych na otoczenie ....	9
4.2. Metody minimalizowania zagrożeń oraz ich skutków związanych z magazynowaniem wodoru .....	12
5. Analiza jakościowa w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa .....	13
5.1. Zagadnienia dotyczące systemów technicznych (w tym założenia związane z rozmieszczeniem czujników oraz innymi metodami monitorowania zagrożeń) .....	13
5.2. Zagadnienia związane z wpływem wodoru na infrastrukturę i otoczenie oraz na człowieka .....	14
5.3. Techniki inżynierskie: scenariusze kryzysowe (w ujęciu jakościowym i ilościowym).....	15
6. Podsumowanie .....	17
7. Bibliografia .....	19

## 1. WSTĘP – CEL OPRACOWANIA

Celem opracowania jest przedstawienie zagadnień dotyczących bezpieczeństwa w obszarze magazynowania wodoru, które wystąpią w związku ze zmianą skali oraz zmianą lokalizacji instalacji magazynujących wodór.

Zbiorniki są opanowane generalnie pod względem bezpieczeństwa technologii wodorowych, natomiast wyzwaniem jest ich szerokie występowanie na terenach, do których dostęp mają osoby trzecie i będą one narażone na potencjalne skutki awarii. Metody składowania wykorzystujące naturalne struktury terenowe (np. kawerny) prawdopodobnie nie będą wdrażane do 2030 roku, natomiast w tym czasookresie będą przedmiotem studiów (np. wykonalności), a obszar ten nie jest dostatecznie uregulowany.

Magazynowanie wodoru jest realizowane na kilka sposobów: magazynowanie wodoru w fazie gazowej, magazynowanie wodoru w fazie ciekłej i magazynowanie wodoru w formie związanej chemicznie.

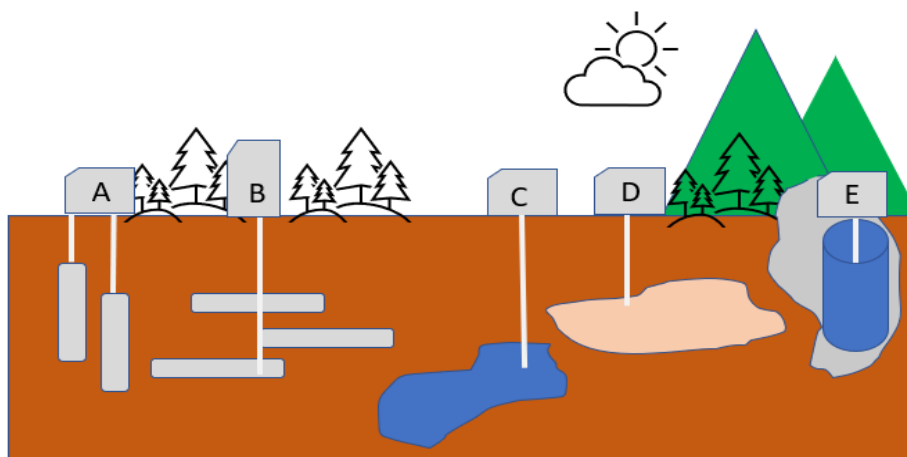
### Magazynowanie wodoru w fazie gazowej (zbiorniki, kawerny itp.)

Obecnie stosuje się cztery rodzaje zbiorników przeznaczonych do magazynowania wodoru w fazie gazowej<sup>1</sup>:

- typ I - zbiorniki wykonane ze stali lub aluminium pozwalające przechowywać wodór do ciśnienia ok 200 bar,
- typ II - zbiorniki metalowe zbrojone włóknem szklanym lub węglowym pozwalające przechować wodór do ciśnienia ok. 300 bar,
- typ III - zbiorniki z wkładem metalowym i pełnym oplotem kompozytowym z włókna szklanego lub węglowego pozwalają przechowywać wodór do ciśnienia ok. 430 bar,
- typ IV - zbiorniki w pełni kompozytowe, wewnętrzny wkład (liner) wzmocniony oplotem kompozytowym z włókna szklanego lub węglowego pozwalają przechowywać gazowy wodór do ciśnienia ok 660 bar.

Magazynowanie sprężonego wodoru realizuje się również w naturalnych lub powstałych w wyniku wydobycia gazu, ropy naftowej czy soli w kawernach<sup>2</sup>. Systemy przechowywania wodoru w kawernach są bardzo zbliżone do systemów przechowywania gazu ziemnego. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie metody magazynowania wodoru w kawernach naturalnych oraz sztucznych wyrobiskach<sup>2</sup>.





A-Kawerny solne, B- Wyrobiska po kopalniach, C – Warstwy wodonośne, D Wyrobiska, E – Kawerny skalne

**Rysunek 1 Metody przechowywania wodoru w naturalnych kawernach oraz sztucznych wyrobiskach, opracowano na podstawie<sup>2</sup>**

### Magazynowanie wodoru w fazie ciekłej.

Do magazynowania wodoru w fazie ciekłej<sup>3</sup> stosowane są zbiorniki kriogeniczne. Ten sposób magazynowania pozwala na zastosowanie zbiornika o znacznie mniejszej objętości niż objętość zbiornika wodoru gazowego, w którym zmagazynowano tą samą ilość energii<sup>a</sup>. Aby skroplić wodór należy obniżyć temperaturę gazu poniżej jego temperatury skraplania w zastosowanym ciśnieniu. Proces skraplania wodoru jest bardzo energochłonny. Przechowywanie i wykorzystanie ciekłego wodoru na skalę przemysłową zostało zastosowane w przemyśle kosmicznym, w którym wodór jest stosowany, jako paliwo rakietowe.

### Magazynowanie wodoru w formie związanej chemicznie.

Wodorki metali mogłyby stanowić alternatywę w obszarze przechowywania wodoru<sup>3</sup>, z uwagi na znacznie większą gęstość przechowywanej energii, w porównaniu z gęstością energii uzyskiwaną w zbiornikach ze sprężonym czy ciekłym wodorem. Większość wodorków metali rozkłada się w wysokiej temperaturze, co może powodować występowanie zagadnień związanych z bezpieczeństwem procesów wysokotemperaturowych. Wodorki metali, które mogą uzyskać wysoką gęstość energii w przeliczeniu na masę lub objętość, powodują konieczność zastosowania bardzo restrykcyjnych zabezpieczeń związanych z ich gwałtownymi i egzotermicznymi reakcjami z tlenem oraz wilgocią zawartą w otoczeniu. Dodatkowo wodorki metali, w przypadku pożaru generują nowe wyzwania przed służbami ratowniczymi, które nie są im powszechnie znane.

<sup>a</sup> Z punktu widzenia termodynamicznego bardzo wysokich ciśnień kompresji, pozwalającą uzyskać gęstość energii sprężonego wodoru przewyższającą gęstość energii skroplonego wodoru jest bezcelowa ze względów ekonomicznych.

Metanol – magazynowanie, transport i dystrybucja są opanowane zarówno w aspekcie przemysłowym, jak i rozproszonym<sup>4</sup>. Wśród innych nośników wodoru metanol charakteryzuje się dużą grawimetryczną i objętościową gęstością wodoru.

