

Adam S. Markowski

Analiza ryzyka w procesie magazynowania i przesyłania skroplonych gazów toksycznych

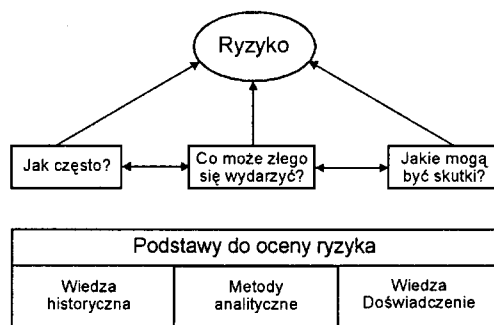
Zarządzanie bezpieczeństwem i ryzykiem w przemyśle, w którym stosuje się w dużych ilościach niebezpieczne substancje chemiczne, stanowi podstawę do zapobiegania występowaniu tzw. nadzwyczajnych zagrożeń chemicznych. Dotychczasowa praktyka wskazuje, że zagrożenia te są potencjalnie zdolne do spowodowania ogromnych strat ludzkich, ekonomicznych i środowiskowych [1]. Takie zagrożenia wymagają specjalnej uwagi, tak ze strony producentów jak i ze strony społeczeństwa. Stąd w ostatnich trzydziestu latach, w ramach intensywnie rozwijającej się nauki o bezpieczeństwie, opracowano specjalną sformalizowaną technikę, zwaną oceną ryzyka (*risk assessment*), która stanowi narzędzie w procesie podejmowania decyzji w obszarze ryzyka. Pierwszym etapem tej oceny jest analiza ryzyka występujących zagrożeń, obejmująca obliczenie parametrów charakteryzujących ryzyko.

Dla instalacji wysokiego ryzyka, często spotykanych w przemyśle petrochemicznym, azotowym czy syntezy organicznej, ocena ta dokonywana jest ilościowo przy zastosowaniu tzw. probabilistycznej oceny ryzyka (*Probabilistic Risk Assessment – PRA*), opracowanej dla energetyki jądrowej, a następnie adaptowanej dla przemysłu chemicznego (*Chemical Process Quantitative Risk Analysis – QRA*) [2]. Ocena ryzyka stanowi główny element raportów bezpieczeństwa wymaganych w krajach Unii Europejskiej dla instalacji o potencjalnych nadzwyczajnych zagrożeniach [3].

Celem niniejszej pracy była analiza ryzyka dla typowej instalacji magazynowo-transportowej, zawierającej duże ilości skroplonych gazów toksycznych. Analiza została wykonana na przykładzie instalacji do magazynowania i przesyłania ciekłego chloru, jednakże instalacje takie są często stosowane również w przypadku innych gazów toksycznych, np. amoniaku, fosgenu itp. Opierając się na wcześniej wykonanej identyfikacji zdarzeń awaryjnych [4] określono mechanizm powstawania scenariuszy awaryjnych, obliczono wielkości prawdopodobieństwa zajścia takich scenariuszy oraz ich skutków. Wyniki dotyczące ryzyka przedstawiono za pomocą konturów ryzyka indywidualnego oraz krzywych ryzyka grupowego F–N.

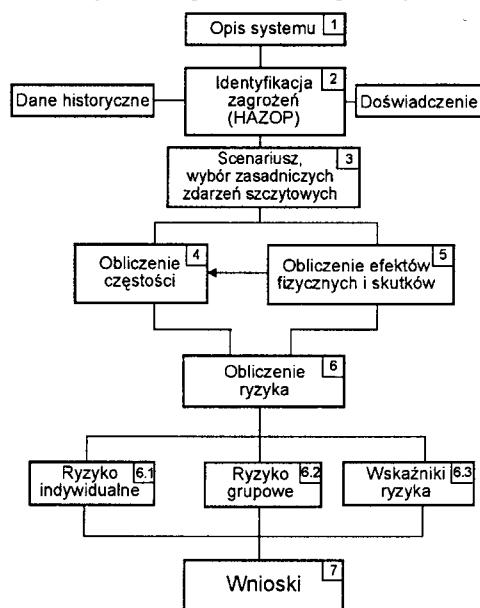
Model analizy ryzyka

Ryzyko rozumiane jest jako możliwość występowania wypadków, awarii czy też katastrof, które przynoszą różnego rodzaju straty, przede wszystkim ludzkie, środowiskowe oraz ekonomiczne. Dla wyjaśnienia ryzyka i jego oceny celowe jest uzyskanie odpowiedzi na trzy zasadnicze pytania przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Pojęcie i istota ryzyka

Znanych jest wiele różnych metodologii wykonywania analizy ryzyka, odniesionych do różnych kategorii ryzyka, jak i specyficznych branż przemysłowych. Analiza ryzyka procesowego stanowi ciąg analiz jakościowych i obliczeń, w którym wyniki z poprzedniego etapu stanowią dane wyjściowe do obliczeń etapu następnego. Zwykle analiza ryzyka wykonywana jest według modelu przedstawionego na rysunku 2 [5–7].



