



Łukasiewicz

Instytut Organizacji i Zarządzania
w Przemśle ORGMASZ



BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH

II - INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA
TECHNOLOGII WODOROWYCH

– OGÓLNE ZAGADNIENIA INŻYNIERYJNE

BEZPIECZEŃSTWO W TECHNOLOGIACH WODOROWYCH

II

INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA TECHNOLOGII WODOROWYCH – OGÓLNE ZAGADNIENIA INŻYNIERYJNE

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 Przemśle ORGMASZ
ul. Żelazna 87 00-879 Warszawa

SPIS TREŚCI

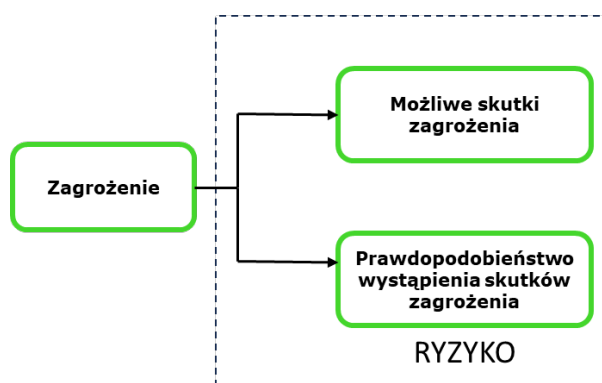
1. Wstęp – cel opracowania	3
2. Wodorowa inżynieria bezpieczeństwa, przegląd stanu techniki, geneza, procedury... 3	
2.1. Geneza i znaczenie wodorowej inżynierii bezpieczeństwa.....	4
2.2. Analiza obowiązujących ogólnych przepisów prawa, standardów, wytycznych oraz kryteriów oceny.....	6
2.3. Techniki inżynierskie w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa	6
2.4. Analiza jakościowa w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa	17
2.5. Analiza jakościowa w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa w obszarze celów.....	21
2.6. Analiza ilościowa w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa.....	22
2.7. Technologie wodorowe, efekt środowiskowy	22
2.8. Techniki inżynierskie: scenariusze kryzysowe	25
3. Podsumowanie	29
Bibliografia	30

1. WSTĘP – CEL OPRACOWANIA

Można przyjąć, że bezpieczeństwo jest to zapewnienie akceptowalnego poziomu ryzyka w poszczególnych obszarach, zdrowia, życia, strat w majątku, środowisku naturalnym etc. Tak rozumiane bezpieczeństwo jest to iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia kryzysowego oraz skali strat, które może generować brak uwzględnienia danego czynnika ryzyka. Bezpieczeństwo procesowe jest to ogół zagadnień dotyczących obszaru technologicznego. Natomiast bezpieczeństwo funkcjonalne jest podzbiorem tego zagadnienia i obejmuje aktywność zapobiegania potencjalnym zagrożeniom poprzez odpowiednio zaprojektowane oraz eksploatowane produkty i procesy.

Bezpieczeństwo procesowe obejmuje trzy główne etapy z cyklu życia produktu czy procesu. Są to: faza projektowa, eksploatacyjna oraz likwidacyjna¹.

Schemat dotyczący identyfikacji zagrożeń przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1 Identyfikacja zagrożeń².

Właściwości fizykochemiczne wodoru, krytyczne ze względu na bezpieczeństwo, to głównie³:

- palność i wybuchowość,
- przenikalność i związana z nią kruchość wodorowa,
- ekstremalnie niskie temperatury,
- wysokie ciśnienie przechowywania i transportu,
- mieszanie się wodoru z innymi czynnikami,
- właściwości faz skupienia wodoru (gazowa, ciekła, błoto wodorowe).

WODOROWA INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA, PRZEGLĄD STANU TECHNIKI, GENEZA, PROCEDURY

Wodór wymaga stosowania dokładnych analiz bezpieczeństwa na każdym etapie, tj. produkcji, transportu, przechowywania i spalania (głównie, jako substrat reakcji). W poniższym rozdziale przedstawione zostały zasady wodorowej inżynierii bezpieczeństwa w ujęciu ogólnym. Należy jednak dodać, że do całkowitego usystematyzowania wodorowej inżynierii bezpieczeństwa niezbędne jest dostosowanie obowiązującego prawa do szybko rozwijających się technologii wodorowych.

Wodór wymaga stosowania dokładnych analiz bezpieczeństwa na każdym etapie, tj. produkcji, transportu, przechowywania i spalania (głównie, jako substrat reakcji). W poniższym rozdziale przedstawione zostały zasady wodorowej inżynierii bezpieczeństwa w ujęciu ogólnym. Należy jednak dodać, że do całkowitego usystematyzowania wodorowej

inżynierii bezpieczeństwa niezbędne jest dostosowanie obowiązującego prawa do szybko rozwijających się technologii wodorowych.

1.1. GENEZA I ZNACZENIE WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

Wodór ze względu na swoją charakterystykę wymaga uważnego podejścia do kwestii bezpieczeństwa. Obecna sytuacja legislacyjna nie wyczerpuje zagadnień bezpieczeństwa, ponieważ w przepisach istnieją liczne luki, jednak trwają prace nad uregulowaniem polskiego i europejskiego otoczenia prawnego w tym obszarze.

Na uwagę zasługują tutaj powołanie w 2017 roku przez organizację *Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking* (FCH 2 JU) Europejskiego Panelu Bezpieczeństwa Wodorowego (EHSP), jako odpowiedź na konieczność wypracowania wodorowej kultury bezpieczeństwa. FCH 2 JU jest organizacją publiczno-prywatną wspierającą badania, rozwój technologiczny oraz demonstracje związane z wodorowymi technologiami energetycznymi, głównie w obszarze ogniw paliwowych (RTD^a)⁴ (w 2021 r. powołano „Clean Hydrogen Partnership”, jako kontynuatora działań⁵). Jednym z wniosków z prac finansowanych z tego programu są informacje dotyczące bezpieczeństwa użytkowania ogniw paliwowych w zamkniętym pomieszczeniu. Bezpieczeństwo wodorowe wymaga szczególnej uwagi w otoczeniu zamkniętym ze względu na możliwość wystąpienia wysokich stężeń wodoru w powietrzu, które mogą być przyczyną wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych. Prace nad bezpieczeństwem wodorowym w niektórych obszarach są dopiero rozwijane.

Wspomniane już obszary właściwości fizykochemicznych wodoru, wymagające zastosowania inżynierii bezpieczeństwa, to:

- palność i wybuchowość – ze względu na niską temperaturę oraz energię zapłonu,
- mały rozmiar cząsteczki i związane z nim zjawiska korozyjne, tzw. kruchość wodorowa – wodór, jako pierwiastek o najniższej masie atomowej ma silne właściwości dyfuzyjne m.in. do ścian zbiorników (rysunek 2), implikując w ten sposób zjawisko korozji powodowanej przez atomy wodoru w obszarze sieci krystalicznej żelaza. Wynikający z tego wzrost ciśnienia oraz naprężeń w strukturze stali, może powodować zmniejszenie plastyczności, pękanie naprężeniowo-siarczkowe struktury, powstawianie pęcherzy wodorowych (rybie oczy, płatki śnieżne)⁶, czy zjawisko tzw. wysokotemperaturowego ataku wodorowego (*HTHA*^b), które polega na uszkodzeniu międzykrystalicznego materiału urządzeń narażonych na działanie wodoru w podwyższonych temperaturach (>200°C)⁷,
- niskie temperatury w przypadku skroplonego wodoru, skraplanie gazów jest podstawowym sposobem uzyskiwania niskich temperatur. Technologie kriogeniczne^c wymagają stosowania inżynierii bezpieczeństwa ze względu na oddziaływanie niskich temperatur na otoczenie,
- wysokie ciśnienie przechowywania i transportu (w przypadku wodoru sprężonego) – infrastruktura związana z rozwiązaniami ciśnieniowymi, może powodować ryzyka związane z rozszczelnieniem instalacji,

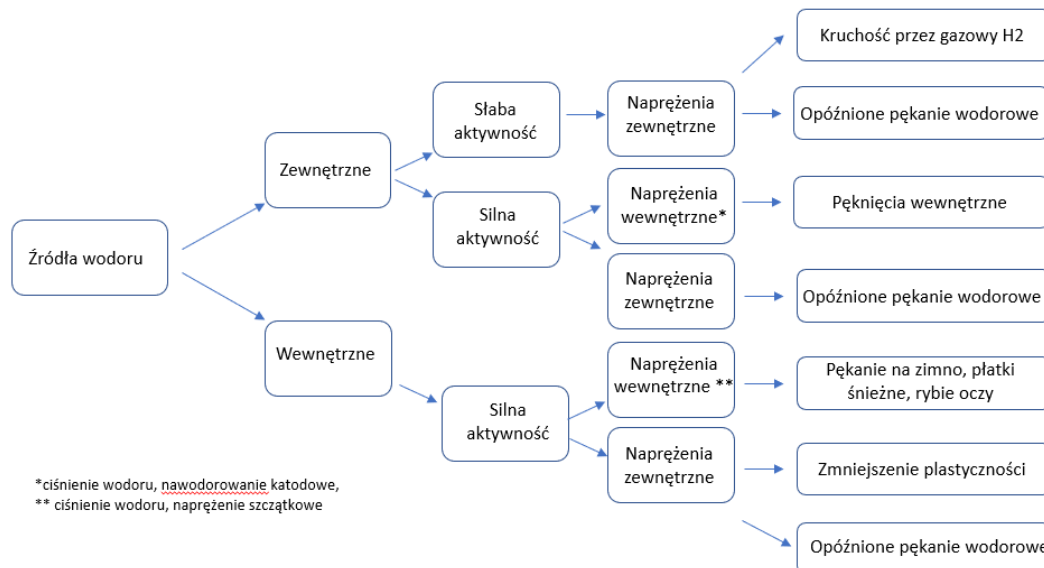
^a RTD – z ang. Research, Technology Development, Demonstration.

^b HTHA, z ang. High Temperature Hydrogen Attack.

^c kriogenika [gr. *krýos* 'mróz', *génos* 'pochodzenie'], technika wytwarzania i utrzymywania bardzo niskich temperatur, za umowną granicę przyjmuje się temperaturę 120 K (PWN).

- mieszanie się wodoru z czynnikami utleniającymi, wodór jako mieszanina z gazami zawierającymi takie czynniki, np. powietrzem, może powodować dodatkowe ryzyka, chociażby związane z procesem deflagracji i detonacji,
- właściwości wodoru w różnych fazach skupienia (gazowa, ciekła, błoto wodorowe).

Rysunek 2 przedstawia schemat opisujący zjawisko kruchości wodorowej.



Rysunek 2 Kruchość wodorowa, klasyfikacja, opracowanie na podstawie⁸.

Podstawowym elementem zarządzania bezpieczeństwem, w tym technologii wodorowych jest analiza ryzyka wraz z przyjętą metodyką działania (zgodnie z normami oraz dobrą praktyką). Można wyróżnić następujące podejścia do przeprowadzanych analiz⁹:

- podejście podstawowego poziomu – zastosowanie standardowych zabezpieczeń,
- podejście nieformalne – oparte na wiedzy i doświadczeniu ekspertów,
- szczegółowa analiza ryzyka – z wykorzystaniem dostępnych technik analizy ryzyka,
- podejście mieszane powyższych metod.

Obszary, wymagające zastosowania technik zapewnienia bezpieczeństwa, to⁶:

- projektowanie, budowa, eksploatacja oraz likwidacja infrastruktury wodorowej,
- zarządzanie projektami,
- zarządzanie organizacją, w tym budowanie strategii krótko i długoterminowych,
- analizy biznesowe, studia wykonalności,
- proces decyzyjny na każdym poziomie w organizacji.