## 2. ANALIZA OBOWIĄZUJĄCYCH PRZEPISÓW PRAWA, STANDARDÓW, WYTYCZNYCH ORAZ KRYTERIÓW OCENY BEZPIECZEŃSTWA

Aspekty związane z przepisami prawa, standardami, wytycznymi oraz kryteriami oceny bezpieczeństwa opisano w raporcie nr 3, pt. „Inżynieria bezpieczeństwa technologii wodorowych – bezpieczeństwo w obszarze otrzymywania wodoru.”.

W przypadku magazynowania wodoru, ustawy, normy i wytyczne należy traktować interdyscyplinarnie oraz stosować się do wytycznych jednostek odpowiedzialnych za dopuszczenia infrastruktury wodorowej do użytkowania. Regulacje prawne związane z magazynowaniem wodoru w kawernach nie są jeszcze uregulowane. Od dostępności tych uregulowań zależy intensywność rozwoju w tym obszarze. Minister Klimatu i Środowiska zapewnił w pierwszym kwartale 2023 r., że prawo w tym zakresie będzie rozwijane. Minister podkreślił również, że *„te magazyny mogą stabilizować system energetyczny nie tylko w Polsce, ale w sporej części Europy. Może to służyć państwu nadbałtyckim, państwu Europy Środkowo-Wschodniej, Europy Południowej. Polska może być centrum związanym z nowym europejskim systemem energetycznym.”*<sup>5</sup>.

## 3. DEFINIOWANIE OBSZARU PROJEKTOWEGO I JEGO ELEMENTÓW

### 3.1. DEFINIOWANIE OBSZARU PROJEKTOWEGO DOTYCZĄCEGO BEZPIECZEŃSTWA, W PRZYPADKU PRZECHOWYWANIA WODORU PODEJŚCIE OGÓLNE

Wodór nie jest ani bezpieczniejszy ani bardziej niebezpieczny w porównaniu z innymi paliwami, ale należy się z nim obchodzić w bezpieczny sposób biorąc pod uwagę jego właściwości i zagrożenia. Wodór jest bezbarwnym, bezwonnym i pozbawionym smaku gazem łatwopalnym w szerokim zakresie stężeń (od 4% do 75% objętościowych w powietrzu). Wysoka dyfuzyjność, mała masa cząsteczkowa i niska lepkość wodoru sprawiają, że wodór łatwo wycieka przez małe pęknięcia i spoiny, a stosowanie go z nieodpowiednimi materiałami prowadzi do kruchości wodorowej i przenikania wodoru. Wodór ma niską minimalną energię zapłonu wynoszącą 0,017 mJ, co wraz z szerokimi granicami palności może spowodować jego łatwy zapłon. Niska gęstość wodoru (0,0873 kg/m<sup>3</sup> w warunkach normalnych) sprawia, że unosi się on w powietrzu co stanowi jego główny atut w zakresie bezpieczeństwa, ponieważ każdy wyciek wodoru skutkuje unoszeniem się chmury gazowej, która jest rozpraszana na otwartej przestrzeni. Źródłem zapłonu może być „iskra” z elektryzującego się ubrania, telefon komórkowy, nieodpowiedni radiotelefon używany do komunikacji pomiędzy pracownikami, nieodpowiednie narzędzia używane do prac konserwacyjnych. Dlatego też pracownicy i osoby obsługujące instalacje wodorowe powinny być przede wszystkim przeszkolone z zagrożeń oraz wyposażone w sprzęt i ubrania w wykonaniu antyelektrostatycznym, przeciwwybuchowy lub nieiskraczącym. Niemniej jednak w pomieszczeniach zamkniętych należy zachować szczególną ostrożność, aby zapobiec jakiegokolwiek nagromadzeniu się łatwopalnej

mieszaniny wodoru z powietrzem w pobliżu sufitu. Dlatego też ważne jest, aby ocieplenie stropodachów czy sufitów nie składało się z wełny mineralnej lub innych materiałów, które wodór mógłby nasączyć, a które stałyby się wówczas materiałem łatwopalnym. W przypadku zapłonu, przy całkowitym spalaniu adiabatycznym, taka mieszanina może wytworzyć bardzo silną deflagrację, generując ciśnienie do 8 barów<sup>6</sup>. Wodór jest również produkowany, transportowany i rozprowadzany w fazie ciekłej. Ciekły wodór w słabo izolowanych lub nieizolowanych pojemnikach i rurociągach skrapla otaczające powietrze. Ze względu na różne temperatury wrzenia azotu i tlenu skondensowane powietrze jest wzbogacone w tlen i może powodować ryzyko pożaru. W związku z tym należy rozpatrywać zagrożenia związane z niskimi temperaturami, ponieważ mogą wystąpić oparzenia kriogeniczne na skutek kontaktu niezabezpieczonych części ciała z zimnymi płynami lub zimnymi powierzchniami<sup>7</sup>. Kontakt między niezabezpieczonymi częściami ciała a nieizolowanymi rurociągami lub naczyniami zawierającymi ciekły wodór może spowodować przywieranie i rozdarcie ciała. Uszkodzenia oczu i płuc oraz hipotermia mogą wynikać z narażenia na kontakt z zimnym gazem powstałym po odparowaniu ciekłego wodoru<sup>8</sup>. Oddychanie czystą atmosferą wodoru spowoduje natychmiastową utratę przytomności i prawie natychmiastową śmierć. Ilość wodoru niezbędna do wytworzenia niebezpiecznego niedoboru tlenu jest znacznie wyższa niż dolna granica palności. Dlatego podstawowym zagrożeniem wodorem nie jest uduszenie, ale pożar i wybuch. Należy również nadmienić, że w temperaturze ciekłego wodoru wszystkie gazy, z wyjątkiem helu, skraplają się, a następnie zestalają. Takie cząstki stałe mogą zatykać ograniczone obszary, takie jak zawory i kryzy, co może prowadzić do awarii, braku przepływu lub wzrostu ciśnienia. Ciekły wodór w słabo izolowanych lub nieizolowanych pojemnikach i rurociągach skrapla otaczające powietrze. Ze względu na różne temperatury wrzenia azotu i tlenu skondensowane powietrze jest wzbogacone w tlen i może powodować ryzyko pożaru. Oddychanie czystą atmosferą wodoru spowoduje natychmiastową utratę przytomności i prawie natychmiastową śmierć. Ilość wodoru niezbędna do wytworzenia niebezpiecznego niedoboru tlenu jest znacznie wyższa niż dolna granica palności. Dlatego podstawowym zagrożeniem wodorem nie jest uduszenie, ale pożar i wybuch.

### 3.2. DEFINIOWANIE OBSZARU PROJEKTOWEGO

Główne obszary konieczne do wzięcia pod uwagę przy wyznaczaniu obszaru projektowego<sup>b</sup> w przypadku magazynowania wodoru:

#### Stan skupienia

Potencjalne zagrożenia związane z magazynowaniem sprężonego wodoru gazowego:

- trudność w identyfikacji wycieku wodoru, ponieważ gaz jest bezwonny, bezbarwny i bez smaku,
- substancji zapachowych nie można dodawać do wodoru,
- wodór może powodować kruchość metali, a w konsekwencji spadek wytrzymałości materiału, co może doprowadzić do pęknięcia zbiornika i wycieku wodoru,
- gromadzenie się wodoru przez długi czas w pomieszczeniach takich jak garaż lub warsztat mechaniczny, przedziały pasażerskie pojazdów, może doprowadzić do uduszenia,

---

<sup>b</sup> Obszar projektowy, ang. design space, zwyczajowo, przyjęty zakres oraz kryteria oceny w procesie projektowania inżynierskiego.