Rys. 2. Schemat analizy ryzyka

Na analizę ryzyka składają się następujące stadia:

- opis systemu, który obejmuje charakterystykę instalacji, stosowanych surowców, półproduktów oraz produktów i odpadów, jej lokalizację (usytuowanie względem obszarów zamieszkałych i ekosystemów), a także drogi dojazdowe i transportowe,
- identyfikacja zagrożeń, polegająca na ustaleniu potencjalnych przyczyn zdarzeń szczytowych, określających wpływ substancji niebezpiecznych i/lub energii i ich skutków,

– określenie scenariusza rozwoju zdarzenia szczytowego poprzez sformułowanie wpływu stosowanych funkcji bezpieczeństwa lub warunków zewnętrznych na powstanie konkretnego efektu fizycznego i następnie jego skutków,

– obliczenie prawdopodobieństwa lub częstości powstawania zdarzeń szczytowych (wypadkowych) oraz scenariuszy rozwoju tych zdarzeń,

– analiza efektów fizycznych zagrożeń i ich skutków,

– obliczenie ryzyka i jego prezentacja w postaci konturów ryzyka indywidualnego oraz grupowego.

Dla wielu instalacji i procesów nie jest konieczne prowadzenie pełnej analizy ryzyka obejmującej wszystkie stadia, lecz wystarczy jedynie wykonać jakościową identyfikację zagrożeń. Jednakże, dla procesów w których występują w dużych ilościach substancje niebezpieczne, których uwolnienie mogłoby spowodować zagrożenie poza terenem zakładu, konieczne są ilościowe analizy ryzyka obejmujące wszystkie wymienione stadia.

W celu wykonania analizy ryzyka stosuje się szereg sformalizowanych metod [6–9], przy czym wybór konkretnej metody zależy zarówno od skali zagrożeń, fazy rozwoju projektu, procedury przyjętej w danej firmie oraz wymogów formalnoprawnych.

W niniejszym projekcie wykorzystano drzewa błędów i zdarzeń, jako najbardziej powszechne metody stosowane w ilościowej analizie ryzyka.

Ilościowa analiza ryzyka

Opis systemu

Szczegółowy opis systemu przedstawiono w pracy [4]. Analizowany system produkcyjny stanowił zespół magazynowy składający się z kilku zbiorników o pojemności od 50 do 63 m³, układu do rozładunku/załadunku cystern i beczek, systemu rurowciągów oraz układu absorpcyjnego do niszczenia chloru. System produkcyjny zlokalizowany został w środku zakładu (minimalna odległość od dużych skupisk ludności wynosi 1,2+1,3 km).

Identyfikacja zagrożeń

Na podstawie poprzednio wykonanej analizy HAZOP, wraz z zastosowaniem matrycy ryzyka [4], wytypowano następujące zdarzenia wypadkowe, które stanowią największe potencjalne zagrożenie:

– awaria rurowciągu przesyłowego chloru ciekłego z zakładu produkcyjnego do magazynu,

– pęknięcie rury przeładunkowej lub uszkodzenie armatury przy operacjach przetłaczania chloru ze zbiornika magazynowego do cysterny lub odwrotnie,

– przepełnienie cysterny (przy jednoczesnym wzroście temperatury zewnętrznej).

Katastroficzne pęknięcie zbiornika, jak i cysterny, nie zostało uwzględnione w rozważaniach z uwagi na bardzo małe prawdopodobieństwo wystąpienia takiego zdarzenia. Zwykle takie zdarzenie rozpatrywane jest w przypadku możliwości wystąpienia działania z zewnątrz, np. upadku samolotu, uderzenia środkiem transportu, działań sabotażowych, zewnętrznego pożaru, wybuchu BLEVE lub efektu domino. Pominęto również awarie rurowciągów parowych, które przedstawiają znacznie mniejsze zagrożenie niż rurowciągi z ciekłym chlorem.