Proces analizy ryzyka związanej z polityką bezpieczeństwa wymaga przynajmniej⁶:

- kompletnego zdefiniowania kryteriów oceny, kategorii ryzyka oraz ich identyfikacji,
- zebrania wystarczających ilości danych odpowiedniej jakości,
- uwzględnienia ryzyka wtórnego^d,

^d Ryzyko wtórne – ryzyko mogące wystąpić jako odpowiedź na reakcję na ryzyko pierwotne.

- uwzględnienie czynnika ludzkiego,
- jednoznacznej interpretacji wyników analiz.

Dobór narzędzi do kwantyfikacji (analizy) ryzyka jest skorelowany z obszarem zagadnienia, dostępem do danych oraz doświadczeniem zespołu. Właściwym jest, w miarę możliwości, opisanie ryzyk w sposób mierzalny, jednakże nie zawsze jest to możliwe oraz jest to metoda bardziej skomplikowana. Metody analiz ryzyka zostały przedstawione w dalszej części opracowania.

1.2. ANALIZA OBOWIĄZUJĄCYCH OGÓLNYCH PRZEPISÓW PRAWA, STANDARDÓW, WYTYCZNYCH ORAZ KRYTERIÓW OCENY

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 technologii wodorowych ustawy, normy i wytyczne należy traktować interdyscyplinarnie oraz stosować się do wytycznych jednostek odpowiedzialnych za dopuszczenia infrastruktury wodorowej do użytkowania, ponieważ mogą one obejmować one zarówno kwestie wytwarzania, magazynowania, transportu oraz dystrybucji wodoru.

1.3. TECHNIKI INŻYNIERSKIE W WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

Ramy inżynierii bezpieczeństwa zostały opracowane w 1994 roku¹⁰. Główne założenia tej dziedziny inżynierii, to:

- usystematyzowane podejście – regulacje i wytyczne powinny być jasno opisane i wyjaśnione,
- jasno i precyzyjnie zdefiniowane kryteria akceptacji - metody deterministyczne, porównawcze oraz probabilistyczne,
- upraszczanie procedur – podział systemu na podsystemy techniczne analizowane indywidualnie oraz jako część całości systemu,
- wskazania powiązań – zbudowanie siatki powiązań pomiędzy systemem i jego elementami, personelem, użytkownikiem, otoczeniem etc.,
- upewnienie się co do słuszności podejścia do oddziaływania na siebie czynników systemu – niezwykle istotne jest, aby identyfikacja zagrożeń pociągała za sobą przewidywanie maksymalnej ilości możliwych scenariuszy kryzysowych,
- jasne przedstawienie przyjętych kryteriów, metod oceny, identyfikacja źródeł danych – jest to niezwykle istotne w celu zrozumienia raportu przez adresatów na różnych poziomach zarządzania.

Obecnie wiodącą rolę w pracach rozwojowych oraz tworzeniu wytycznych w obszarze wodorowej inżynierii bezpieczeństwa w obszarze technologii, związanych z wodorem, również we współpracy z przemysłem, mają Organizacje takie jak, *European Commission's joint research centre (JRC)*, *International Association for Hydrogen Safety (HySAFE)*, *Fuel, Cell and Hydrogen Undertaking (FCHJU)*, czy sukcesor tego stowarzyszenia *Clean Hydrogen Partnership* oraz *International Energy Agency (Task 31 „Hydrogen Safety”)*.

Główną ogólną strategią bezpieczeństwa w przypadku wycieków wodoru jest zminimalizowanie jego masowego natężenia przepływu i zastosowanie odpowiednich średnic orurowania. Kolejnym krokiem jest zastosowanie zasady swobodnego odpływu „*let it go*”, aby zapobiec gromadzeniu się wodoru i osiągnięciu przez mieszaninę wodorowo-powietrze niebezpiecznego poziomu stężenia.

Norma ISO/TR 15916:2004¹¹ podaje pewne ogólne zalecenia minimalizujące dotkliwość skutków potencjalnej awarii:

- zminimalizować ilość wodoru, który jest przechowywany i wykorzystywany w procesie,
- odizolować wodór od utleniaczy, materiałów niebezpiecznych i niebezpiecznego sprzętu,
- zidentyfikować i w miarę możliwości oddzielić lub wyeliminować potencjalne źródła zapłonu,
- odseparować ludzi i obiekty od potencjalnych skutków pożaru, deflagracji lub detonacji pochodzących z awarii urządzeń wodorowych lub systemów magazynowania,
- umieszczać instalacje wodorowe lub odgazowywać nad innymi obiektami,
- zapobiegać gromadzeniu się mieszanin utleniaczy wodoru w zamkniętych przestrzeniach,
- zminimalizować narażenie personelu na skutki potencjalnych awarii poprzez ograniczenie liczby osób narażonych oraz czasu, w którym personel jest narażony,
- używać osobistego wyposażenia ochronnego,
- używać alarmów i urządzeń ostrzegawczych (w tym detektorów wodoru i pożaru) oraz kontrolować obszar wokół systemu wodorowego,
- praktykować dobre gospodarowanie, takie jak utrzymywanie czystości i utrzymywanie dróg dostępu i ewakuacyjnych,
- przestrzegać zasad bezpiecznej eksploatacji, takich jak praca w parach podczas pracy w niebezpiecznych sytuacjach.

Doświadczenie

Doświadczenie zespołów oraz historyczne zestawienie zdarzeń kryzysowych są kluczowymi czynnikami warunkującymi powodzenie zastosowanych zabezpieczeń oraz procedur bezpieczeństwa. Doświadczenie ma szczególną wagę przy jakościowej ocenie bezpieczeństwa QDR (*Qualitative Design Review*). Wszystkie metody wykorzystywane w inżynierii bezpieczeństwa opierają się w mniejszym lub większym stopniu na wiedzy i doświadczeniu zespołu. Można tutaj wymienić metody stosowane w praktyce inżynierskiej, takie jak:

- metody porównawcze (bazujące na wiedzy o podobnych instalacjach),
- metody indeksowe (metody uwzględniające dynamikę zmian),
- listy kontrolne,
- metody przeglądowe (systematyczny przegląd zagrożeń) oraz analityczne (wykrycie zagrożeń i ilościowa ocena scenariuszy).

Listy kontrolne obejmują zagadnienia mogące wpływać na bezpieczeństwo eksploatacji systemu wodorowego w obszarze otoczenia, w którym realizowany jest proces z udziałem wodoru, a więc dotyczą odpowiedniej części zakładu produkcyjnego czy pozostałej infrastruktury, lub bezpośredniego otoczenia urządzenia, np. zbiornika na wodór, wraz z obszarem dystrybucji wodoru¹², np.:

- zatwierdzenie odpowiedniej dokumentacji przed instalacją systemu,
- obszary monitorowania temperatury, ciśnienia i innych czynników mających wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji,
- zabezpieczenia związane z dostępem do systemu,
- zabezpieczenia procesowe, np. zawory bezpieczeństwa,
- zabezpieczenia przeciwpożarowe, obsługa pożarnicza,

- plany i systemy ewakuacji,
- instrukcje, szkolenia,
- inne niezbędne, wskazane w procesie, analizy ryzyka, zarówno po stronie urządzenia, jak i użytkownika systemu.

W literaturze znajdziemy liczne opracowania bazujące na doświadczeniu czy wiedzy eksperckiej. Jeżeli chodzi o normatywy wybranych metod, oceny ryzyka opisuje norma ISO/EIC 31010 *Risk Management – Risk Assessment Techniques*. Norma ta opisuje trzydzieści jeden metod oceny ryzyka w ujęciu analitycznym wraz z porównaniem tych metod.

Jak wspomniano powyżej, jakościowa analiza ryzyka jest metodą najbardziej powszechną, zrozumiałą oraz możliwą do realizacji w krótkim czasie.

Scenariusze kryzysowe są identyfikowane metodą burzy mózgów lub innymi, niżej opisanymi metodami, takimi jak *HAZOP*, *What-if* itp. Tylko te scenariusze, które są wystarczająco prawdopodobne i mogą jednocześnie stworzyć znaczące zagrożenia są brane pod uwagę. W analizie uwzględnia się również prawdopodobieństwo wystąpienia kolejnych zdarzeń kryzysowych, w tym częstotliwość ich występowania.

- **Analiza Hazard and Operability Study (HAZOP)** - metodę HAZOP stosuje się do identyfikacji scenariuszy zagrożeń mających wpływ na ludzi i środowisko, a także scenariuszy operacyjnych, w przypadku których problemem jest zdolność procesu do funkcjonowania. Pierwotnie została opracowana dla procesów związanych z cieczami i gazami, ale jest również zastosowana w systemach takich jak przenoszenie materiałów, operacje wiertnicze, systemy lotnicze itp. Obecnie jest to najczęściej stosowana metoda w przemyśle,
- **Wstępna analiza zagrożeń (PrHA)** - wstępna analiza zagrożeń identyfikuje zagrożenia procesu i niebezpieczne sytuacje, jakie mogą one powodować. Zazwyczaj PrHA jest używana do oceny i ustalania priorytetów zagrożeń na wczesnym etapie życia procesu jako wstęp do bardziej szczegółowych badań analizy zagrożeń. Na ogół stosuje się go podczas fazy projektu koncepcyjnego lub na etapie badań i rozwoju, gdy dostępnych jest niewiele informacji,
- **Analiza „What-if” (WI)** - analizy WI obejmują zadawanie pytań dotyczących zdarzeń inicjujących potencjalne awarie w celu zidentyfikowania zagrożeń. Zespół dokonujący analizy przeprowadza burzę mózgów zaczynając od przygotowanej listy pytań, choć prawie zawsze pojawiają się dodatkowe pytania i zostają dodane w miarę postępu prac. Czasami stawiane pytania podczas analizy WI są przygotowane tak, jakby powstały, gdyby przeprowadzono analizę HAZOP,
- **Analiza Failure Modes and Effects (FMEA)** - analiza przyczyn i skutków awarii to procedura oceny zagrożeń, w której elementy składowe systemu, mogące ulec awarii, zazwyczaj urządzenia procesowe, są brane pod uwagę w celu ustalenia, czy istniejące zabezpieczenia są wystarczające. Rodzaje awarii opisują sposób wadliwego działania komponentów (np. zjawiska typu: otwarcie, zamknięcie, włączenie, wyłączenie, wycieki itp.). Skutkiem każdego rodzaju awarii jest odpowiedź procesu lub zdarzenie wynikające z awarii komponentów, czyli konsekwencje scenariuszy zagrożeń,
- **Analiza drzewa błędów (FTA)** - analiza drzewa błędów nie jest tak naprawdę porównywalna ze standardowymi metodami. Nie identyfikuje pełnego zestawu scenariuszy zagrożeń dla procesu, a raczej służy do identyfikacji przyczyn konkretnego incydentu (nazywanym zdarzeniem szczytowym) z wykorzystaniem wnioskowania dedukcyjnego. Często jest używana, gdy inne metody analizy wskazują, że dany rodzaj awarii budzi szczególne obawy i potrzebne jest

dokładniejsze zrozumienie jego przyczyn. Jest więc użytecznym uzupełnieniem innych metod analitycznych,

- **Analiza drzewa zdarzeń (ETA)** - analiza drzewa zdarzeń nie jest tak naprawdę porównywalna ze standardowymi metodami. Nie identyfikuje pełnego zestawu scenariuszy zagrożeń dla procesu, a raczej służy do określenia możliwych wyników po sukcesie lub niepowodzeniu działania systemów ochronnych jako skutek wystąpienia danego zdarzenia początkowego i opcjonalnie do obliczenia częstotliwości występowania określonych zdarzeń. Drzewa zdarzeń przedstawiają graficznie przebieg sekwencji zdarzeń rozpoczynających się od zdarzenia początkowego przechodząc do reakcji systemu sterowania i bezpieczeństwa aż skończywszy na skutkach określonej sekwencji zdarzeń,
- **Ilościowa analiza ryzyka (Quantitative Risk Assessment (QRA))** - metoda ta polega na ilościowej ocenie ryzyka. Ocena ryzyka wraz z zarządzaniem ryzykiem są narzędziami służącymi do minimalizacji zagrożeń. Celem QRA jest naukowo uzasadnione i ilościowo określenie możliwości wystąpienia ryzyka oraz zaprojektowanie działań naprawczych tak, by były skuteczne, bezpieczne, efektywne kosztowo, przy jednoczesnym poszanowaniu wymagań prawnych, oraz czynników społecznych, kulturowych oraz etycznych.