- tworzenie łatwopalnych mieszanin wodoru z tlenem lub wodoru z powietrzem, przedostanie się łatwopalnej mieszaniny do instalacji wentylacyjnej budynku może doprowadzić do deflagracji lub nawet detonacji,
- strumienie wodoru w niskiej temperaturze i pod wysokim ciśnieniem mogą uszkodzić tkankę skórną,<sup>9</sup> przecięcie lub poparzenie zimnem,
- wypływ gazowego wodoru pod wysokim ciśnieniem może spowodować tzw. „zapłon dyfuzyjny”<sup>10,11</sup>,
- nadciśnienie lub impuls ciśnienia mogą prowadzić do: uszkodzenia błony bębenkowej, pęknięcia zbiornika, latających odłamków, potłuczonego szkła itp.,
- wodór można łatwo zapalić, ponieważ jego minimalna energia zapłonu wynosi 0,017 mJ. Iskra statyczna może zapalić uwolniony wodór,
- kiedy pali się czysty wodór, jego płomienie są niewidoczne w świetle dziennym,
- wodór spala się szybko i nie wytwarza dymu,
- zewnętrzny ogień, ciepło lub promieniowanie cieplne mogą spowodować mechaniczne pęknięcie zbiornika w wyniku rozkładu termicznego materiałów polimerowych i kompozytowych, wartość oporu ogniowego zbiorników kompozytowych to ok. 12 minut przed wystąpieniem awarii,
- w przypadku awarii możliwy jest najgorszy scenariusz: pęknięcie zbiornika wodoru, powstanie płomienia strumieniowego, fal uderzeniowych i rozprzestrzeniania się płonące odłamki.

## Materiał zbiornika

### i. Zbiorniki metalowe

Na interakcję wodoru z metalami mają wpływ reakcje chemiczne i efekty fizyczne, takie jak:

- korozja<sup>12</sup>: korozja sucha (występująca wysokich temperaturach); mokra korozja (głównie spowodowana wilgocią); korozja spowodowana zanieczyszczeniami w gazie,
- kruchość wodorowa<sup>12</sup>,
- kruchość w niskich temperaturach<sup>13</sup> („kruchość na zimno”),
- gwałtowne reakcje (np. zapłon).

Korozja sucha to zjawisko powstałe w wyniku reakcji chemicznej pomiędzy pozbawionym wilgoci gazem a metalem, która ostatecznie może doprowadzić do zmniejszenia grubości ścianki zbiornika<sup>14</sup>. Ten rodzaj korozji nie jest bardzo powszechny, ponieważ postępuje bardzo powoli w temperaturze otoczenia. Jednak w wysokich temperaturach wodór może reagować z niektórymi metalami, na przykład tworząc wodorki. Korozja mokra może wystąpić w zbiorniku po dostaniu się wilgoci lub wody do jego wnętrza w przypadku niewystarczającej czystości wtłaczanego wodoru. Należy pamiętać, że wodór jest gazem niekorozyjnym i nie może nawet w mokrych warunkach powodować tego rodzaju korozji. W niskich temperaturach niektóre metale mogą stać się bardziej kruche. Jest to spowodowane przejściem materiału ze stanu ciągliwego do kruchego, gdy temperatura jest niższa niż temperatura „zerowej plastyczności”. Temperatura ta czasem jest znacznie wyższa niż temperatura cieczy kriogenicznej<sup>c</sup>. Stanowi to problem dla instalacji narażonych na okresowe działanie niskiej temperatury.

<sup>c</sup> Kriogenika - technika wytwarzania i utrzymywania bardzo niskich temperatur, za umowną granicę temperatur kriogenicznych przyjmuje się temp. 120 K.



Kruchość wodorowa<sup>12</sup> to proces, w wyniku którego różne metale, głównie stale o wysokiej wytrzymałości, stają się kruche (tj. tracą plastyczność) i pękają po wystawieniu na działanie wodoru. To jest spowodowane wnikaniem wodoru cząsteczkowego lub atomowego do sieci krystalicznej metalu. Występuje przy stosunkowo wysokich temperaturach.

Stale o wysokiej wytrzymałości są najbardziej wrażliwe na kruchość wodorową. Zjawiska kruchości wodorowej obejmują:

- niektóre operacje podczas produkcji, takie jak spawanie, galwanizacja, wytrawianie itp.,
- wodór powstający jako produkt uboczny mokrej korozji metalu,
- obróbka powierzchni metalowych (np. ochrona katodowa metalu przed korozją),
- instalacje produkcji amoniaku, gdzie gaz syntezowy (wodór + azot) występuje pod ciśnieniem ponad 100 bar oraz temperaturze powyżej 300°C,
- adsorpcja na powierzchni metalu.

Kruchość wodorowa jest klasyfikowana w następujący sposób<sup>15</sup>:

- środowiskowa kruchość wodorowa – występuje, gdy materiał jest wystawiony na działanie atmosfery wodorowej, np. w zbiornikach magazynowych,
- wewnętrzna odwracalna kruchość wodorowa - występuje, gdy wodór dostaje się do metalu podczas jego przetwarzania. Ten typ kruchości może prowadzić do strukturalnego uszkodzenia materiału, który nigdy nie był narażony na działanie wodoru,
- reakcja wodorowej kruchości - występuje w wyższych temperaturach, gdy wodór reaguje chemicznie ze składnikiem metalu, tworząc nowy element mikrostrukturalny lub fazy, takiej jak wodorek, lub podczas generowania pęcherzyków gazu, znanych również jako tworzenie pęcherzy.

## ii. Zbiorniki kompozytowe

Materiały polimerowe są coraz częściej stosowane do wykonywania oplotów zbiorników do przechowywania wodoru. Do zbiorników kompozytowych (Typ III i IV)<sup>1</sup> można zastosować włókna szklane, włókna aramidowe lub węglowe. Dwa zjawiska związane z materiałami polimerowymi są krytyczne:

- przenikanie wodoru przez materiał,
- degradacja właściwości mechanicznych polimerów.