Scenariusze zdarzeń awaryjnych

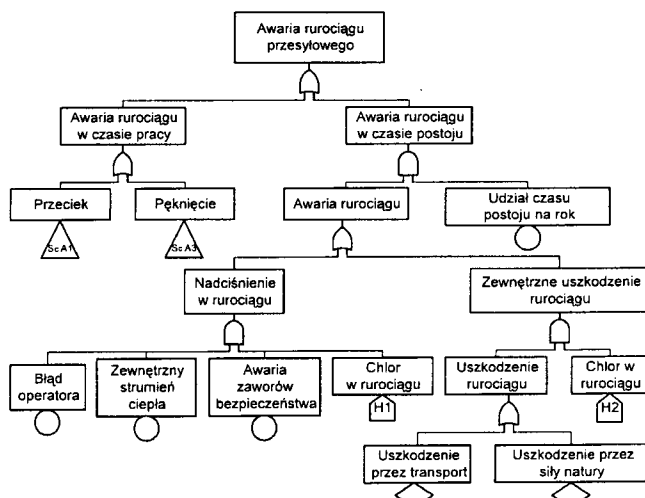
Pod pojęciem scenariuszy określa się mechanizmy powstawania zdarzeń wypadkowych oraz rozwój tych zdarzeń w różnych warianty w zależności od warunków zewnętrznych. Decydować będzie tu niezawodność techniczno-organizacyjna całego systemu, z uwzględnieniem założeń dotyczących potencjalnych warunków wpływu substancji toksycznej, oraz warunki meteorologiczne. Można więc uznać, że istnieje ogromna liczba różnych sytuacji awaryjnych i teoretycznie rzecz biorąc można uwzględnić wszystkie warianty, jednakże w praktyce dokonuje się wyboru kilku przypadków wpływu substancji toksycznej, dla których następnie określa się ich częstość oraz mechanizm powstawania. Dla potrzeb tego artykułu wybrano sześć scenariuszy. Do wyboru wariantów scenariuszy wypadkowych zastosowano kombinację różnych parametrów mających wpływ na rozwój potencjalnych zdarzeń awaryjnych, a mianowicie:

– typ i rodzaj awarii (ciągły, chwilowy – katastroficzny, w czasie pracy i w czasie postoju),

– wielkość otworu wpływu substancji toksycznej (pęknięcie oznaczające wpływ całym przekrojem rurowciągu oraz przeciek oznaczający wpływ przez otwór, którego powierzchnia nie przekracza 10% powierzchni przekroju poprzecznego rurowciągu),

– lokalizacja otworu (połowa długości rurowciągu i miejsca specjalne, np. nad drogą).

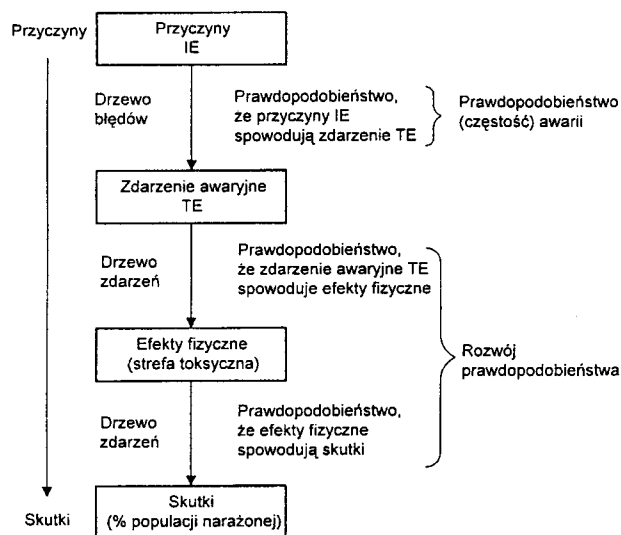
W celu określenia mechanizmu powstawania zdarzeń wypadkowych wykorzystano technikę drzewa błędów, którego przykład dla zdarzenia wypadkowego (awaria rurowciągu przesyłowego – tab.2) przedstawia rysunek 3. Symbole graficzne występujące na tym rysunku są typowe dla techniki drzewa błędów, która szerzej opisana jest w licznych pracach [6–10].



Rys. 3. Drzewo błędów dla awarii rurowciągu przesyłowego chloru

Każde zdarzenie awaryjne rozwija się w ciąg zdarzeń charakteryzujących się różnymi scenariuszami, w zależności od systemów przeciwdziałania oraz warunków zewnętrznych. Wyrazem funkcjonowania systemów przeciwdziałania jest efektywny czas zatrzymywania wpływu substancji toksycznej, który założono na podstawie analizy całego systemu technicznego i ratowniczego. Przyjęto skrajne wartości czasu, tj. 10 min (wariant optymistyczny) i 30 min (wariant pesymistyczny) dla awarii rurowciągu przesyłowego oraz 2 i 5 min dla

załadunku i rozładunku cystern z chlorem. Po wypływie chloru następuje dalszy rozwój zdarzeń w zależności od prędkości i kierunku wiatru oraz stabilności atmosferycznej. Określa to kombinacja klas stabilności Pasquilla (A, B, C, D, E, F) i prędkości wiatru. Do obliczeń przyjęto typowy zestaw, tj. klasę stabilności atmosfery D i prędkość wiatru 5 m/s (D-5) oraz klasę stabilności atmosfery F i prędkość wiatru 2 m/s (F-2), odzwierciedlający najbardziej stabilne warunki atmosferyczne.