Powyżej przedstawiono bliżej tylko niektóre z metod szacowania ryzyka, wybór metody zależy od wymogów normatywnych oraz doświadczenia zespołu projektowego.

Metody analizy ryzyka są dobierane na podstawie kontekstu analizy, dostępnych danych czy źródeł informacji. Stosuje się metody ilościowe, jakościowe lub mieszane.

Metody jakościowe opierają się na wykorzystaniu danych historycznych, tablic, wykresów czy opisów, metody ilościowe wymagają natomiast przeliczeń, matematycznego/numerycznego opracowywania danych, zwykle podstawą są dane prezentowane liczbowo.

Metody jakościowe bazują na szacowaniu ryzyka opartym na dobrych praktykach oraz doświadczeniu. Są to elastyczne metody, których wynikiem jest opisowe rankingowanie ryzyka np. na niskie, średnie i wysokie. Doświadczenie wskazuje na częstsze wykorzystanie metod jakościowych, ponieważ, są łatwiejsze w zrozumieniu oraz mniej kosztowne w przeprowadzeniu. Jednak w związku z ich charakterem mogą one różnić się wypracowanym zakresem oraz czasem wykonania¹³. Analizy jakościowe dostarczają informacji, czy zjawisko wystąpi, a analiza ilościowa pozwala na obliczenie lub przynajmniej wystarczająco precyzyjne oszacowanie, konsekwencji wystąpienia danego zjawiska, poprzez nadanie wartości parametrów opisujących te konsekwencje lub określenie prawdopodobieństwa wystąpienia analizowanego zjawiska. Ograniczeniem metod ilościowych szacowania ryzyka jest ich wrażliwość na jakość danych oraz konieczność użytkowania często zaawansowanych narzędzi do jej przeprowadzenia. Konieczne jest również szerokie zrozumienie tej metody przez zespół przeprowadzający tą analizę oraz osoby gromadzące oraz przekazujące dane do jej wykonania. Można również przeprowadzać analizę szacowania ryzyka wykorzystując metody mieszane.

W tabeli 1 przedstawiono wybrane metody oceny ryzyka oraz ich zastosowanie.

Tabela 1 Metody oceny ryzyka, opracowanie na podstawie¹⁴.

Metody oceny ryzyka			Proces oceny ryzyka				
			Identyfikacja	Analiza ryzyka			Ewaluacja ryzyka
				Konsekwencje	Prawdopodobieństwo	Poziom ryzyka	
1	Burza mózgów	brainstorming	++	-	-	-	-
2	Wywiady ustrukturalizowane lub strukturalizowane częściowo	Structured/semi structured interviews	++	-	-	-	-
3	Metoda delficka	Delphi Method	++	-	-	-	-
4	Lista kontrolna	Checklist	++	-	-	-	-
5	Podstawowa analiza zagrożeń	PHA (Preliminary Hazard Analysis)	++	-	-	-	-
6	Analiza zagrożeń i zdolności operacyjnych	HAZOP (Hazard and Operability Study)	++	++	+	+	+
7	Analiza zagrożeń i krytycznych punktów kontroli	HACCP (hazard analysis and critical control points)	++	++	-	-	++
8	Ocena ryzyka środowiskowego	TA (Toxicity Assessment)	++	++	++	++	++
9	Metoda „co, jeśli?”	What If?	++	++	++	++	++
10	Analiza scenariuszowa	Scenario Analysis	++	++	+	+	+
11	Analiza wpływu na biznes	Business Impact Analysis	+	++	+	+	+
12	Analiza przyczyn źródłowych	Root Cause Analysis	-	++	++	++	++
13	Analiza rodzajów i skutków możliwych błędów	FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)	++	++	++	++	++
14	Analiza drzewa błędów	Fault Tree Analysis	+	-	++	+	+
15	Analiza drzewa zdarzeń	Event Tree Analysis	+	++	+	+	-
16	Analiza przyczyn i konsekwencji	Cause and Consequence Analysis	+	++	++	+	+
17	Analiza przyczynowo-skutkowa	Cause and Effect analysis	++	++	-	-	-
18	Analiza warstw ochrony	Layer Protection Analysis	+	++	+	+	-
19	Analiza drzewa decyzji	Decision Tree Analysis	-	++	++	-	-
20	Ocena niezawodności człowieka	Human Reliability Analysis	++	++	++	++	-
21	Analiza muchy	Bow Tie Analysis	-	+	++	++	-
22	Metoda konserwacji ukierunkowania niezawodności	Reliability centered Analysis	++	++	++	++	++

Metody oceny ryzyka			Proces oceny ryzyka				
			Identyfikacja	Analiza ryzyka			Ewaluacja ryzyka
				Konsekwencje	Prawdopodobieństwo	Poziom ryzyka	
23	Zapowiedź analizy i zapowiedź analizy obwodu	SA/SCA (Sneak Analysis & Sneak Circuit Analysis)	+	-	-	-	-
24	Analiza Markova	Markov Analysis	+	++	-	-	-
25	Symulacja Monte Carlo	Monte Carlo Simulation	-	-	-	-	++
26	Statystyki i sieci Bayesa	Bayesian Statistics and Bayes nets)	-	++	-	-	-
27	Krzywe wyniku fałszywie ujemnego	FN curve	+	++	++	+	++
28	Wskaźniki ryzyka	Risk Index	+	++	++	+	++
29	Matryca skutek / prawdopodobieństwo	Consequence/Probability Matrix	++	++	++	++	+
30	Analiza koszty/korzyści	Cost/Benefits Analysis	+	++	+	+	+
31	Analiza wielokryterialnej decyzji	Multiple-criteria Decision Analysis	+	++	+	+	+

Numeryczne metody obliczeniowe mechaniki płynów (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) są stosowane w analizach związanych z bezpieczeństwem wodoru, ponieważ mogą one dostarczyć istotnych informacji dla oceny zagrożeń i ryzyk związanych z technologiami wodorowymi, takimi jak poziom ciśnienia, obciążeń termicznych np. nadciśnienia generowanego przez eksplozję.

Symulacje CFD mogą stanowić cenny wkład w projektowanie bezpieczniejszej infrastruktury wodorowej i rozwój innowacyjnych procedur.

Numeryczne techniki obliczeniowe, metody analityczne i eksperymentalne zostały rozwinięte w celu badania nierozwiązanych problemów w dynamice płynów. Te trzy podejścia są ze sobą silnie powiązane i stanowią główne narzędzia zarówno w badaniach naukowych jak i zaawansowanych technikach inżynierskich. Równania rządzące ruchem ośrodka ciągłego to równania Naviera-Stokesa (NS), których nie można rozwiązać analitycznie. Dlatego konieczne jest jednoczesne stosowanie technik numerycznych, wraz z walidacją eksperymentalną, w celu wypełnienia luk w wiedzy związanych z zachowaniem przepływu jak w przypadku wypadków ze skroplonym lub gazowym wodorem¹⁵.

Aby zastosować techniki CFD do problemów w skali rzeczywistej, należy wziąć pod uwagę poziom niezawodności i dokładności narzędzi numerycznych. Aby osiągnąć wymagany poziom ufności, kody/modeli CFD muszą przejść procedurę oceny – walidacji.

Kryteria akceptacji i parametryzacji, metody probabilistyczne i deterministyczne

Zarówno przy stosowaniu metod bazujących na doświadczeniu, jak i na metodach probabilistycznych, ważne jest wyznaczenie granicy akceptowalności ryzyka oraz wynikających z tego parametrów dla procesu.

Kryteria akceptacji i parametryzacja jest bogato opisana w normach zarówno jakościowych, jak i technicznych związanych z projektowaniem oraz eksploatacją systemów

wodorowych. Spis przedmiotowych norm znajduje się w rozdziale 2.2 niniejszego opracowania.

Rolą zespołu jest zidentyfikowanie tych kryteriów i parametrów już na etapie studium wykonalności projektu, etapy przygotowania do projektu powinny obejmować¹⁶:

- zminimalizowanie ilości źródeł potencjalnych szkód wynikających ze zidentyfikowanych zagrożeń i ograniczenie ich konsekwencji,
- zapewnienie procedur bezpieczeństwa uwzględnienie wszystkich norm i wytycznych, zarówno wymaganych przez prawo, jak i norm wewnętrznych, wraz z szkoleniem personelu oraz użytkowników,
- zapewnienie „bezpiecznej” awarii systemu poprzez zastosowania odpowiednich urządzeń zabezpieczających system oraz procedur związanych z tymi urządzeniami.

W przypadku instalacji wodorowych należy:

- zminimalizować prawdopodobieństwo zdarzeń kryzysowych poprzez dobór odpowiedniej metodologii projektowej popartej doświadczeniem inżynierskim oraz zarządczym (kadra),
- zminimalizować, tylko do niezbędnych liczbę elementów instalacji wodorowej oraz ich rozmiary, wraz z minimalizacją zapasów wodoru,
- właściwie zabezpieczyć źródła, które mogą zainicjować zdarzenie kryzysowe,
- unikać warunków rozwoju pożaru,
- unikać warunków sprzyjających detonacji,
- stosować właściwe zabezpieczenia, poprzez samą konstrukcję, jak i urządzenia/aparaturę towarzyszącą.

Celem zastosowania metod deterministycznych jest analiza wybranych scenariuszy oraz modelowanie na podstawie powiązań pomiędzy zjawiskami fizycznymi (w tym termodynamicznymi), chemicznymi oraz zachowaniem człowieka i czynnikami wynikającymi z otoczenia. Są one bardzo dobrym narzędziem, szeroko rozumianym, bazującym na odpowiedzi tak/nie. Metoda ta nie daje odpowiedzi, co do ilościowego efektu zjawiska. Metody deterministyczne obejmują:

1. kryterium bezpieczeństwa zachowania życia i zdrowia,
2. kryterium ochrony otoczenia (infrastruktura/środowisko),
3. studia porównawcze.

Metody probabilistyczne szacowania ryzyka polegają na korelacji wielkości prawdopodobieństwa wystąpienia danego zdarzenia oraz jego konsekwencji. Wskaźnik ten pozwala oszacować czy dane ryzyko jest akceptowalne czy należy zastosować dodatkowe procedury w celu zwiększenia bezpieczeństwa.

Bezpieczeństwo jest kategorią społeczną, a ryzyko jest miarą techniczną, którą można przedstawić ilościowo.

Poziom akceptacji ryzyka, a co za tym idzie kryteria akceptacji dla danego systemu są wskazywane przez zespół ekspertów posiłkujących się obowiązującym prawem (normy, wytyczne), jak i doświadczeniem.

Niewątpliwą zaletą w przypadku metod probabilistycznych przy wyznaczaniu kryteriów oceny jest fakt, że daje ona możliwość numerycznego porównania poziomów ryzyka dla różnych obszarów technicznych i społecznych, dostarcza również danych do analizy kosztów oraz jest znaczącą metodą ułatwiającą budowanie strategii zarządczych.

Analiza podsystemów technicznych w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa. Wydzielanie z systemu technicznego podsystemów w celu analiz bezpieczeństwa jest kluczowym krokiem w projektowaniu inżynierskim, również systemów wodorowych. Ma ono na celu uprościć ocenę przyjętych założeń bezpieczeństwa. (ang. *Technical Sub-System TSS*)¹⁷.