Z materiałowego punktu widzenia magazynowanie wodoru stanowi duże wyzwanie. Materiały stosowane do przechowywania wodoru muszą być lekkie, ale także powinny być w stanie wytrzymać ekstremalnie wysokie ciśnienie przy jednoczesnym utrzymaniu ich integralności. Istnieje kilka niepożądanych efektów wpływu wodoru w odniesieniu do materiałów polimerowych:

- pęcznienie tworzyw sztucznych, które występuje w wyniku kontaktu z wodorem w fazie gazowej lub ciekłej. Może to prowadzić do niedopuszczalnego wzrostu wymiarów elementów lub powstawania pęknięć związanych z nagłym odgazowaniem przy spadku ciśnienia cząstkowego. Znaczący poziom spęcznienia może być zamaskowany przez „wymywanie” plastyfikatorów i wypełniaczy często stosowanych w polimerach. Należy również rozważyć zmiany wytrzymałości mechanicznej i twardości polimeru. Spęcznienie o ponad 15% w normalnej eksploatacji jest niezalecane. Wodór pod ciśnieniem może

powodować pęcznienie kilku polimerów stosowanych w tej samej wykładzinie zbiorników,

- stosunkowo duże ilości wodoru mogą rozpuścić się w materiale polimerowym, a więc w polimer poddany działaniu wodoru może doznać nie tylko spęcznienia, ale również mogą tworzyć się pęcherze gazowe,
- jeśli gazowy wodór zawiera określony rodzaj zanieczyszczeń, które nie są kompatybilne z materiałami polimerowymi, może to prowadzić do pogorszenia właściwości mechanicznych i ostatecznie do pęknięcia elementu. Ryzyko to należy rozważyć w zależności od źródła wodoru,
- ryzyko pożaru. Wodór jest gazem palnym i w przypadku pożaru materiały polimerowe zapalają się względnie łatwo. W wyniku tego materiały degradują się, a wytrzymałość mechaniczna znacznie spada, a to ostatecznie może doprowadzić do pęknięcia. Zbiorniki typu III i IV nie wytrzymują działania otwartego ognia dłużej niż 6 – 12 minut. Dlatego zbiorniki te są zwykle wyposażone w zawory bezpieczeństwa zdolne do obniżenia ciśnienia panującego w zbiorniku,
- przenikanie wodoru przez materiał polimerowy (liner<sup>d</sup>) jest jednym z głównych problemów zbiorników wysokociśnieniowych wodoru. W przypadku zbiorników na ciekły wodór liner wykonany jest z aluminium lub stali nierdzewnej<sup>16</sup>.

## 4. ANALIZA PODSYSTEMÓW TECHNICZNYCH W PROCESIE PROJEKTOWYM DLA WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

### 4.1. ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z ODDZIAŁYWANIEM INSTALACJI WODOROWYCH NA OTOCZENIE

#### Wyloty z instalacji wodorowej

- wszystkie odpowietrzniki, w tym odpowietrzniki urządzeń bezpieczeństwa i zaworów odpowietrzających, należy podłączyć do komina wentylacyjnego,
- komin wentylacyjny powinien być ustawiony w bezpieczne miejsce na wolnym powietrzu, tak aby zapobiec uderzeniu ulatniającego się gazu w kierunku personelu lub jakąkolwiek konstrukcji,
- komin wentylacyjny nie może wydmuchiwać gazu tam, gdzie może wystąpić gromadzenie się wodoru, na przykład pod okapami budynków,
- należy zwrócić uwagę na zapobieganie gromadzeniu się wody, w tym z kondensatu na wylocie komina wentylacyjnego,
- położenie komina wentylacyjnego należy wziąć pod uwagę przy lokalizacji instalacji,
- kominy wentylacyjne powinny być przeznaczone do instalacji wodorowych i nie powinny być połączone z innymi kominami wentylacyjnymi,
- wysokość wylotu komina wentylacyjnego powinna wynosić 7 metrów nad poziomem gruntu lub 3 metry nad poziomem górnej części zbiornika, w zależności od tego, która z tych wartości jest większa.

<sup>d</sup> Liner – okładzina uszczelniająca umieszczona wewnątrz zbiornika, mająca bezpośredni kontakt z wodorem.

## Chmury par

- podczas lokalizacji instalacji należy zwrócić szczególną uwagę na możliwość przemieszczania się chmury oparów, pochodzące z rozlania, odpowietrzenia lub innej nieszczelności; dodatkowo należy zwrócić uwagę na dominujący kierunek wiatru i topografię terenu.

## Rurociągi, armatura, zawory, regulatory

- rurociągi, złączki, uszczelki, uszczelniacze do gwintów, zawory, regulatory i inne akcesoria powinny być odpowiednie dla wodoru ciekłego lub gazowego, zależnie od przypadku oraz dla odpowiednich ciśnień i temperatur,
- należy zwrócić uwagę na rozszerzalność cieplną i kurczenie się systemów rurociągów, gdy narażone są na wahania temperatury od temperatury otoczenia do temperatury ciekłego wodoru,
- połączenia rur i przewodów rurowych powinny być spawane, lutowane, kołnierzowe lub skręcane. Przewodność elektryczna powinna być utrzymywana w całym systemie, aby instalacja mogła być uziemiona,
- należy zapewnić środki minimalizujące narażenie personelu na kontakt z rurociągami działającymi w niskich temperaturach oraz zapobiegające kontaktowi skroplonego powietrza z rurami, elementami konstrukcyjnymi i nieodpowiednimi powierzchniami dla temperatur kriogenicznych,
- niez izolowane rury i wyposażenie, które w temperaturze poniżej temperatury skraplania powietrza, nie powinny być instalowane nad powierzchniami asfaltowymi lub palnymi materiałami, aby zapobiec kontaktowi z takimi materiałami. Wanny ociekowe mogą być instalowane pod niez izolowanymi rurami i wyposażeniem,
- rurociąg wodorowy powinien być poprowadzony na większej wysokości niż inne rurociągi.

## Przepływ wsteczny

- za regazyfikatorem wodoru montuje się urządzenie zapobiegające przepływowi wstecznemu do instalacji wodorowej.

## Instrumenty i szafki pomiarowe

- przyrządy pomiarowe są zaprojektowane i rozmieszczone w taki sposób, aby w przypadku wycieku lub rozszczelnienia instalacji ryzyko dla personelu było jak najmniejsze poprzez zastosowanie bezpiecznego „szkła” i manometrów z wydmuchiwaną tylną ścianą,
- niektóre przyrządy pomiarowe mogą wykorzystywać systemy wykrywania, które normalnie nie są kompatybilne z środkami ostrożności wymaganymi w przypadku wodoru, m.in. chromatografy gazowe, detektory płomieniowo-jonizacyjne,
- szafki lub obudowy zawierające urządzenia kontrolujące wodór muszą być tak zaprojektowane, aby zapobiec gromadzeniu się gazowego wodoru.

## Regazyfikatory wodoru

- rurociągi łączące powinny być wystarczająco elastyczne, aby zapewnić efekt rozszerzalności i kurczenia się pod wpływem zmian temperatury,
- regazyfikator i jego orurowanie należy odpowiednio zabezpieczyć za pomocą odpowiednich urządzeń nadmiarowych zgodnie z wymaganiami (np. sprężynowe zawory bezpieczeństwa),
- w razie potrzeby należy zainstalować urządzenie, które zapewni, że temperatura zimnego gazu na wylocie z regazyfikatora:
  - nie spowoduje uszkodzenia rurociągów i urządzeń znajdujących się w instalacji,
  - nie wpłynie na proces.