Rys. 4. Model hybrydowy rozwoju zdarzeń awaryjnych

Hybrydowy model rozwoju zdarzeń awaryjnych pokazuje rysunek 4, w którym zastosowano kombinację drzew błędów i zdarzeń. Zdarzenie wypadkowe, będące zdarzeniem szczytowym (TE) w drzewie błędów, stanowi zdarzenie początkujące w drzewie zdarzeń, wykorzystywanym do określenia wpływu występowania konkretnych okoliczności, powodujących zarówno określone efekty fizyczne jak i określone skutki. Okoliczności te mogą być związane:

- z lokalizacją (np. warunki atmosferyczne),
- z systemem technicznym (np. system przeciwpożarowy i ratownictwa chemicznego),
- z lokalizacją i systemem (np. występowanie zapłonu w określonej lokalizacji).

W większości dane te trudno uzyskać i mają one charakter statystyczny. Model ten został następnie wykorzystany do obliczenia częstości występowania scenariuszy zdarzeń awaryjnych.

Tabela 1. Zestawienie danych niezawodnościowych

Element	Intensywność uszkodzeń (λ)	
	przeciek	pęknięcie
Rurociąg płaszczowy <3"	$3 \cdot 10^{-10}$ 1/mh	$1 \cdot 10^{-10}$ 1/mh
Rurociąg <3"	$6 \cdot 10^{-10}$ 1/mh	$2 \cdot 10^{-10}$ 1/mh
Spawy	$3 \cdot 10^{-8}$ 1/h	$3 \cdot 10^{-9}$ 1/h
Zawory ręczne	$1 \cdot 10^{-7}$ 1/h	$1 \cdot 10^{-9}$ 1/h
Kolnierze	$3 \cdot 10^{-8}$ 1/h	$1 \cdot 10^{-8}$ 1/h
Połączenia ruchome	$2 \cdot 10^{-6}$ 1/h	$2 \cdot 10^{-6}$ 1/h
Zbiorniki ciśnieniowe	$3 \cdot 10^{-5}$ 1/h	$3 \cdot 10^{-6}$ 1/h
Zagrożenia zewnętrzne	$6 \cdot 10^{-10}$ 1/h	
Awaria zaworów bezpieczeństwa	0,0015/na żądanie	
Błąd operatora	0,001/na żądanie	

Częstość występowania scenariuszy zdarzeń awaryjnych

Podstawowym zagadnieniem jest przyjęcie właściwych danych dotyczących intensywności uszkodzeń dla zdarzeń inicjujących (IE). Zwykle korzysta się tu z odpowiednich baz danych niezawodnościowych, które najczęściej odnoszą się do średnich warunków technicznych i operacyjnych i nie rozróżniają konkretnej branży przemysłowej. Dane te obarczone są jednak dużą niepewnością. Badana instalacja z jednej strony może reprezentować znacznie gorszy standard techniczny niż instalacja, dla której przyjęto te dane, zaś z drugiej strony niewłaściwe jest przyjmowanie zbyt pesymistycznych danych, szczególnie dla instalacji nowo projektowanych. Podobnie, przenoszenie danych niezawodnościowych z jednej branży przemysłowej na inną, może również budzić pewne zastrzeżenia. Często akceptowana niepewność dotycząca tych danych zawiera się w granicach 10-krotnej poprawki.

W wyniku dokonanego przeglądu literaturowego [7,10–14] wybrano średnie wartości intensywności uszkodzeń, zarówno dla przecieków jak i pęknięć w instalacji (tab.1).

Obliczenia częstości występowania scenariuszy zdarzeń awaryjnych wykonano w następującej kolejności:

- określenie częstości (F) danego zdarzenia awaryjnego za pomocą drzewa błędów, w oparciu o dane dotyczące intensywności uszkodzeń (λ) zdarzeń inicjujących,
- określenie prawdopodobieństw warunkowych (P) lub częstości dla systemów bezpieczeństwa (przeciwdziałania), również za pomocą drzew błędów,

Tabela 2. Częstość występowania niektórych scenariuszy awaryjnych

Opis	Numer	Częstość, 1/h		Uwagi
Awaria rurociągu przesyłowego o średnicy 0,065 m i długości 230 m	ScA0 ScA1 ScA2	czas wypływu		postój przeciek pęknięcie (15 m od zasilania)
		10 min	30 min	
		0,0025·10 ⁻⁶		
		0,027·10 ⁻⁶ 0,014·10 ⁻⁶	0,329·10 ⁻⁶ 0,062·10 ⁻⁶	
Awaria rurociągu cysterna – magazyn o średnicy 0,038 m i długości 50 m	ScC1 ScC2	2 min	5 min	przeciek pęknięcie (połowa długości)
		0,173·10 ⁻⁶	0,78·10 ⁻⁶	
		0,012·10 ⁻⁶	0,73·10 ⁻⁶	
Przepelnienie cysterny	ScD	0,106·10 ⁻⁷		

– określenie rozwoju prawdopodobieństwa danego zdarzenia, przy uwzględnieniu wpływu systemów bezpieczeństwa, za pomocą drzewa zdarzeń, a tym samym określenie częstości powstawania konkretnych efektów fizycznych w danym scenariuszu,

– określenie rozwoju prawdopodobieństwa danego scenariusza względem założonych warunków zewnętrznych (np. warunków D-5 i kierunku wiatru) również za pomocą drzewa zdarzeń.