- TSS powinien obejmować, w miarę możliwości, wszystkie aspekty wodorowej inżynierii bezpieczeństwa,
- TSS powinien zachować balans pomiędzy komplementarnością w systemie, a swoją indywidualną funkcją,
- TSS powinien być określany z wykorzystaniem najnowszych osiągnięć techniki inżynierskiej, w tym narzędzi, korelacji empirycznych, półempirycznych, numerycznych etc.,
- TSS powinien być określany w sposób elastyczny, tak, aby można było łatwo adaptować go do nowych wytycznych i metod określających bezpieczeństwo wodorowe.

Jako przykład podsystemów technicznych sugerowanych w literaturze¹⁷, można wyróżnić: inicjację uwolnienia oraz dyspersji, zapłon, deflagrację i detonację, pożary, wpływ na ludzi, infrastrukturę oraz środowisko, techniki zapobiegania zdarzeniom kryzysowym, interwencja służb bezpieczeństwa.

Przyczyny zdarzeń kryzysowych

Podstawową przyczyną zagrożeń związanych z jakąkolwiek formą wodoru jest fakt, że wodór jest materiałem łatwopalnym i w pewnych warunkach detonującym, tworząc mieszaniny prowadzące do pożaru lub detonacji. Wodór z powietrzem tworzy mieszaninę wybuchową przy stężeniu w zakresie od 4% do 75% zawartości wodoru w tej mieszaninie¹⁸, wykazując tendencję wzrostową wraz ze wzrostem stężenia tlenu od 4% do 94% zawartości wodoru w czystym tlenie.

Energia, wystraczająca do zainicjowania wybuchu mieszaniny wodoru i powietrza (21% tlenu) jest bardzo mała. Bezpieczeństwo zostanie zwiększone, jeżeli projektanci oraz personel operacyjny i użytkownicy będą tego świadomi.

Właściwości fizykochemiczne wodoru to podstawowa przyczyna zdarzeń kryzysowych z jego udziałem, obok niezachowania standardów projektowych, awarii systemów zabezpieczeń, czy niewłaściwej eksploatacji systemów wodorowych.

Dyspersja i dyfuzja

Rozpraszanie się wodoru w innym ośrodku (zjawisko szeroko zwane w inżynierii dyspersją) jest zależne nie tylko od ilości wodoru, ale również od jego temperatury i ciśnienia z uwzględnieniem parametrów otoczenia. W przypadku wodoru, który formując chmury gazu w wyniku dyspersji może osiągać stężenia wybuchowe, rzetelna wiedza dotycząca procesu tworzenia chmury, jej migracji oraz procesów z tym związanych (w czasie jak i w przestrzeni) jest krytyczna z punktu widzenia inżynierii bezpieczeństwa.

Tworzenie się łatwopalnej mieszaniny jest głównym problemem związanym z bezpieczeństwem stosowania wodoru, szczególnie w pomieszczeniach jak i ogniach paliwowych. Jednym z istotnych pytań jest to, jak niebezpieczne jest przenikanie wodoru ze zbiornika i jego rozproszenie w zamkniętym pomieszczeniu np. garażu. Ważnym jest

określenie maksymalnego dopuszczalnego przenikania (strumień wodoru) dla pojazdów napędzanych wodorowymi ogniwami paliwowymi wyposażonych w zbiorniki na sprężony wodór. Unikalną cechą wodoru jest zjawisko szczytowego ciśnienia¹⁹.

Wyciek i dyspersja ciekłego wodoru oraz błota wodorowego może mieć, poprzez ekstremalnie niską temperaturę, wpływ na niszczenie infrastruktury instalacji oraz zestalania się powietrza atmosferycznego²⁰.

Dyfuzja jest to proces samoistnego mieszania się cząsteczek będący konsekwencją chaotycznych zderzeń cząsteczek dyfundującej substancji między sobą lub z cząsteczkami otaczającego ją ośrodka. Zachodzi w każdym ośrodku pod wpływem ruchów cieplnych lub dążenia do wyrównania stężeń. Dyfuzja w przypadku wodoru wiąże się ze zjawiskiem przenikania cząstek wodoru przez struktury metalu np. w zbiornikach lub ściankach innych elementów instalacji, mających kontakt z wodorem. Dyfuzja może być przyczyną tzw. kruchości wodorowej, która występuje w przypadku, gdy wodór dyfunduje w struktury metalu niszcząc jego sieć krystaliczną, co w konsekwencji może doprowadzić do poważnych zdarzeń kryzysowych.

Zapłon

Zapłon jest to zainicjowanie procesu spalania, czyli egzotermicznej reakcji chemicznej przebiegającej między materiałem palnym lub paliwem a utleniaczem, z wydzieleniem ciepła i światła. Można wyróżnić kilka przyczyn zapłonu:

- zjawiska elektrostatyczne,
- dyfuzja,
- sprężanie w warunkach zbliżonych do adiabatycznych,
- zapłon od gorącej powierzchni,
- zapłon od sprężonego i ogrzanego powietrza, powstałego na skutek działania fali uderzeniowej będącej wynikiem wypływu wysoko sprężonego wodoru do atmosfery²¹.

Żadna z powyższych przyczyn nie jest samodzielnie odpowiedzialna za inicjację procesu spalania w przypadku wodoru, jedynie kombinacja co najmniej dwóch mechanizmów może przynieść potencjalnie niepożądane oczekiwane efekty. Dodatkowo odwrotny efekt Joule'a-Thomsona, powodujący wzrost temperatury gazu co prowadzi do zmniejszania minimalnej energii zapłonu²².

Pożary - mikropłomienie

Scenariusz budzący największe obawy jest taki, że mały wyciek w układzie wodorowym może zapalić się i palić niewykryty przez długi czas, co prowadzi do potencjalnej degradacji materiałów w otoczeniu oraz zapłonu innych wycieków wodoru, które mogą wystąpić w pobliżu. Mikropłomienie są związane z małymi prędkościami poddźwiękowych przepływów laminarnych z pęknięć. Zgodnie z raportem SAE J2579^e najmniejszy wyciek z instalacji wodorowej zdolny do utrzymania płomienia to 28 µg/s.

Mikropłomienie wodoru są bardzo trudne do wykrycia metodami wizualnymi podczas badań eksperymentalnych przy użyciu mikropalnika o średnicy zewnętrznej $D=0.3$ mm. Uzyskany mikropłomień był niewidoczny dla obserwatora nawet przy całkowitym zaciemnieniu

^e https://www.sae.org/standards/content/j2579_201806/.

laboratorium, dlatego też zastosowano termoparę w celu identyfikacji obecności mikroplamienia²³.

Deflagracja

Deflagracja to rodzaj wybuchu materiału przebiegający z prędkością liniową ograniczoną do kilkuset m/s; polega na przekazywaniu ciepła przez produkty gazowe w wyniku przewodnictwa i promieniowania od warstwy spalającej się do warstwy nie objętej reakcją²⁴.

W przypadku wodoru do deflagracji może dojść podczas niekontrolowanego uwolnienia go z instalacji wodorowej. W przypadku zapłonu uwolnionego wodoru jest to obok detonacji jeden z możliwych typów eksplozji. Front deflagracji rozchodzi się z prędkością poniżej prędkości dźwięku w niespalonej mieszaninie. Front deflagracji rozchodzi się poprzez dyfuzję aktywnych rodników i ciepła od produktów spalania do niespalonej mieszanki palnej. Mechanizm deflagracji polega na wymianie ciepła z otoczeniem poprzez silne promieniowanie i przewodzenie ciepła, a poprzez to powodując utlenianie do kolejnych warstw²⁵.

Deflagracja łatwo przechodzi w detonację, głównie poprzez zwiększenie ciśnienia. W przypadku przesyłu rurowego, prawdopodobieństwo zmiany deflagracji w detonację zależy od długości rurociągu (EN ISO 16852:2010).

Gdy w przypadku mieszania się wodoru z tlenem lub powietrzem mamy do czynienia z deflagracją, dodatkowym potencjalnym zagrożeniem jest przekształcenie się deflagracji w detonację²⁶. W tabeli 2 przedstawiono zestawienie ciśnień dla deflagracji, objętość wodoru 2 m³.

Tabela 2 Deflagracja –ciśnienia ²⁶

Udział objętościowy	T ₀	P ₀	T _f	P _f	T ₀	P ₀	T _f	P _f
[% H ₂]	[K]	[kPa]	[K]	[kPa]	[K]	[kPa]	[K]	[kPa]
Wodór/Powietrze								
18,3	298	101,3	707,9	234,7	298	101,3	684,3	247,6
25	298	101,3	2159,2	643,8	298	101,3	2141,9	697,0
5	298	101,3	1937,9	590,0	298	101,3	1917,7	637,3
59	298	101,3	1165,7	375,6	298	101,3	1142,6	401,9
Wodór/Tlen								
5	298	101,3	694,2	230,1	298	101,3	671,6	243
25	298	101,3	2314,5	639,1	298	101,3	2118,3	692,2
50	298	101,3	2913,0	808,5	298	101,3	2908,3	880,0
75	298	101,3	3003,4	837,5	298	101,3	2999,2	911,6
90	298	101,3	1899,2	581,4	298	101,3	1878,6	612,2
95	298	101,3	1132,8	365,9	298	101,3	1132,8	399,4

T – temperatura, P – ciśnienie, T_f-temperatura równowagi, P_f -ciśnienie równowagi

Detonacja

Detonacja rozchodzi się z prędkością powyżej prędkości dźwięku w niespalonej mieszaninie. Front detonacji jest zasadniczo inny niż front deflagracji. Jest to zjawisko znacznie bardziej dynamiczne. Mieszanina wodoru z tlenem w niekorzystnych warunkach oraz stosunku masowym jest, w połączeniu z pożarem, najgroźniejszym zdarzeniem kryzysowym związanym z wodorem.

Dodatnia wyporność oraz szybka dyfuzja molekularna gazowego wodoru powoduje, że w wyniku przecieku z instalacji szybko się rozpręża i łatwo miesza się z innymi gazami, prowadząc do wystąpienia mieszaniny wybuchowej. W przypadku ciekłego wodoru oraz błota wodorowego przy wycieku następuje szybkie odparowanie oraz tworzenie mieszaniny z otaczającym go gazem.

Wymiary chmury gazowego wodoru ukształtowanej w wyniku dyspersji wodoru sprężonego zależą między innymi od jego ciśnienia i temperatury.

W tabeli 3 zestawiono stosunek T_1/T_0 oraz P_1/P_0 , które określają wzrost temperatury oraz ciśnienia podczas detonacji. Są to wartości równowagi Chapmana-Jougueta dla dziesięciokrotnej zmiany ciśnienia²⁶.

Tabela 3 Detonacja – ciśnienia i temperatury dla wodoru²⁶.

Udział objętościowy	T ₀	P ₀	T ₁ /T ₀	P ₁ /P ₀	T ₀	P ₀	T ₁ /T ₀	P ₁ /P ₀
[% H ₂]	[K]	[kPa]			[K]	[kPa]		
Wodór/Powietrze								
18,3	298	101,3	7,657	12,154	298	10,1	7,58	12,111
25	298	101,3	9,257	15,605	298	10,1	8,87	14,223
5	298	101,3	8,706	13,713	298	10,1	8,482	13,555
59	298	101,3	7,678	12,144	298	10,1	7,601	12,119
Wodór/Tlen								
5	298	101,3	3,118	4,88	298	10,1	3,119	4,882
25	298	101,3	9,034	14,289	298	10,1	8,66	13,896
50	298	101,3	11,646	17,857	298	10,1	10,573	16,616
75	298	101,3	12,111	18,671	298	10,1	10,834	17,25
90	298	101,3	8,576	13584	298	10,1	8,327	13,393

T – temperatura, P – ciśnienie,

Oddziaływanie na otoczenie

Oddziaływanie na otoczenie sprężonego H₂ oraz w postaci ciekłej (skroplony H₂, LH₂), lub zestalonej (SH₂), w przypadku zdarzeń kryzysowych ma bardzo duży wpływ na otoczenie, zarówno na infrastrukturę, człowieka, jak i środowisko naturalne. W tym obszarze należy wziąć pod uwagę takie obszary, jak¹⁷:

- życie i zdrowie człowieka,
- życie i zdrowie istot żywych,
- wpływ na środowisko naturalne,
- bezpieczeństwo infrastruktury (budynki, budowle, instalacje, etc.).