### Wyposażenie i instalacja elektryczna

- montaż i eksploatacja instalacji elektrycznych w instalacjach wodorowych powinna być zgodna z Krajowymi Przepisami, Normami, a zwłaszcza z ostatnią zmianą dyrektywy 79/196/EWG w sprawie ujednoczenia prawa Państw Członkowskich dotyczącą sprzętu elektrycznego przeznaczonego do użytku w miejscach zagrożonych wybuchem stosujących niektóre rodzaje ochrony,
- podczas pracy różnych urządzeń mogą występować iskry, łuki elektryczne lub wysokie temperatury, które mogą spowodować zapłon – nie stosujemy takich urządzeń lub narzędzi,
- cały sprzęt używany i instalowany w granicach instalacji powinien być zgodny z wymaganiami klasyfikacji bezpieczeństwa tego obszaru,
- wszystkie systemy powinny być połączone i skutecznie uziemione, aby zapewnić ochronę przed zagrożeniami elektrycznymi,
- główne elementy wyposażenia, takie jak zbiornik i komin wentylacyjny, należy podłączyć bezpośrednio do punktu uziemienia,
- ładunki elektrostatyczne mogą powstawać podczas mechanicznego oddzielania lub ścierania podobnych lub różnych substancji, a także gdy gaz zawierający krople lub cząstki pyłu przepływa obok powierzchni ciała stałego, np. otworów zaworów, połączeń węży lub rur,
- aby zapobiec gromadzeniu się takich ładunków, należy uziemić instalację,
- wszystkie pojazdy dostawcze należy uziemić przed rozpoczęciem procedury rozładunku,
- pasy napędowe i koła pasowe pomp itp. powinny być wykonane z materiału nieprzewodzącego,
- należy również zwrócić uwagę na dobór materiału na odzież i odzież ochronną, ponieważ większość jest syntetyczna a materiały łatwo generują ładunki elektrostatyczne,
- kompetentna osoba przed oddaniem do eksploatacji instalacji przeprowadza kontrolę, aby upewnić się, że wymagania dotyczące zapobiegania gromadzeniu się elektryczności statycznej na sprzęcie są spełnione.

## 4.2. METODY MINIMALIZOWANIA ZAGROŻEŃ ORAZ ICH SKUTKÓW ZWIĄZANYCH Z MAGAZYNOWANIEM WODORU

Projektowanie oraz eksploatacja zbiorników do magazynowania wodoru, zarówno stacjonarnych i mobilnych (cysterny) wraz z instalacjami towarzyszącymi, wymaga spełnienia określonych warunków bezpieczeństwa, w celu minimalizacji zagrożeń:

### Ogólne zasady

- wyposażenie elektryczne, w tym silnik pompy i oświetlenie przedziałów, powinno być odpowiednie warunków pracy z wodorem m.in. przeciwwybuchowe lub obojętne. Nie dotyczy to instalacji samochodowej,
- wszystkie obudowy powinny być odpowiednio wentylowane,
- wszystkie urządzenia kontrolne powinny być odpowiednio zabezpieczone, aby zminimalizować skutki uszkodzeń spowodowanych uderzeniem,
- linia odprowadzania ciekłego wodoru powinna być wyposażona w dwa zawory ustawione szeregowo, z których jeden powinien być automatycznie załączany,
- na niez izolowanych rurociągach pracujących w temperaturze ciekłego wodoru powietrze może się skraplać. Miski ociekowe należy zainstalować tak, aby umożliwić gromadzenie i odparowywanie skroplonego powietrza,
- konstrukcja i lokalizacja tacy ociekowej powinny być takie, aby zapobiegać spływaniu skroplonego powietrza na sprzęt i minimalizować ryzyko opadania skroplonego powietrza na nawierzchnie asfaltowe,
- należy zwrócić szczególną uwagę na odizolowanie zbiorników i rurociągów ciekłego wodoru, które mogą być zimne, od urządzeń nieprzeznaczonych do pracy w niskiej temperaturze np. podwozia pojazdów lub gumy, tworzyw sztucznych, np. okablowanie elektryczne itp.,
- cysterna lub zbiornik mobilny powinny być wyposażone w awaryjny zawór odcinający.

### Ostrzeżenia i tabliczki ostrzegawcze

- produkt w cysternie, kontenerze cysternie lub zbiorniku magazynowym powinien być wyraźnie zidentyfikowany zgodnie z ADR i/lub odpowiednimi przepisami krajowymi,
- wszystkie zawory i wyposażenie powinny być indywidualnie oznakowane zgodnie z określonym procesem i schematem oprzyrządowania (P&ID<sup>e</sup>), który jest na stałe umieszczony na pojeździe lub sąsiedztwie zbiornika magazynowego.

### Złącza do węży

- należy unikać stosowania adapterów złączy do węży. Należy używać jedynie odpowiadających sobie typem i rodzajem dedykowanych złączy.

### Obwody bezpieczeństwa

---

<sup>e</sup> P&ID -piping and instrumentation diagram/drawing.



- naczynie wewnętrzne zbiornika powinno być chronione przed nadciśnieniem za pomocą podwójnego systemu bezpieczeństwa,
- wszystkie obwody rurociągów, w których może gromadzić się ciecz, muszą być wyposażone w urządzenie upustowe o odpowiednim rozmiarze i ciśnieniu otwarcia,
- rurociągi ze wszystkich otworów wentylacyjnych należy poprowadzić do komina wentylacyjnego, z wyłączeniem wspomnianych powyżej urządzeń nadmiarowych,
- wszystkie pojazdy muszą być wyposażone w gaśnicę zgodnie z przepisami ADR (nr 10240).

## 5. ANALIZA JAKOŚCIOWA W PROCESIE PROJEKTOWYM DLA WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

### 5.1. ZAGADNIENIA DOTYCZĄCE SYSTEMÓW TECHNICZNYCH (W TYM ZAŁOŻENIA ZWIĄZANE Z ROZMIESZCZENIEM CZUJNIKÓW ORAZ INNYMI METODAMI MONITOROWANIA ZAGROŻEŃ)

Istotnym zagadnieniem w obszarze systemów technicznych przy magazynowaniu wodoru jest jego właściwe zabezpieczenie przed możliwością niekontrolowanego wycieku wodoru. Tace wychwytowe wodoru zwykle występują jako część instalacji wodorowych, np. razem z elektrolizerami lub systemami dystrybucji wodoru, lub w rozwiązaniach mobilnych (zbiorniki, cysterny).

Do głównych urządzeń zabezpieczających systemy magazynowania wodoru zaliczamy<sup>17</sup>:

- urządzenia obniżające ciśnienie (Pressure Relief Devices),
- urządzenia obniżające ciśnienie i temperaturę są wymagane do ochrony zbiorników magazynowych i innego wyposażenia, a także rurociągów i przyrządów przed ciśnieniem wyższym niż te, dla których zostały zaprojektowane,
- urządzenia ograniczające ciśnienie (PRD<sup>f</sup>) są wymagane w większości systemów sprężonego gazu i zbiorników magazynowych. PRD ma na celu uwolnienie ciśnienia, aby zapobiec pęknięciu lub rozerwaniu zbiornika,
- termiczne urządzenia obniżające ciśnienie (TPRD<sup>g</sup>) są wymagane dla kompozytowych zbiorników magazynowych i wszelkich innych systemów, w których zdolność elementu do wytrzymywania ciśnienia może być zagrożona przez ciepło lub ogień. TPRD ma na celu odpowietrzenie zawartości, zanim butla lub element może zostać osłabiony przez ciepło lub ogień.