W ten sposób powstaje szereg scenariuszy wypadkowych dla danego zdarzenia awaryjnego, np. wypływu chloru ciekłego z małego otworu w połowie rurociągu przez 10 min o częstości występowania F_A , który spowodować może powstanie strefy toksycznej i narażenie ludności znajdującej się na danym terenie, przy warunkach pogodowych D-5. Częstość (F_A) występowania danego scenariusza wypadkowego (A) wyraża ogólny wzór:

$$F_A = F \cdot P \cdot f \quad (1)$$

gdzie:

F – częstość występowania zdarzenia awaryjnego,

P – prawdopodobieństwo poprawnej pracy systemu przeciwdziałania,

f – częstość kierunkowa, określająca procentowy udział określonego kierunku wiatru w różny wiatrów.

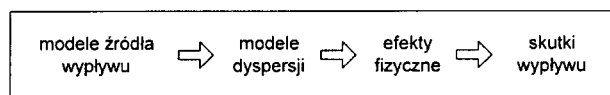
Tabela 2 zawiera dane dotyczące częstości występowania poszczególnych scenariuszy awaryjnych, zgodnie z powyższym modelem. Dane te wskazują, że częstości zależą od czasu wypływu substancji toksycznej oraz rodzaju awarii. Najwyższe wartości ma zdarzenie wypadkowe dotyczące pęknięcia rury łączącej cysternę i magazyn. Potwierdzają to również dane z dotychczas zaistniałych wypadków [15]. Jest to zatem najczulszy punkt, gdzie najłatwiej o awarię. Zdarzenia związane z przeciekami substancji toksycznych występują znacznie częściej aniżeli pęknięcia. Decydujący wpływ ma czas wypływu, którego skrócenie może istotnie zmienić wartość częstości. Jest to wskazówka do wyboru środków przeciwdziałania na wypadek awarii.

Analiza efektu fizycznego i skutków

Skutki wypływu substancji toksycznych silnie zależą od ich właściwości fizycznych, toksyczności, warunków meteorologicznych, otoczenia instalacji (wewnątrz czy na zewnątrz budynku, między budynkami lub na otwartej przestrzeni, na wodzie), pory dnia i nocy, stosowanych systemów przeciwdziałania i ochrony oraz wielkości populacji otaczającej instalację. Z każdą z tych okoliczności wiąże się również określone prawdopodobieństwo jej występowania, co oznacza, że nie zawsze każdy wypływ substancji toksycznej może prowadzić do zagrożenia i nie każde zagrożenie może wywołać negatywne skutki, np. uruchomienie systemu zraszania wodą może zapobiec rozprzestrzenianiu się chmury toksycznej. Wpływ tych okoliczności na rozwój zdarzenia wypadkowego nazywa się rozwojem prawdopodobieństw, co prezentuje model hybrydowy pokazany na rysunku 4.

Do określenia skutków konieczne jest obliczenie tzw. efektów fizycznych, które w przypadku wypływu substancji toksycznych rozumiane są jako strefa, w której stężenie substancji niebezpiecznej zagraża bezpośrednio zdrowiu załogi oraz ludności. Znaczącymi tej strefy, dane populacyjne oraz oddziaływanie danej substancji na ludzi i środowisko (zależność dawka – odpowiedź), można wówczas obliczyć skutki wypadkowych wypływów sub-

stancji toksycznych. Stąd też model obliczeń efektów fizycznych i skutków obejmuje ciąg obliczeń przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 5. Model obliczeń efektów i skutków

Wpływ chloru w przypadku przecieku (mały otwór) oblicza się za pomocą modelu wypływu cieczy, natomiast dla pęknięcia rury stosuje się model wypływu dwufazowego. Po wypływie następuje proces odparowania cieczy, składający się z trzech faz:

- początkowe samooodparowanie aż do osiągnięcia atmosferycznego punktu wrzenia chloru,
- odparowanie z powierzchni rozlewiska wskutek doprowadzenia ciepła od podłoża,
- odparowanie z kropel na skutek turbulencji atmosferycznej.