Skutki zdarzeń kryzysowych w przypadku wodoru, to dla powyższych obszarów:

- promieniowanie cieplne, w tym bardzo niskie i bardzo wysokie temperatury,
- ciśnienie eksplozji,
- bezpośrednie i pośrednie skutki eksplozji,
- ubytek tlenu w otoczeniu.

Praca służb bezpieczeństwa¹⁷

Personel odpowiedzialny za sprawy bezpieczeństwa powinien monitorować operacje związane z wodorem, aby zapewnić pełne bezpieczeństwo. Podczas wytwarzania, transportu, dystrybucji oraz wykorzystania wodoru powinny być podejmowane należyte środki ostrożności. Pomoc w każdej sytuacji awaryjnej powinna być zapewniana przez służby bezpieczeństwa przeszkolone do postępowania w takich sytuacjach. Specjalistyczne służby mogą wchodzić w skład np. Państwowej Straży Pożarnej jak również mogą być formowane i szkolone wewnątrz przedsiębiorstw (Zakładowa Straż Pożarna).

1.4. ANALIZA JAKOŚCIOWA W PROCESIE PROJEKTOWYM DLA WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

Analiza jakościowa w procesie projektowym dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa Wodorowa inżynieria bezpieczeństwa w odniesieniu do między innymi normy *British Standard BS 7974* oraz do dokumentów na niej bazujących, opisuje podejście do procedur projektowych oraz opisuje właściwe narzędzia inżynierskie obejmujące inżynierię bezpieczeństwa pożarowego w odniesieniu do projektowania budynków. Wodorowa inżynieria bezpieczeństwa (HSE^f) powinna w tym przypadku obejmować przynajmniej¹⁷:

- przyjęte zasady dotyczące wodorowej inżynierii bezpieczeństwa,
- kryteria oceny oraz akceptowalnych poziomach ryzyka w różnych obszarach,
- niezbędne wytyczne projektowych, również w obszarze środków zapobiegania zdarzeniom kryzysowym,
- strategię bezpieczeństwa do zastosowania w danym przypadku,
- identyfikacji obszarów do dalszych opracowań.

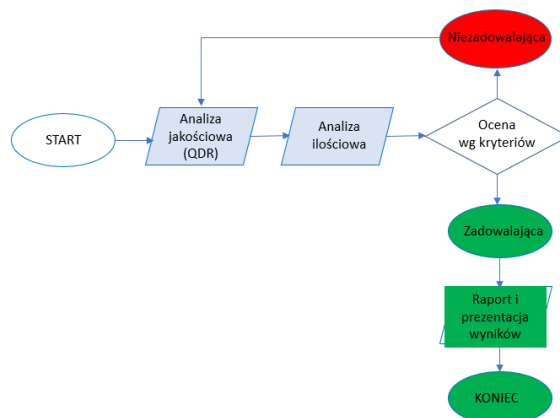
Główne elementy wodorowej inżynierii bezpieczeństwa (HSE), są to:

- analiza jakościowa (QDR^g),
- analiza ilościowa,
- ocena zgodnie z przyjętymi kryteriami.

Rysunek 3 przedstawia schemat procedur wodorowej inżynierii bezpieczeństwa.

^f HSE - Hydrogen Safety Engineering.

^g QDR – Qualitative Design Review, ocena jakościowa projektu.



Rysunek 3 Procedury wodorowej inżynierii bezpieczeństwa, algorytm ogólny¹⁷.

Personel

Personel odgrywa znaczącą rolę w procesie identyfikacji ryzyka oraz ustalaniu metod zapobiegania zdarzeniom kryzysowym, z drugiej strony personel odpowiedzialny za eksploatację systemu odgrywa bardzo ważną rolę w realizacji polityki bezpieczeństwa.

Często dobór technologii wodorowej opiera się również na dostępie do personelu spełniającego określone wymagania, ma to szczególne znaczenie w przypadku wysokiej złożoności obsługi czy montażu.

Bezpieczeństwo personelu obsługującego systemy wodorowe powinno być przedmiotem prac już od etapu koncepcji projektu, uszczegóławiane i rozwijane na kolejnych etapach projektowania. Dokumentacja związana z bezpieczeństwem powinna obejmować identyfikację ryzyk i zapobieganie im, potencjalne skutki ich wystąpienia oraz określenie sposobów niwelowania lub ograniczania niekorzystnych efektów tych skutków. Instrukcje powinny być opracowane na odpowiednim stopniu szczegółowości, zawierać plany inspekcji i szkoleń oraz precyzyjnie określać zasady komunikacji.

Użytkownik

Użytkownik systemu wodorowego to osoba/instytucja, która z założenia nie musi mieć odpowiedniego przygotowania i wiedzy do eksploataowania systemów wodorowych, chociażby w pojazdach.

W przypadku użytkownika systemów wodorowych niezwykle ważne jest dostarczenie szczegółowej i wyczerpującej instrukcji obsługi, pozwalającej na zapoznanie się użytkownika z zagrożeniami oraz metodami zapobiegania zdarzeniom kryzysowym, a co najważniejsze z właściwym postępowaniem w przypadku awarii.

Ogólne zagadnienia dotyczące systemów technicznych

Jak już wspomniano, w celu przeprowadzenia analizy jakościowej, system techniczny w pierwszej kolejności jest poddawany podziałowi na tzw. podobszary techniczne, co ułatwia poszerzenie szczegółowości/zakresu analizy. Należy zachować korelację pomiędzy podsystemami technicznymi tak, aby informacje wychodzące z jednego systemu mogły być danymi wejściowymi do innego podsystemu.

Zwykle systemy techniczne są opisywane za pomocą schematu PI&D^h. Jest to schemat opisujący, przy pomocy znormalizowanych symboli, takie cechy systemu technicznego, jak: wymiary, materiały, warunki (ciśnienia, temperaturę, stężenia, natężenia przepływów itd.), zawiera też umiejscowienie oraz parametry urządzeń oraz aparatów, takich, jak: zawory, wyciągi, aparatura związana z wykrywaniem zagrożeń (detektory, zraszacze, systemy wentylacyjne) wraz z charakterystykami technicznymi poszczególnych elementów.

Istotną kwestią w zarządzaniu operacyjnym systemami technicznymi jest odpowiednia komunikacja zespołów projektowych, co do takich parametrów, jak: parametry ilościowe i jakościowe wodoru, konieczność magazynowania, poziom wymaganych zapasów, jest to niezwykle ważne w procesie otrzymywania pozwoleń na budowę i eksploatację systemów wodorowych. Ma to ścisły związek z rentownością inwestycji, a w konsekwencji budowaniem strategii biznesowych. Tabela 4 przedstawia potencjalne powiązań podsystemów technicznych z elementami jakościowej analizy bezpieczeństwa.

Tabela 4 lustracja potencjalnych powiązań podsystemów technicznych (TSS) a elementami jakościowej analizy bezpieczeństwa¹⁷.

	Ocena jakościowa	Inicjacja wycieku i dyspersji	Zapłon	Deflagracja i detonacja	Pożary	Wpływ na ludzi i otoczenie	Technika zapobiegania	Działania służb bezpieczeństwa
Plan terenu								
Charakterystyka infrastruktury otoczenia								
Charakterystyka systemu wodorowego								
Parametry wycieku								
Parametr przepływu wyjściowego								
Dynamika wydmuchu wodoru								
Dynamika ciśnienia uwolnienia wodoru w otoczeniu zamkniętym								
Nagromadzenie								
Podatność na zapłon								
Początkowa propagacja płomienia								
Wybuch strumieniowy (JET)								
Deflagracja								
Detonacja								
Eksplzja zgromadzonego wodoru								
Długość płomienia strumieniowego (JET)								

^h PI&D - Piping and Instrumentation Diagram, schemat orurowania i oprzyrządowania.

	Ocena jakościowa	Inicjacja wycieku i dyspersji	Zapłon	Deflagracja i detonacja	Pożary	Wpływ na ludzi i otoczenie	Technika zapobiegania	Działania służb bezpieczeństwa
Strumień ciepła przenoszony przez promieniowanie								
Strumień ciepła przenoszony przez konwekcję								
Wpływ na procesy życiowe								
Wpływ na własność								
Wpływ na otoczenie								
Plan ewakuacji								
System wentylacyjny								
Wpływ ograniczeń/przeszkód								
Odprowadzenie produktów deflagracji								
Czas wykrycia								
Strategia działania								
Wyposażenie obiektu związane ze zdarzeniami kryzysowymi								

Infrastruktura i otoczenie

Dokumentacja techniczna, będąca podstawą do projektowania w obszarze inżynierii bezpieczeństwa powinna zawierać informacje na temat bezpośredniego otoczenia instalacji wodorowej, najlepiej w postaci schematycznie naniesionych odpowiedników na rysunek lub model instalacji – dotyczy to budynków, budowli oraz pozostałej infrastruktury otoczenia. W procesie projektowym instalacji wodorowej powinna być wzięta pod uwagę minimalna wymagana odległość od tych obiektów oraz przewidziane pozostałe środki minimalizowania zagrożeń.

Zarządzanie

Zarządzanie jest bardzo istotnym elementem w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa. Na poziomie zarządczym. W tym obszarze istotne czynniki, to struktura właścicielska, personel, system szkoleń, ochrona życia i mienia, systemy i instalacje, instrukcje, plan pracy i remontów, plan utrzymania i testowania, zarządzanie ryzykiem, w tym zarządzanie kryzysowe, BHP oraz współpraca ze służbami pożarniczymi¹⁷.

1.5. ANALIZA JAKOŚCIOWA W PROCESIE PROJEKTOWYM DLA WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA W OBSZARZE CELÓW

Parametryzacja oraz kryteria akceptacji

Jakościowa analiza w procesie projektowym może korzystać z następujących rodzajów metod:

- deterministycznych (życie i zdrowie, zapobieganie stratom oraz ochrona otoczenie),
- studiów porównawczych,
- probabilistycznych (przeprowadzenie analiz, czy poziom ryzyka jest akceptowalny w danym obszarze).

Poniżej opisano wybrane kryteria:

- ochrona życia i zdrowia, podstawowym zadaniem wodorowej inżynierii bezpieczeństwa jest dostarczenie metod i wytycznych dotyczących zabezpieczenia życia i zdrowia człowieka oraz innych istot żywych, główne cele w tym obszarze, to:
- zapewnienie czasu ewakuacji, tak, aby ludzie mogli opuścić strefę zagrożenia w odpowiednim czasie,
- zapewnienie odpowiedniego wyposażenia oraz czasu reakcji służbom bezpieczeństwa,
- zapewnienie dostępu służbom bezpieczeństwa, tak aby nie angażować personelu w usuwanie skutków zdarzeń kryzysowych.