Niezbędne jest też wykonywanie testów bezpieczeństwa<sup>17</sup> np.:

- test oddziaływania pożaru musi wykazać, że zbiornik odgazuje się przez PRD/TPRD bez ponownego zamykania i nie ulegnie uszkodzeniu pod wpływem 20-minutowego oddziaływania pożaru,
- test na rozerwanie hydrostatyczne musi wykazać, że ciśnienie, przy którym zbiornik pęka, zwykle przekracza 2,25 razy ciśnienie robocze,
- test z cyklicznymi zmianami ciśnienia otoczenia, musi wykazać, że zbiorniki wodoru nie ulegną uszkodzeniu przed osiągnięciem 11 250 cykli napełniania (co odpowiada 15-letniemu okresowi użytkowania w ciężkich pojazdach użytkowych),

<sup>f</sup> PRD – ang. pressure relief device, zawór bezpieczeństwa.

<sup>g</sup> TPRD - thermal pressure relief device, termiczny zawór bezpieczeństwa.

- test penetracji, musi wykazać, że zbiornik nie może pęknąć, gdy pocisk o średnicy 7,62 mm lub większej całkowicie przebije jego ścianę,
- test szczelności przed pęknięciem musi wykazać, że zbiornik nie ulegnie awarii z powodu wycieku lub przekroczenia liczby cykli napełniania (11 250 cykli<sup>18</sup>).

## 5.2. ZAGADNIENIA ZWIĄZANE Z WPŁYWEM WODORU NA INFRASTRUKTURĘ I OTOCZENIE ORAZ NA CZŁOWIEKA

Zagrożenia związane z ciekłym wodorem:

- zagrożenie ekstremalnym zimnem - ciekły wodór i związane z nimi zimne opary i gazy mogą powodować na skórze efekty podobne do oparzeń termicznych. Krótkie ekspozycje, które nie miałyby wpływu na skórę twarzy lub dłoni, mogą uszkodzić delikatne tkanki, takie jak oczy. Długotrwałe narażenie skóry lub kontakt z zimnymi powierzchniami może spowodować odmrożenia. Skóra wydaje się woskowożółta. Na początku nie odczuwa się bólu, ale potem, kiedy zmrożona tkanka się „rozmrza” ból staje się intensywny. Niezabezpieczona skóra może przykleić się do metalu schłodzonego ciekłym wodorem. Skóra może się rozerwać podczas odrywania. Nawet materiały niemetaliczne są niebezpieczne w dotyku w niskich temperaturach. Długotrwałe oddychanie bardzo zimnym powietrzem może uszkodzić płuca,
- zagrożenie uduszeniem - kiedy ciekły wodór tworzy gaz, jest on bardzo zimny i zwykle cięższy od powietrza. Ten zimny, ciężki gaz nie rozprasza się zbyt dobrze i może gromadzić na poziomie „0”, lub we wszelkiego rodzaju zagłębieniach i kanałach. Wodór nie jest toksyczny, jednak z miejsc niżej położonych. Gdy nie ma wystarczającej ilości powietrza lub tlenu, może dojść do uduszenia i śmierci. Małe ilości cieczy mogą odparować do bardzo dużych objętości gazu (z 1 dm<sup>3</sup> ciekłego wodoru po odparowaniu powstaje 790 dm<sup>3</sup> gazowego wodoru).

Ogólne zagrożenia związane z cieczami kriogenicznymi<sup>19</sup>:

- zagrożenie pożarowe - łatwopalne gazy, takie jak wodór, metan, tlenek węgla i skroplony gaz ziemny, mogą się zapalić lub eksplodować. Szczególnie niebezpieczny jest wodór. Tworzy łatwopalne mieszaniny z powietrzem w szerokim zakresie stężeń. Bardzo łatwo się też zapala,
- powietrze wzbogacone w tlen - podczas przesyłania ciekłego azotu przez nieizolowane metalowe rury powietrze otaczające system kriogeniczny może się skraplać. Azot, który ma niższą temperaturę wrzenia niż tlen, odparuje jako pierwszy. To parowanie może pozostawić na powierzchni kondensat wzbogacony w tlen, co może zwiększyć palność lub łatwopalność materiałów w pobliżu systemu, tworząc warunki potencjalnie wybuchowe. Urządzenia zawierające płyny kriogeniczne muszą być trzymane z dala od materiałów palnych, aby zminimalizować potencjalne zagrożenie pożarowe,
- zagrożenie płynnym tlenem - ciekły tlen zawiera 4000 razy więcej objętościowo tlenu niż zwykłe powietrze. Materiały zwykle uważane za niepalne (stal węglowa i nierdzewna, żeliwo, aluminium, cynk, teflon (PTFE) itp.) mogą palić się w obecności ciekłego tlenu. Wiele materiałów organicznych może reagować wybuchowo, zwłaszcza jeśli powstaje łatwopalna mieszanina. Odzież spryskana lub nasączona ciekłym tlenem może pozostawać wysoce łatwopalna przez wiele godzin,
- kruchość - guma, plastik i stal węglowa to tylko niektóre przykłady materiałów, które mogą stać się kruche i pęknąć przy bardzo niewielkim obciążeniu. Należy unikać używania tych materiałów podczas pracy z cieczami kriogenicznymi. Jeśli używane są te materiały, przed użyciem należy przeprowadzić kontrolę na ich odporność.

### 5.3. TECHNIKI INŻYNIERSKIE: SCENARIUSZE KRYZYSOWE (W UJĘCIU JAKOŚCIOWYM I ILOŚCIOWYM)

Inżynieria bezpieczeństwa wodoru jest definiowana jako zastosowanie nauki i inżynierii oraz zasad ochrony życia, mienia i środowiska przed niekorzystnymi skutkami wypadków z udziałem wodoru<sup>20</sup>. Pomimo postępu w zakresie bezpieczeństwa wodoru formalnie nadal brakuje nadrzędnej metodologii opartej na wynikach w celu przeprowadzania procedur BHP. Procedury BHP obejmują ramy projektowe i podsystemy techniczne. Ramy projektowe opracowane na Uniwersytecie w Ulsterze, są podobne do brytyjskiej normy BS7974 w zakresie stosowania inżynierii bezpieczeństwa pożarowego do projektowania budynków<sup>20</sup>. Standard ten jest rozszerzany o zagadnienia oddające specyfikę zjawisk związanych z bezpieczeństwem wodoru, w tym między innymi niedostateczne rozprężenie wysokiego ciśnienia, wycieki i dyspersja, samozapłon nagłego uwolnienia wodoru do powietrza, duży pęd - pożary odrzutowe, deflagracje i detonacje, techniki łagodzenia, m.in. odpowietrzanie deflagracji i wentylacja naturalna/wymuszona itp. Inżynieria bezpieczeństwa wodoru składa się z trzech głównych etapów.