Całkowita szybkość odparowania składa się z tych trzech strumieni. Powstała para chloru będzie mieszana i transportowana z powietrzem wskutek turbulencji, która zależy od warunków atmosferycznych, a mianowicie od stabilności atmosferycznej oraz od prędkości i kierunku wiatru. Do obliczenia dyspersji chloru w powietrzu wykorzystuje się modele gazu ciężkiego. Odpowiednie modele obliczeniowe w zakresie analizy efektów fizycznych zagrożeń podaje *Yellow Book* [5].

W celu obliczenia efektów fizycznych, tj. stref toksycznych, w których występuje niebezpieczna chmura chloru, konieczny jest wybór odpowiedniej wartości stężenia progowego chloru, przy której występuje zagrożenie dla ludzi i środowiska naturalnego. Do celów przeciwdziałania na wypadek awarii przyjmuje się wartości stężeń nie powodujące trwałych skutków zdrowotnych. Zwykle przyjmowane są wartości IDLH (*Immediately Dangerous to Life and Health*). Zgodnie z poradnikiem NIOSH [16], wartość IDLH dla chloru wynosi 74 mg/m^3 i odnosi się do stężenia substancji, na które ekspozycja człowieka przez 30 min nie wywołuje stałych, ujemnych skutków zdrowotnych. Warto dodać, że wybór tej wartości jest dyskusyjny i brak jest jednoznacznych rekomendacji w tym zakresie.

W tabeli 3 przytoczono zasięg stref toksycznych (dla najgorszych wariantów), które otrzymano stosując program komputerowy EFFECTS 2 [17]. Można zaobserwować, że długość stref zagrażających zdrowiu ludzi przekracza kilka kilometrów i zależy od natężenia wypływu substancji toksycznej oraz od warunków pogodowych. Informacja ta, łącznie z mapami danego terenu, pozwala na podejmowanie odpowiednich decyzji zarówno w zakresie planów awaryjnych, decyzji lokalizacyjnych jak i odpowiednich systemów przeciwdziałania.

W celu obliczenia procentowego udziału liczby osób narażonych na wypadek śmiertelny można skorzystać z proponowanych różnych modeli toksyczności, np. dawki śmiertelnej, funkcji probitowej lub stężenia śmiertelnego (LC_{50}). Dla chloru $LC_{50}=1.017 \text{ mg/m}^3$ przy czasie ekspozycji 30 min, natomiast funkcję probitową określa równanie [18]:

$$Pr = -6,35 + 0,5 \ln(C^{2,75} t) \quad (2)$$

gdzie stężenie (C) wyrażone jest w mg/m^3 , a czas ekspozycji (t) w min.

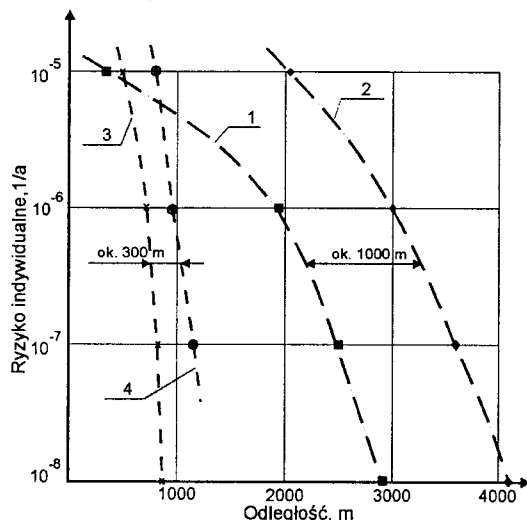
Tabela 3. Charakterystyka stref toksycznych

Numer	Wpływ substancji toksycznej kg/s	Czas wypływu substancji toksycznej s	Odległość od źródła awarii (pogoda D-5) m	Odległość od źródła awarii (pogoda F-2) m
ScA0	4,88 (1.120 kg)	229	2.110	2.930
ScA1	17,7	600/1.800	4.650/4.650	5.480/5.050
ScA2	50,5	600/1.800	8.720/8.720	7.570/8.040
ScC1	4,02/9,13	120/300	1.880/3.110	2.340/3.750
ScC2	8,37	120/300	2.940/2.940	2.930/3.780

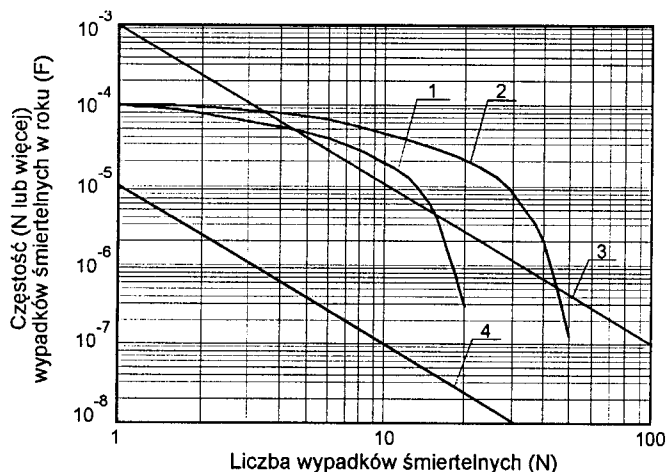
Ryzyko indywidualne i grupowe

Ryzyko wyraża się za pomocą:

- ryzyka indywidualnego, jako częstość wypadku śmiertelnego w określonej lokalizacji, przypadającego na pojedynczą osobę w czasie jednego roku,
- ryzyka grupowego lub socjalnego odnoszącego się do grupy osób, które mogą być narażone wskutek danego zdarzenia zachodzącego z określoną częstością.