Cele te są szczególnie ważne, może bowiem wystąpić oprócz wysokiej temperatury brak tlenu w powietrzu, niewyczuwalny dla człowieka. Realizację tych celów ułatwiają:

- minimalizacja strat - minimalizację strat w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa można przeprowadzać poprzez minimalizację wpływu zdarzeń kryzysowych na otoczenie. Można to realizować zgodnie z polityką bezpieczeństwa oraz poprzez odpowiednie zabezpieczenia techniczne.
- analiza wrażliwości - analizę wrażliwości dla wodorowej inżynierii bezpieczeństwa można przeprowadzać na podstawie danych historycznych, doświadczalnie lub za pomocą numerycznych metod CFD. Ta ostatnia metoda jest metodą najbardziej efektywną ze względu na bezpieczeństwo oraz możliwość generowania danych wejściowych do kolejnych obszarów analiz (versus trudno dostępne dane historyczne).
- minimalizacja zagrożeń - procedurach projektowych wodorowej inżynierii bezpieczeństwa należy uwzględnić metody oraz techniki zapobiegania zdarzeniom kryzysowym. Mogą do nich należeć:
 - usuwanie wodoru gazowego z zaworów upustowych oraz bezpieczeństwa,
 - wentylacja pomieszczeń,
 - eliminacja źródeł zapłonu, również stosowanie aparatury dopuszczonej do użytkowania w strefach zagrożenia wybuchem,
 - eliminacja źródeł zapłonu statycznego,
 - odpowiednia detekcja wycieków wodoru,
 - odpowiednie wykrywanie pożarów wodoru.

W technologiach wodorowych niezwykle istotny jest właściwe przygotowanie procesu gaszenia ewentualnego pożaru. W pomieszczeniach zamkniętych stosuje się gazowe systemy gaśnicze na dwutlenek węgla (zgodnie z wytycznymi NFPAⁱ Dla stałej instalacji

ⁱ NFPA – National Fire Protection Association.

gaśniczej na dwutlenek węgla stężenie gaśnicze CO₂, powinno wynosić co najmniej 75% objętości brutto chronionego pomieszczenia), natomiast na otwartej przestrzeni stosuje się proszkowe instalacje gaśnicze²⁷.

1.6. ANALIZA ILOŚCIOWA W WODOROWEJ INŻYNIERII BEZPIECZEŃSTWA

Metody ilościowe w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa stosuje się po analizie jakościowej procesu, również mogą opierać się na metodach deterministycznych, probabilistycznych oraz studiów porównawczych (w tym analizy CFD). To zespół ekspertów wybiera metodę stosowanie do rozpatrywanego przypadku oraz wytycznych¹⁷.

Tabela 5 Przykłady dystansu stref bezpieczeństwa dla sprężonego wodoru gazowego²⁸.

Rodzaj infrastruktury	Odległość od (m)				
	ICC International Fire Code (2003)	NFPA 55 (2005)			NFPA 52 (2006)
		Objętość			
		H2 <99 m3	H2 od 99 m3 do 425m3	H2 >99 m3	
granicy obszaru instalacji wodorowej	3.1	1.5	1.5	1.5	3.1
instalacji na publicznych przestrzeniach otwartych	7.6	7.6	15.2	15.2	-
ciągów pieszych i parkingów	4.6	4.6	4.6	4.6	3.1
źródeł zapłonu	3.1	7.6	7.6	7.6	-
budynków - ściany niepalne	1,5 lub 3,1	0	1,5 lub 3,1	1,5 lub 7,1	-
budynków - ściany palne	7,6	3.1	7.6	15.2	3.1
podziemnego zbiornika wodoru	6,1 lub 15,2	3,1 lub 7,6	3,1 lub 7,6	3,1 lub 7,8	6.1
naziemnego zbiornika wodoru	6.1	7,6	7,6	7,6	-
zbiornika z innym palnym gazem	7,6 lub 15,2	3,1 lub 7,6	7,6 lub 15,2	7,6 lub 15,8	-

1.7. TECHNOLOGIE WODOROWE, EFEKT ŚRODOWISKOWY

Technologie wodorowe ze względu na właściwości wodoru oraz przyjęte w przemyśle metody wytwarzania, kompresji oraz skraplania wodoru mogą nieść za sobą rozległy efekt środowiskowy. Normy ISO 14000 dotyczą regulacji środowiskowych dla organizacji i obejmują wszystkie zagadnienia istotne z punktu widzenia zarządzania w tym obszarze. Seria norm ISO 14000, oprócz norm dotyczących systemów zarządzania środowiskowego, obejmuje dokumenty z zakresu²⁹:

- audytowania i badań związanych,
- etykietowania środowiskowego,
- oceny środowiskowych efektów działalności,
- oceny cyklu życia,

- aspektów środowiskowych w projektowaniu i rozwoju wyrobów,
- komunikacji środowiskowej,
- gazów cieplarnianych i zagadnień związanych ze zmianami klimatu,
- śladu wodnego i węglowego,
- kosztów środowiskowych.

Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz.U. z 2021 r. poz. 247 ze zm., dalej: UOOŚ^j) oraz dyrektywa 2001/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 czerwca 2001 r. w sprawie oceny wpływu niektórych planów i programów na środowisko) nakładają obowiązek przeprowadzenia strategicznej oceny oddziaływania na środowisko (dalej: SOOŚ^k) projektów, polityk, strategii, planów lub programów. Zgodnie z ww. ustawą, Minister Klimatu i Środowiska poddał procedurze SOOŚ projekt dokumentu strategicznego³⁰. Realizacja Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z Perspektywą do roku 2040 uzyskała pozytywną rekomendację dla wdrożenia po konsultacji w następujących obszarach:

1. uzgodnienie stopnia szczegółowości informacji zawartych w prognozie oddziaływania na środowisko z:
 - a. Generalnym Dyrektorem Ochrony Środowiska,
 - b. Głównym Inspektorem Sanitarnym,
 - c. Dyrektorem Urzędu Morskiego w Gdyni,
 - d. Dyrektorem Urzędu Morskiego w Szczecinie.
2. sporządzenie prognozy oddziaływania na środowisko, uzyskanie wymaganych prawem opinii:
 - a. opinia Generalnego Dyrektora Ochrony Środowiska,
 - b. opinia Głównego Inspektora Sanitarnego,
 - c. opinia Dyrektora Urzędu Morskiego w Gdyni,
 - d. opinia Dyrektora Urzędu Morskiego w Szczecinie.
3. zapewnienie możliwości udziału społeczeństwa w postępowaniu (podanie stosownych informacji o SOOŚ do publicznej wiadomości, zapewnienie możliwości zapoznania się z dokumentacją, zapewnienie możliwości składania uwag i wniosków),
4. rozpatrywanie otrzymanych uwag, wniosków i analiz oraz sporządzenie ostatecznej wersji,
5. prognozy oddziaływania na środowisko.

Środowisko naturalne, ludzie, infrastruktura

Produkcja wodoru to proces energochłonny i jeśli nie przebiega tylko przy użyciu energii odnawialnej, jego wpływ na środowisko naturalne jest znaczny. Rosnące zapotrzebowanie na paliwa wodorowe związane z zastąpieniem nim paliw kopalnych może paradoksalnie doprowadzić do większej zależności od nich. Zielony wodór jest niskoemisyjny. Niebieski powstaje w wyniku mieszania gazu ziemnego z gorącą parą w obecności katalizatora, co tworzy wodór i tlenek węgla. Do mieszaniny dodawana jest woda, która przekształca tlenek węgla w dwutlenek węgla przy jednoczesnym zastosowaniu technik wychwytywania oraz magazynowania/wykorzystania dwutlenku węgla. Należy jednak zwrócić uwagę, że samo dostarczenie metanu do tego procesu jest obciążone śladem węglowym. Emisyjność ta jest związana z wydobyciem, transportem oraz przekształceniem gazu ziemnego w metan do

^j UOOŚ – Ocena Oddziaływania na Środowisko.

^k SOOŚ – Strategiczna Ocena Oddziaływania na Środowisko.

produkcji wodoru, w tym do produkcji ciepła i wytwarzania wysokiego ciśnienia w tym procesie. Emisyjność wytwarzania wodoru byłaby w tym przypadku niższa, gdyby również w tych procesach wykorzystywano odnawialne źródła energii jako jej źródła³¹.

Pozyskiwanie wodoru wytworzonego z udziałem odnawialnych źródeł energii („Podsumowanie strategicznej oceny oddziaływania na środowisko”, Warszawa 25.08.2021 r.):

- sprzyjałoby dalszym redukcjom emisji gazów cieplarnianych i niosłoby wkład w działania międzynarodowe na rzecz powstrzymania globalnego ocieplenia,
- byłoby zgodne ze światowymi trendami przechodzenia na odnawialne źródła energii, co do zasady wiąże się z pozytywnym wpływem na środowisko,
- wobec zmniejszonej emisji zanieczyszczeń powietrza wpływałoby pozytywnie na zdrowie społeczeństwa i zmniejszyłoby tzw. koszty zewnętrzne, w tym wydatki na ochronę zdrowia, leczenia, absencję w pracy, korozję materiałów itp.,
- zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju i gospodarki o obiegu zamkniętym, nastąpiłaby oszczędność w wykorzystaniu surowców energetycznych dla przyszłych pokoleń.

Wodór może stanowić czyste oraz praktycznie niewyczerpany nośnik energii – można go ponownie uzyskiwać np. w procesie elektrolizy wody. Problemem jest, jednakże jego produkcja.

Większość obecnie wykorzystywanego wodoru powstaje w procesie reformingu gazu ziemnego. Tak uzyskany pierwiastek określamy jako „szary wodór”. Ten sposób wytwarzania nie jest przyjazny środowisku, gdyż wiąże się z emisją gazów cieplarnianych do atmosfery. Możliwe jest także wytworzenie tzw. wodoru niebieskiego, w ten sam sposób, jednak powstałe gazy cieplarniane są wtedy wychwytywane³².

Inną metodą jest elektroliza wody. Jeżeli nie wiąże się ona zupełnie z emisją gazów cieplarnianych, to wyprodukowany wodór nazywany jest wodorem zielonym. Jeśli do przeprowadzenia elektrolizy wykorzystana zostanie energia słoneczna, to jest to wodór żółty. Jeżeli energia nuklearna – różowy (nazywany także czerwonym lub fioletowym).

Możliwe jest także wytworzenie „turkusowego wodoru” – poprzez pirolizę metanu do węgla i wodoru. Jest to technologia intensywnie rozwijana. Naturalnie występujący w skorupie ziemskiej wodór to wodór biały. Obecnie nie odbywa się jego eksploatacja. Najmniej korzystna dla środowiska jest produkcja „czarnego” i „brązowego” wodoru – wykorzystuje się do niej odpowiednio węgiel kamienny i brunatny.

Wodór może być ekologicznym nośnikiem energii, tylko w przypadku, gdy cały jego cykl życiowy, począwszy od wytworzenia, nie wywiera znaczącego wpływu na środowisko.

Jako paliwo, wodór jest wysoce łatwopalny i dlatego jego wycieki stwarzają poważne ryzyko pożaru. Pożary wodoru różnią się jednak znacznie od pożarów innych paliw. W przypadku wycieku cięższych paliw i węglowodorów, takich jak benzyna czy olej napędowy, gromadzą się one blisko ziemi. W przeciwieństwie do nich wodór najlżejszym pierwiastkiem, więc w przypadku wycieku wodór szybko rozprasa się ku górze. Zmniejsza to prawdopodobieństwo zapłonu, ale dalsza różnica polega na tym, że wodór zapala się i pali łatwiej niż benzyna czy olej napędowy. W rzeczywistości, nawet iskra elektryczności statycznej z palca człowieka wystarczy, aby wywołać eksplozję, gdy wodór jest dostępny w odpowiednim stężeniu w powietrzu. Płomień wodoru jest również niewidoczny, więc trudno jest określić, gdzie tak naprawdę "płonie", ale generuje on małe ilości promieniowania cieplnego z powodu braku węgla i ma tendencję do szybkiego wypalania się³³.