W pierwszej kolejności przeprowadzany jest przez zespół jakościowy przegląd (rewizja) projektu (QDR<sup>h</sup>), w skład zespołu może wchodzić właściciel, inżynier bezpieczeństwa, projektant, przedstawiciel właściwych organów, m.in. służb ratunkowych i innych zainteresowanych stron. Zespół definiuje scenariusze wypadków, sugeruje próbne projekty bezpieczeństwa i formułuje kryteria akceptacji. Po drugie, ilościowa analiza bezpieczeństwa wybranych scenariuszy i projektów prób jest przeprowadzana przez wykwalifikowanych inżynierów ds. bezpieczeństwa wodorowego przy użyciu najnowocześniejszej wiedzy w dziedzinie nauki i inżynierii bezpieczeństwa wodorowego oraz zatwierdzonych modeli i narzędzi. Po trzecie, wydajność systemu wodorowego w ramach próbnych projektów bezpieczeństwa jest oceniana na podstawie z góry określonych kryteriów akceptacji. Jakościowy przegląd projektu to proces oparty na doświadczeniu i wiedzy zespołu. Pozwala swoim członkom ustanowić szereg strategii bezpieczeństwa. W idealnym przypadku QDR należy przeprowadzić na wczesnym etapie procesu projektowania i w sposób systematyczny, tak aby wszelkie istotne ustalenia i istotne elementy można było włączyć do projektu aplikacji lub infrastruktury przed opracowaniem rysunków wykonawczych. W praktyce jednak proces QDR może wymagać pewnych iteracji, gdy proces projektowania przechodzi od ogólnej koncepcji do bardziej szczegółowych etapów projektowania. Cele bezpieczeństwa powinny zostać określone podczas QDR. Powinny one być odpowiednie do konkretnych aspektów projektu systemu, ponieważ wodorową inżynierię bezpieczeństwa można wykorzystać albo do opracowania kompletnej strategii bezpieczeństwa wodorowego, albo do uwzględnienia tylko jednego aspektu projektu. Głównymi celami bezpieczeństwa wodorowego są bezpieczeństwo życia, kontrola strat i ochrona środowiska. Zespół QDR powinien opracować jeden lub więcej próbnych projektów bezpieczeństwa, biorąc pod uwagę wybrane scenariusze wypadków. Różne projekty mogą spełniać te same cele w zakresie bezpieczeństwa i powinny być porównywane ze sobą pod względem opłacalności i zastosowania. W pierwszej kolejności istotne jest, aby projekty prób ograniczały zagrożenia poprzez wdrażanie środków zapobiegawczych oraz zapewniały zmniejszenie dotkliwości i częstotliwości konsekwencji. Chociaż wodorowa inżynieria bezpieczeństwa zapewnia pewien stopień swobody, podczas definiowania projektów próbnych należy w pełni przestrzegać odpowiednich przepisów<sup>20</sup>.

---

<sup>h</sup> QDR – z ang. Qualitative Design Review.

Zespół QDR musi ustalić kryteria akceptacji, na podstawie których można ocenić działanie projektu. Można zastosować trzy główne metody: deterministyczną, porównawczą i probabilistyczną. Zespół QDR może, w zależności od projektów próbnych, zdefiniować kryteria akceptacji dla wszystkich trzech metod. Zespół QDR powinien dostarczyć zestaw wyników jakościowych do wykorzystania w analizie ilościowej:

- wyniki przeglądu architektonicznego,
- cele bezpieczeństwa wodoru,
- znaczące zagrożenia i związane z nimi zjawiska,
- specyfikacje scenariuszy do analizy,
- jeden lub więcej projektów próbnych,
- kryteria akceptacji i proponowane metody analizy.

Po przeprowadzeniu jakościowego przeglądu projektu, zespół powinien zdecydować, który projekt próbny będzie prawdopodobnie optymalny. Następnie zespół powinien zdecydować, czy analiza ilościowa jest konieczna do wykazania, że projekt spełnia cele bezpieczeństwa wodoru. Po QDR można przeprowadzić analizę ilościową przy użyciu podsystemów technicznych (TSS), w których różne aspekty analizy można określić ilościowo za pomocą badania deterministycznego lub badania probabilistycznego. Proces kwantyfikacji poprzedzony jest procedurą QDR z dwóch głównych powodów. Po pierwsze, aby upewnić się, że problem jest w pełni zrozumiały, a analiza dotyczy odpowiednich aspektów systemu bezpieczeństwa wodoru. Po drugie uprościć problem i zminimalizować wymagany wysiłek obliczeniowy. Ponadto zespół QDR powinien zidentyfikować odpowiednie metody analizy spośród:

- prostych obliczeń inżynierskich; symulacji CFD<sup>21</sup>,
- prostych badań probabilistycznych; pełne badanie probabilistyczne itp.

Badanie deterministyczne z wykorzystaniem kryteriów porównawczych będzie generalnie wymagało mniej danych i zasobów niż podejście probabilistyczne i prawdopodobnie będzie najprostszą metodą osiągnięcia akceptowalnego projektu. Pełne badanie probabilistyczne może być uzasadnione tylko wtedy, gdy przyjmuje się zasadniczo nowe podejście do projektowania systemów i instalacji wodorowych lub praktyki bezpieczeństwa wodoru. Analiza może być połączeniem niektórych elementów deterministycznych i niektórych probabilistycznych. Po przeprowadzeniu analizy ilościowej wyniki należy porównać z kryteriami akceptacji określonymi podczas QDR.

Można rozważyć trzy podstawowe rodzaje podejścia, aby uzyskać dostęp do działania systemu bezpieczeństwa na podstawie kryteriów<sup>20</sup>:

- podejście deterministyczne pokazuje, że na podstawie początkowych założeń określony zestaw warunków nie wystąpi,
- podejście porównawcze pokazuje, że projekt zapewnia poziom bezpieczeństwa równoważny temu w podobnych systemach i/lub jest zgodny z normami,
- podejście probabilistyczne pokazuje, że ryzyko wystąpienia danego zdarzenia jest akceptowalnie niskie, np. równe lub niższe od ustalonego ryzyka dla podobnych istniejących systemów.

Jeśli żaden z projektów próbnych opracowanych przez zespół QDR nie spełnia określonych kryteriów akceptacji, QDR i proces kwantyfikacji należy powtarzać, aż strategia bezpieczeństwa wodorowego spełni kryteria akceptacji i inne wymagania projektowe. Podczas rekonstruowania QDR można rozważyć kilka opcji zgodnie z zaleceniami<sup>20</sup>:

- opracowanie dodatkowych projektów badań,

- przyjęcie bardziej dyskryminującego podejścia projektowego, np. stosowanie technik deterministycznych zamiast badań porównawczych,
- ponowna ocena celów projektowych, m.in., jeśli koszt środków bezpieczeństwa związanych z wodorem w celu zapobiegania stratom materialnym przewyższa potencjalne korzyści.