Rys. 6. Wpływ czasu wypływu substancji toksycznej na kontur ryzyka indywidualnego (ScA1: krzywa 1 – czas wypływu 10 min, krzywa 2 – czas wypływu 30 min; ScC1: krzywa 3 – czas wypływu 2 min, krzywa 4 – czas wypływu 5 min)



Rys. 7. Krzywa ryzyka grupowego F-N dla scenariusza ScA2 (1 – 50% populacji, 2 – 100% populacji, 3 – maksymalny poziom ryzyka, 4 – minimalny poziom ryzyka)

Ryzyko indywidualne przedstawia się w postaci konturów ryzyka, stanowiących linię łączącą różne lokalizacje, w których istnieje jednakowa wartość częstości występowania wypadku śmiertelnego. Ryzyko (typowo) gwałtownie obniża się z wraz odległością, stąd też kontury wykreśla się zgodnie ze zmniejszającym się wykładnikiem określającym wielkość ryzyka, np. 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} itp. Kontury ryzyka prezentowane są na mapie, co pozwala na wizualizację ryzyka. Wprawdzie kontury te nie pokazują liczby ludzi ekspozowanych na dany typ ryzyka, to jednak ich znajomość daje możliwość wskazania tych obszarów populacyjnych (geograficznych), gdzie występuje taka ekspozycja. Można więc oceniać, czy szczególnie wrażliwe obszary populacyjne, jak np. szkoły, szpitale czy osiedla znajdują się w obszarach wysokiego ryzyka. Jest to więc narzędzie w procesie podejmowania decyzji.

Ryzyko grupowe bierze pod uwagę liczbę ofiar śmiertelnych występujących w każdym wydarzeniu wypadkowym. Ryzyko to jest przedstawiane w postaci zależności F-N, gdzie F oznacza kumulatywną wartość częstości wystąpienia grupowych ofiar śmiertelnych (częstość w roku), zaś N oznacza liczbę tych ofiar.

Do obliczenia konturów ryzyka indywidualnego oraz grupowego zastosowano metodę polecaną przez CPQRA [2]. Kontury ryzyka dla wybranych zdarzeń awaryjnych ScA1 i ScC2 przedstawia rysunek 6.

Zasadnicze znaczenie dla lokalizacji poszczególnych konturów ryzyka ma czas wypływu substancji toksycznej, który może być uważany za wskaźnik sprawności zastosowanego systemu przeciwdziałania na wypadek awarii. Skrócenie czasu wypływu można osiągnąć przez np. zastosowanie automatycznych zaworów odcinających, uruchamianych za pomocą detektorów chloru. Daje to znaczne zmniejszenie promienia konturu, który spełni tym samym minimalne kryterium akceptacji poziomu ryzyka wynoszące w wielu krajach 10^{-6} [3]. Typową krzywą F-N dla scenariusza ScA2 przedstawia rysunek 7.

Zmniejszenie populacji ludzi o połowę w strefie toksycznej (np. likwidacja niektórych obiektów pomocniczych znajdujących się w okolicach magazynu), daje możliwość wypełnienia kryteriów akceptacji dla ryzyka grupowego, stosowanych w krajach Unii Europejskiej [3]. Kryteria te określają linie minimalnego i maksymalnego poziomu ryzyka.

Ocena dokładności

Ilościowa analiza ryzyka wywołuje wiele kontrowersji, które dotyczą zarówno poczynionych różnych założeń oraz obliczania prawdopodobieństwa zdarzeń wypadkowych jak i skutków, czego rezultatem jest niepewność co do otrzymanych wyników. Ilościowa ocena niepewności jest bardzo trudna. Niektóre założenia mogą być sprawdzone, np. za pomocą

symulacji *Monte Carlo*, lecz najbardziej ważne elementy, jak intensywność uszkodzeń, zależności określające efekty toksyczności jak i modele dyspersji, nie podlegają takiej ocenie, stąd też ocena niepewności jest zwykle przedstawiana jakościowo.