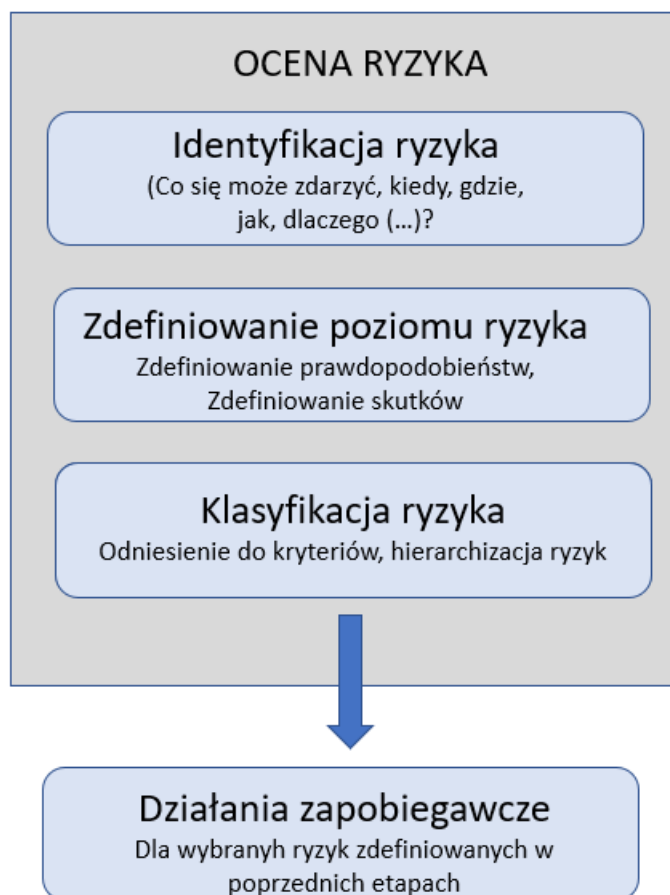
1.8. TECHNIKI INŻYNIERSKIE: SCENARIUSZE KRYZYSOWE

Scenariusz kryzysowy, jest to najogólniej mówiąc sytuacja lub seria zdarzeń, w wyniku których powstaje zagrożenie, które może mieć wpływ na otoczenie w przyszłości. Scenariusze kryzysowe buduje się w oparciu o analizę ryzyka oraz zdefiniowane w tym procesie zdarzenia i prawdopodobieństwo ich zajścia w przyszłości. Analiza ryzyka jest zawsze podstawą wyznaczenia scenariuszy kryzysowych do dalszej analizy oraz określenia działań zapobiegawczych³⁴.

Rysunek 4 przedstawia syntetyczny algorytm procesu budowania scenariuszy kryzysowych w inżynierii bezpieczeństwa. Jest to działanie holistyczne, gdyż z na pozór mało znaczącego zdarzenia może wynikać bardzo wysokie ryzyko.

Do definiowania scenariuszy kryzysowych służą metody analityczne, czyli metody bazujące na wiedzy i doświadczeniu zespołów oraz danych historycznych, np. HAZOP, FMEA, czy drzewo błędów.

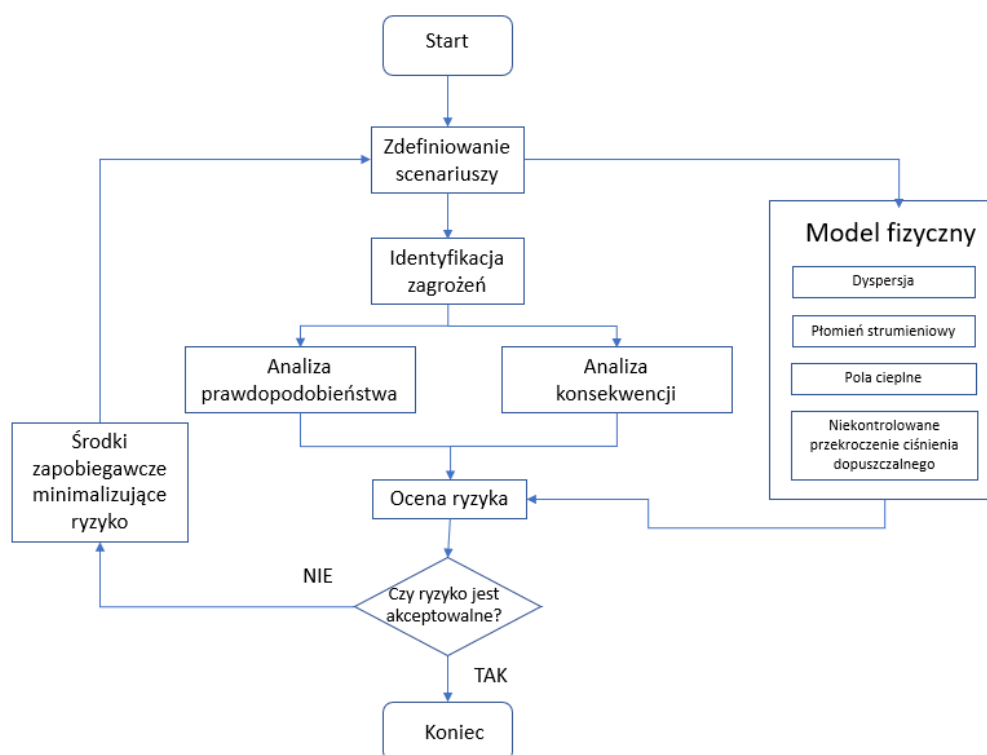
QRA (*Quantitative Risk Analysis*) to formalne i systematyczne podejście do szacowania prawdopodobieństwa i konsekwencji niebezpiecznych zdarzeń oraz ilościowego wyrażania wyników jako ryzyka dla ludzi, środowiska lub Infrastruktury. Ocenia również solidność i ważność wyników ilościowych, identyfikując krytyczne założenia i elementy kierujące ryzykiem³⁵.



Rysunek 4 Budowanie scenariuszy kryzysowych – schemat, opracowanie na podstawie³⁴.

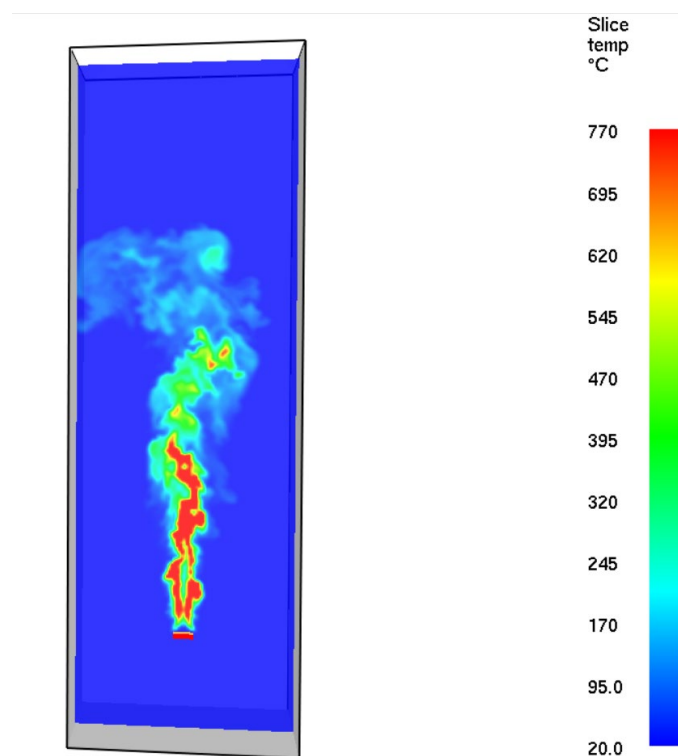
Procedura metody QRA obejmuje identyfikację ryzyka, identyfikację scenariuszy, analizę prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia kryzysowego oraz analizę konsekwencji. Są to analizy numeryczne, tzn. wynikiem jest np. bezpieczna odległość wyrażona w metrach. Wstępem do QRA są często jakościowe metody analizy ryzyka. Nie ma bowiem zamkniętego katalogu pytań i odpowiedzi, jeżeli chodzi o informacje związane z ryzykiem są w ciągłym procesie rozwoju.

W analizach QRA często wykorzystuje się obok metod analitycznych, numeryczne metody obliczeniowe, takie jak np. analizy CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Istnieje szereg dostępnych rozwiązań softwarowych ułatwiających przeprowadzenie analiz typu QRA, np. HyRam. Rysunek 5 przedstawia przykładowy algorytm dla metody QRA dla stacji tankowania wodorem.



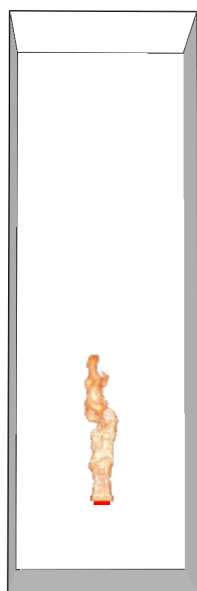
Rysunek 5 Przykładowy diagram dla metody QRA – stacja tankowania wodorem, opracowanie na podstawie³⁶.

Analizę modeli fizycznych przeprowadza się zarówno metodami analitycznymi, jak i metodami komputerowymi (komputerowe wspomaganie projektowania). Metody numeryczne związane z obliczeniową dynamiką płynów (CFD) pozwalają na ocenę scenariuszy kryzysowych wraz z analizami dla czynności zapobiegania zdarzeniom niepożądanym. Poniżej symulacja komputerowa spalania wodoru (wysokości płomienia). Analiza taka pozwala na ocenę wpływu niekontrolowanego spalania wodoru na infrastrukturę i otoczenie, np. poprzez wyznaczenie rzeczywistych pól cieplnych oraz symulację dynamiki płynnego wodoru w zbiorniku transportowym z przegrodami i bez. Zastosowanie przegród w zbiorniku na ciekły wodór minimalizuje siły dynamiczne oddziałujące na zbiornik/pojazd podczas przewozu czynnika. Ma to znaczny wpływ na poprawę bezpieczeństwa w transporcie ciekłego wodoru. Rysunki 6, 7 oraz 8 przedstawiają przykładowe symulacje numeryczne CFD w obszarze technologii wodorowych.



Oprogramowanie: *Fire Dynamics Simulator* (FDS¹) 6.5.3

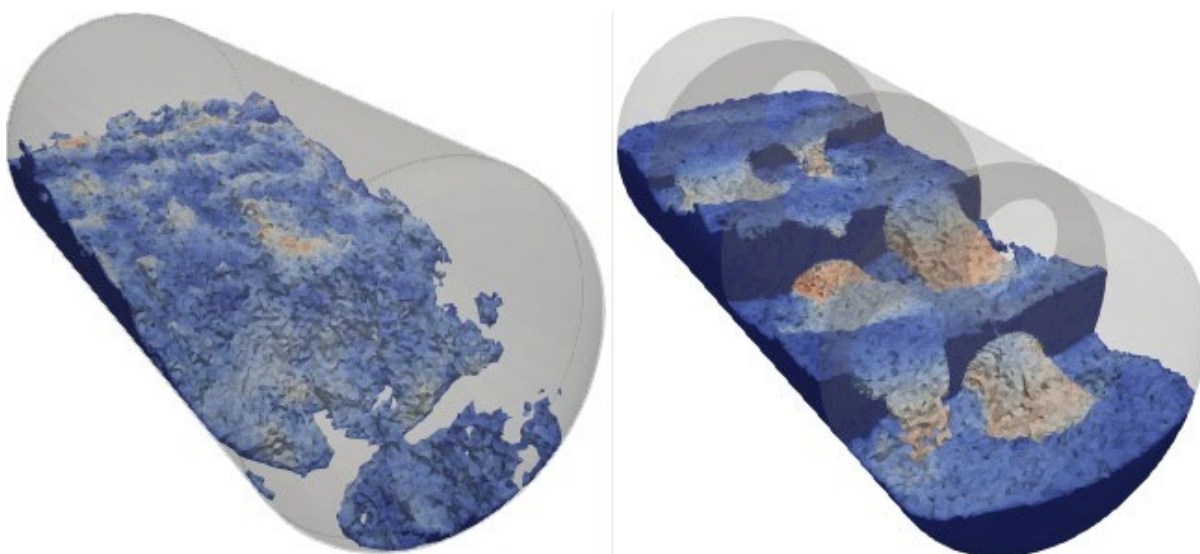
Rysunek 6 Analiza wysokości i kształtu płomienia (tzw. pióropusz) wraz z rozkładem temperatury, opracowanie własne.