Po znalezieniu zadowalającego rozwiązania, wynikająca z tego strategia powinna zostać w pełni udokumentowana. W zależności od specyfiki i zakresu badania sprawozdanie z wyników i ustaleń może zawierać następujące informacje podobne do wymogów<sup>20</sup>:

- cele badania,
- pełny opis systemu/infrastruktury,
- wyniki QDR,
- analiza ilościowa (założenia; osądy inżynierskie; procedury obliczeniowe; walidacja metodologii; analiza wrażliwości),
- ocena wyników analiz pod kątem kryteriów,
- wnioski (strategia bezpieczeństwa wodoru; wymagania dotyczące zarządzania; wszelkie ograniczenia w stosowaniu),
- odniesienia (np. rysunki, dokumentacja projektowa, literatura techniczna itp.). Aby uprościć ocenę projektu, proces kwantyfikacji podzielono na kilka podsystemów technicznych.

Przy opracowywaniu poszczególnych podsystemów technicznych należy uwzględnić następujące wymagania:

- podsystemy techniczne powinny łącznie, w miarę możliwości, obejmować wszystkie możliwe aspekty inżynierii bezpieczeństwa wodoru,
- podsystemy techniczne powinny być zrównoważone między ich wyjątkowością lub możliwością indywidualnego wykorzystania a ich komplementarnością i synergią z innymi systemami,
- podsystemy techniczne powinien stanowić wybór najnowocześniejszych w danej dziedzinie bezpieczeństwa wodorowego, zatwierdzonych narzędzi inżynierskich, w tym korelacji empirycznych i półempirycznych oraz współczesnych narzędzi, takich jak modele i kody CFD,
- podsystemy techniczne powinny być elastyczne, aby umożliwić aktualizację istniejących lub wykorzystanie nowych odpowiednich i zatwierdzonych metod, odzwierciedlając najnowsze postępy w nauce i inżynierii bezpieczeństwa wodoru.

Podsystemy techniczne dotyczące rodzaju zdarzeń kryzysowych, które mogą być wzięte pod uwagę w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa, to np.: inicjacja uwalniania i dyspersji, zapłon, deflagracje i detonacje, pożary, wpływ na ludzi, konstrukcje i środowisko, techniki łagodzenia skutków, interwencja służb ratunkowych.

## 6. PODSUMOWANIE

Inżynieria bezpieczeństwa w obszarze magazynowania wodoru jest bardzo ważnym aspektem, zarówno przy przechowywaniu wodoru w postaci gazowej, ciekłej i stałej. Ważną rolę odgrywa tu zjawisko korozji wodorowej, które należy zawsze brać pod uwagę w przypadku kontaktu wodoru z materiałami o strukturze krystalicznej (np. stal). Szczególną uwagę należy zwrócić również na aspekt związany ze znacznym obniżeniem wytrzymałości mechanicznej materiałów w zakresie temperatury skraplania wodoru (wykorzystywane są materiały takie jak stale austenityczne czy stopy aluminium<sup>22</sup>).



Magazynowanie wodoru w postaci alternatywnej, takiej jak wodorki metali, również niesie ze sobą zagrożenia związane z ich reaktywnością (głównie z wilgocią oraz tlenem zawartymi w powietrzu). Wszystkie te aspekty należy brać pod uwagę zarówno przy wykorzystaniu lepiej poznanych metod magazynowania wodoru oraz przy pracach rozwojowych związanych z tym obszarem.

Właściwe zaplanowanie szeregu działań, obejmujących kształcenie kadr, regulacje prawne, normy związane z inżynierią bezpieczeństwa technologii związanych z magazynowaniem wodoru, jest jednym z kluczowych zagadnień związanych z sukcesem gospodarki wodorowej.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- <sup>1</sup> Barthelemy H., "Hydrogen storage technologies: compatibility of materials with hydrogen.," *Teaching materials of the 4th ISCARW*, 2009.
- <sup>2</sup> U.S. Energy Information Administration (EIA)"The Basics of Underground Natural Gas Storage," 16-11-2015, <https://www.eia.gov/naturalgas/storage/basics/>, dostęp: 28-03-2023.
- <sup>3</sup> Szymak P., „Metody magazynowania wodoru w platformach podwodnych,” *Logistyka*, str. 2694-2702, 2013.
- <sup>4</sup> Pawelczyk E. et al.: Recent Progress on Hydrogen Storage and Production Using Chemical Hydrogen Carriers, *Energies* 2022, 15, 4964. str. 5, <https://doi.org/10.3390/en15144964>.
- <sup>5</sup> Bytniewska A., *Gazeta Prawna*, <https://www.gazetaprawna.pl/wiadomosci/kraj/artykuly/8641660,wodor-projekt-zmian-sejm-prawo.html> dostęp:28-03-2023.
- <sup>6</sup> Molokov V. et al., "Dispersion of permeated hydrogen in residential garages and assessment of explosion hazard for small leaks" in 6th International Seminar on Fire and Explosion, 2010.
- <sup>7</sup> EIGA, "Document 06/02/E:2002, Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen," European Industrial Gas Association, Bruksela, 2002.
- <sup>8</sup> Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage, and transportation. Safety standard for hydrogen and hydrogen systems.," NASA Office of Safety and Mission Assurance, NSS 1740.16,1997.
- <sup>9</sup> Hammer W., *Occupational Safety Management and Engineering*, 4th edition, New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs ISBN 0-13-629379-4, 1989.
- <sup>10</sup> Wolański P., Wójcicki S., "Mechanizm powstawania wybuchu przy nadkrytycznym wpływie paliwa gazowego do atmosfery," *Archiwum Procesów Spalania*, vol. 2, no. 3, str. 141-155, 1971.
- <sup>11</sup> Oleszczak P., Wolański P.: "Ignition during hydrogen release from high pressure into the atmosphere", *Eight International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions*, Volume 20, Issue 6 (2010), str. 539-550.
- <sup>12</sup> Surowska B., *Wybrane zagadnienia z korozji i ochrony przed korozją*, Politechnika Lubelska, Lublin 2009, 83-88110-54-3, str. 20-45.
- <sup>13</sup> Saraev Yu N et al., Influence of low temperature on structure and impact strength of structural steels welded joints. 2020 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1546 012068.
- <sup>14</sup> . Barthelemy, "Hydrogen storage technologies, compatibility of materials with hydrogen. Joint European Summer School for fuel cell and hydrogen technology.," 06-2021 <https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2021/06/Lecture-4-slides.pdf>, dostęp 28-03-2023.

---

<sup>15</sup> Hugh R. et al. "Potential Structural Material Problems In A Hydrogen Energy System", Nasa Technical Memorandu, 1955 r., str.7.

<sup>16</sup> Garceau N. M., et al.: Performance test of a 6 L liquid hydrogen fuel tank for unmanned aerial vehicles, 2015 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 101 012130, str. 2.

<sup>17</sup> Hydrogen storage, European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders, European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.

<sup>18</sup> Norma ISO 15869.3.

<sup>19</sup> Safe handling of cryogenic substances, Environmental Health and Safety, University of Washington, 2017.

<sup>20</sup> Molkov, V et al., "Hydrogen safety engineering framework and elementary design safety tools.", *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 11, str. 6268-6285., 2014.

<sup>21</sup> H. M., "Simulation of the Fast Filling of Hydrogen Tanks," in *The 3rd International Conference on Hydrogen Safety*, 2009.

<sup>22</sup> HydrogenTools, <https://h2tools.org/bestpractices/material-compatibility> data uzyskania dostępu: 10-06-2023, zarchiwizowano <http://archive.today/4C8Xx>