Prezentowane wyniki mogą być ocenione jako najlepsze z możliwych (*best possible estimate*), szczególnie w zakresie długości stref toksycznych, gdyż wykorzystują sprawdzone modele matematyczne. Dokładność określenia prawdopodobieństwa zdarzeń awaryjnych może budzić pewne wątpliwości, gdyż brak było rzeczywistych danych niezawodnościowych zdarzeń inicjujących (IE) dla tej instalacji, jak również trudne były do określenia prawdopodobieństwa warunkowe w modelu hybrydowym rozwoju prawdopodobieństw. Dotyczy to szczególnie charakterystyk niezawodności ludzkiej. Do obliczeń przyjmowano wartości średnie otrzymane z wielu różnych źródeł literaturowych.

W przypadku oceny skutków, która bazuje na różnych matematycznych modelach toksyczności, ocena niepewności nie może być w pełni dokonana, ponieważ brak jest danych dla całego zakresu natężeń wpływu substancji toksycznej.

Podsumowanie

Wykonana analiza ryzyka dla instalacji magazynowania i przesyłania chloru udowodniła, że technika ta może być bardzo użyteczna. Daje ona szczegółowy wgląd w bezpieczeństwo, identyfikuje szczególnie ważne obszary instalacji oraz zwiększa zainteresowanie obsługi zagadnieniami zapewnienia bezpiecznych warunków pracy. Analiza ta określiła zakres stref potencjalne zagrożonych skażeniem toksycznym, jak również podała wartości konturów ryzyka indywidualnego oraz krzywe ryzyka grupowego. Stwierdzono duży wpływ czasu wypływu substancji toksycznej na długość konturów, natomiast wielkość populacji miała decydujący wpływ na ryzyko grupowe.

Zmniejszenie poziomu ryzyka winno przede wszystkim koncentrować się wokół działań związanych ze zmniejszeniem skutków. Można to osiągnąć zmniejszając potencjalne czasy wypływu substancji toksycznej, co uzyska się zarówno przez wprowadzenie odpowiednich systemów technicznych przeciwdziałania jak i szkolenie załogi na wypadek awarii. Uzyskane wyniki wskazują, że poziom ryzyka analizowanej

instalacji może być zmniejszony poniżej akceptowanych kryteriów, natomiast określenie długości stref toksycznych daje możliwość przygotowania odpowiednich planów na wypadek awarii, a tym samym systemów przeciwdziałania zagrożeniu, szczególnie w otoczeniu zakładu.

LITERATURA

1. V. C. MARSCHALL: Major Chemical Hazards. J. Wiley, New York 1989.
2. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. CCPS, AIChE, 1989.
3. Dyrektywy EWG nr 82/501/EEC, nr 87/16/EEC, 88/610/EEC, Dyrektywy EWG dotyczące ochrony pracy. CIOP, Warszawa 1992.
4. A. S. MARKOWSKI: Studium HAZOP dla stokażu skroplonych gazów toksycznych. Ochrona Środowiska, 1996, nr 2(61), ss. 35–38.
5. TNO Yellow Book. CPR 14E, 1991.
6. D. A. CRAWL, J. F. LOUVAR: Chemical Process Safety: Fundamentals with Application. Prentice Hall, 1990.
7. F. P. LEES: Loss Prevention in the Process Industries. Vol. 2, Butterworths, London 1980.
8. Guidelines for Hazard Evaluation Procedures. CCPS-AIChE, New York 1992.
9. A. S. MARKOWSKI: Identyfikacja i ocena zagrożeń chemicznych. Mat. sem. Ogóln. Stow. Służb bhp, Świecie 1993.
10. J. R. TAYLOR: Risk Analysis for Process Plant, Pipelines and Transport, 1993.
11. A. E. GREEN, J. R. BOURNE: Reliability technology. J. Wiley, 1972.
12. Guidelines for Process Equipment Reliability Data. CCPS, AIChE, 1989.
13. SYREL-databank. SRS U.K.
14. COMPI-DATABANK. TNO-Apeldoorn.
15. G. POLI: Accidents on the users premises and guidelines for the safe handling and use of chlorine. GEST 93/199, third EURO CHLOR Technical Seminar, 1993.
16. NIOSH: Pocket Guide to Chemical Hazards. U.S. Department of Health and Human Services, 1994.
17. EFFECTS 2 – Physical Effects of Accidental Releases of Dangerous Substances. TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation, Apeldoorn (Netherlands) 1995.
18. TNO Green Book. CPR 16E, 1989.

Risk Analysis for the Storage and Transport of Liquefied Toxic Gases

Risk analysis was carried out for a conventional system providing storage and transport of liquefied chlorine. The mechanism of generating emergency scenarios was defined, and the probability of occurrence for such scenarios (as well as the effects of their occurrence) was calculated. The results were represented by the contours of individual risk and by the curves

of group risk (F-N). The risk analysis method was found to have two major advantages – it identified some particularly important areas of industrial systems, decreased the risk level of the systems below the accepted criteria, and enabled selection of appropriate measures in case of maloperation or failure.