Oprogramowanie: *Fire Dynamics Simulator* (FDS) 6.5.3

Rysunek 7 Analiza wysokości i kształtu płomienia (tzw. pióropusz), opracowanie własne.

¹ FDS – Fire and Smoke Simulator.



Oprogramowanie *Open Foam*

Rysunek 8 Dynamika cieczy kriogenicznej w zbiorniku – symulacja numeryczna, opracowanie własne.

Analizy powinny się przeprowadzać dla różnych parametrów wycieku, warunków atmosferycznych i ciśnienia. Komputerowe metody symulacji zdarzeń kryzysowych są bardzo dobrym narzędziem w procesie analizy ryzyka oraz wyznaczania metod zaradczych, dostarczając właściwej informacji we właściwym czasie. Analiza stref bezpieczeństwa przeprowadzone dla stacji tankowania³⁶ wskazuje następujące wymiary strefy niebezpiecznej wokół zbiornika z wodorem o pojemności 2m³:

Tabela 6 Analiza stref niebezpiecznych dla stacji tankowania wodorem³⁶.

Zjawisko	Średnica strefy oddziaływania [m]
Nadciśnienie powyżej 70 kPa	5,0
Nadciśnienie powyżej 16 kPa	7,5
Pola cieplne > 35 kW/m ²	15,0
Pola cieplne > 4 kW/m ²	30,0
Płomień strumieniowy (JET)	17,5
Dyspersja „pióropuszcowa”	33,0

Z analiz bezpieczeństwa wynika, że właściwe zabezpieczenia są bardzo istotnym elementem etapu projektowego, a szkolenia i procedury etapu eksploatacyjnego.

Wszystkie zabezpieczanie powinny być projektowane zgodnie z określonymi parametrami, normami, wytycznymi oraz dobrą praktyką inżynierską. Eksploatacja powinna opierać się na dobrej komunikacji, właściwych procedurach, szkoleniach, kampaniach informacyjnych oraz innych niezbędnych elementach zapewniających bezpieczeństwo.

PODSUMOWANIE

Wodorowa inżynieria bezpieczeństwa opiera się zarówno na przepisach, normach branżowych oraz, co jest niezwykle ważne, na doświadczeniu inżynierskim. Liczne metody szacowania ryzyka związanego z technologiami wodorowymi należy dobierać zgodnie z potrzebą uzyskania informacji niezbędnych w procesach zarządczych na różnych szczeblach decyzyjności. Metody te mogą dostarczyć nam informacji syntetycznych, opisowych (metody jakościowe) lub numerycznych (metody ilościowe). Nie zawsze stosowanie bardziej skomplikowanej i czasochłonnej metody ilościowej jest konieczne z punktu widzenia procesu decyzyjnego. Dobór tych metod powinien bazować na doświadczeniu organizacji i zespołu. Niezwykle ważne jest, aby kwestie inżynierii bezpieczeństwa dopracować już na etapie projektowym na maksymalnie wysokim dostępnym poziomie. Etap budowy, eksploatacji i likwidacji związany z technologiami wodorowymi powinien być również ustandaryzowany poprzez wprowadzenie odpowiednich norm, wytycznych, instrukcji oraz szkoleń i zabezpieczeń. Inna ważną rzeczą w wodorowej inżynierii bezpieczeństwa jest polityka informacyjna zarówno w organizacji jak i w społeczeństwie.

BIBLIOGRAFIA

-
- ¹ Kozak A., „Bezpieczeństwo procesowe w obiektach przemysłowych”, Wydział Bezpieczeństwa Procesowego i Funkcjonalnego, Zespół Koordynacji Inspekcji, Urząd Dozoru Technicznego, Warszawa, 2(2011) ISSN 2081-3279, Budownictwo i inżynieria Środowiska, str. 320.
- ² Grabosz J., „Identyfikacja zagrożeń pracy”, 2020, www.pg.edu.pl, dostęp: 28-03-2023, str. 2.
- ³ Depken, J.; Dyck, A.; Roß, L.; Ehlers, S. Safety Considerations of Hydrogen Application in Shipping in Comparison to LNG. *Energies* 2022, 15, 3250. <https://doi.org/10.3390/en15093250>, archiwum: <http://archive.today/zBOMG>, zarchiwizowano: 11-06-2023: str. 4-7.
- ⁴ Instytut Energetyki, <https://www.ien.com.pl/hydrogen-and-fuel-cell-joint-undertaking> dostęp: 15-04-2023, archiwum: <http://archive.today/YQ7Io>.
- ⁵ Unia Europejska, https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/clean-hydrogen-joint-undertaking_en, dostęp 14-03-2023.
- ⁶ Polski Rejestr Statków S.A., „Bezpieczne wykorzystanie wodoru jako paliwa w komercyjnych zastosowaniach przemysłowych”, czerwiec 2021 Publikacje I (Informacyjne)., str. 37-38.
- ⁷ Łucki M., Hołownia R., Wykrywanie wysokotemperaturowego ataku wodorowego, Urząd Dozoru Technicznego, <https://www.udt.gov.pl/fala-wstecznie-rozproszona>, dostęp 03-04-2023, archiwum.
- ⁸ Sozańska M., Niszczenie wodorowe typu "rybie oczy" wybranych stali dla energetyki, Gliwice: Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe nr 1705, 2006.
- ⁹ Zoła A., Analiza Ryzyka – wytyczne ISO/IEC TR 13335, rozdz. 4.
- ¹⁰ Deakin G., Cooke G. „Future codes for fire safety design,” *Fire Safety Journal*, tom 23, nr 2, str. 193-218, 1994.
- ¹¹ ISO/TR 15916, „Podstawowe zagadnienia dotyczące bezpieczeństwa instalacji wodorowych”, 2004.
- ¹² Department of Licensing and Regulatory Affairs, Bureau of Fire Services, Storage Tank Division, Lansing, MI 48909, <https://www.michigan.gov/-/media/Project/Websites/lara/bfs/Folder4/bfs3867.pdf?rev=26711c78b6524ad9b4bcb64a1bf379c1> .
- ¹³ Łuczak J., Metody szacowania ryzyka – kluczowy element systemu, zarządzania bezpieczeństwem informacji ISO/IEC 27001, Akademia Morska w Szczecinie, 2009, 19(91) s. 63–70 (62).
- ¹⁴ Wróblewski D., ZARZĄDZANIE RYZYKIEM – PRZEGLĄD WYBRANYCH METODYK.

-
- ¹⁵ Coldrick S. et al.: A model evaluation protocol for Computational Fluid Dynamics (CFD) models used in safety analyses for hydrogen and fuel cell technologies. Hazard 25, Symposium Series no 160, str. 1-11.
- ¹⁶ Saffers J.-B., Molkov V.V., Hydrogen Safety Engineering Framework And Elementary Design Safety Tools, International Journal of Hydrogen Energy (2013), doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.06.060, rozdz. 4.3.1.
- ¹⁷ Molkov V.V. and Saffers J-B, INTRODUCTION TO HYDROGEN SAFETY ENGINEERING, Hydrogen Safety Engineering and Research Centre (HySAFER), rozdz. 3.2 University of Ulster, Shore Road, Building 27, Newtownabbey, BT37 0QB, UK.
- ¹⁸ International Labour Organization ICSC 0001 – HYDROGEN, EC Number: 215-605-7.
- ¹⁹ Shen, Y.; Zheng, T.; Lv, H.; Zhou, W.; Zhang, C. Numerical Simulation of Hydrogen Leakage from Fuel Cell Vehicle in an Outdoor Parking Garage. World Electr. Veh. J. 2021, 12, 118. [https://doi.org/ 10.3390/wevj12030118](https://doi.org/10.3390/wevj12030118), str. 2.
- ²⁰ Aziz M. Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety. Energies 2021, 14, 5917. [https://doi.org/ 10.3390/en14185917](https://doi.org/10.3390/en14185917), str 22.
- ²¹ Wolański P., Wójcicki S., „Mechanizm powstawania wybuchu przy nadkrytycznym wpływie paliwa gazowego do atmosfery,” Archiwum Procesów Spalania, tom 2, nr 3, pp. 141-155, 1971.
- ²² Oleszczak P., Wolański P., „Ignition during hydrogen release from high pressure into the atmosphere,” tom 20, nr 6, pp. 539-550, 2010.
- ²³ Hydrogen properties relevant to safety, European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders, This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking 2010.
- ²⁴ Praca zbiorowa, „deflagracja”, Encyklopedia PWN, WN PWN SA. <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/deflagracja;3891306.html> (data dostępu: 03.06.2023).
- ²⁵ Cadwallader L. C., Herring J. S., Safety Issues with Hydrogen as a Vehicle Fuel, INEEL/EXT-99-00522 September 1999, str 21.
- ²⁶ Brown W. J., „SAFETY STANDARD FOR HYDROGEN AND HYDROGEN SYSTEMS,” Office of Safety and Mission Assurance, Washington, DC 20546, 1997., str B2 do B-4.
- ²⁷ BEZPIECZNE WYKORZYSTANIE WODORU JAKO PALIWA W KOMERCYJNYCH ZASTOSOWANIACH PRZEMYSŁOWYCH, Publikacje I (Informacyjne) wydawane przez Polski Rejestr Statków S.A. czerwiec 2021, str. 42.
- ²⁸ LaChance J., „Analyses to Support Development of Risk-Informed Separation Distances for Hydrogen Codes and Standards,” Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2009, str. 6.
- ²⁹ <https://wiedza.pkn.pl/web/wiedza-normalizacyjna/zarzadzanie-srodowiskowe>.
- ³⁰ Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.,” 09 12 2021. [Online]. Available: <https://www.gov.pl/web/klimat/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030-z-perspektywa-do-roku-2040-opublikowana-w-monitorze-polskim>. Podsumowanie strategicznej oceny oddziaływania na środowisko projektu „Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.” [Data uzyskania dostępu: 28-03-2023].
- ³¹ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.956> .

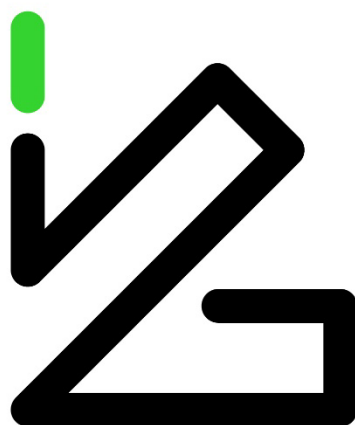
³² Marczak M., Kolory wodoru, Łukasiewicz, Instytut Elektrotechniki, Inżynieria Elektryczna, ISSN 2658-2600, str. 12.

³³ „Niebezpieczeństwa związane z wodorem,” 20-01-2021. [Online]. Available: <https://www.crowcon.com/pl/blog/the-dangers-of-hydrogen/>. [Data uzyskania dostępu: 28 03 2023].

³⁴ Valis D. et al., „Selected overview of risk assessment techniques,” Problemy eksploatacji, tom 4, str. 19-32, 2009.

³⁵ Falck A., „Quantitative risk assessment,” DNV, [Online]. Available: <https://www.dnv.com/services/quantitative-risk-assessment-1397> . [Data uzyskania dostępu: 28 03 2023].

³⁶ Xuchao Zhang et al., „Hydrogen Leakage Simulation and Risk Analysis of Hydrogen Fueling Station in China,” Sustainability, tom 14, nr 12420. <https://doi.org/10.3390/su141912420>, 2022.



Łukasiewicz

Instytut
Organizacji
i Zarządzania
w Przemysle
ORGMAZ