

Adam S. Markowski

## Studium HAZOP dla stokażu skroplonych gazów toksycznych

Studium Zagrożeń i Zdolności Operacyjnych – HAZOP (*Hazard and Operability Study*) jest systemową analizą identyfikacji potencjalnych zagrożeń (awarii) i innych strat produkcyjnych (np. jakości), spowodowanych odchyleniami od normalnych, założonych warunków operacyjnych procesu. Analiza ta wykonywana jest szczególnie na etapie projektowania, przy modyfikacjach, jak również jest stosowana dla instalacji pracujących. Biorąc pod uwagę schemat technologiczno-pomiarowy instalacji, instrukcje ruchowe oraz inne dane dotyczące stosowanych materiałów i aparatów oraz ich rozmieszczenie, analizuje się poszczególne węzły instalacji pod kątem powstawania odchylenia od założonych parametrów procesu i ocenia się, czy odchylenia te mogą mieć negatywny wpływ na bezpieczne i efektywne prowadzenie procesu.

Skroplone gazy toksyczne, jak np. chlor, amoniak, dwutlenek siarki lub fosgen, stanowią poważne potencjalne zagrożenie i stosowane w masowych ilościach mogą powodować nadzwyczajne zagrożenia dla środowiska. Substancje te używane są w licznych branżach przemysłowych, np. rocznie w świecie produkuje się ponad 30 mln ton chloru, w tym w Polsce około 150 tys. ton. Skroplone gazy zwykle magazynowane są pod wysokim ciśnieniem lub w stanie wychłodzonym pod ciśnieniem atmosferycznym. Rozszczelnienie systemu magazynowego lub transportowego prowadzi do samoodparowania części cieczy i jej dyspersji w środowisku w postaci pary. Powoduje to duże potencjalne zagrożenie skażeniem toksycznym, które może spowodować poważne straty ludzkie i środowiskowe. Dlatego też przemysł i władze rozwinęły różne standardy i przepisy w zakresie wszystkich procesów związanych z produkcją, magazynowaniem i przesyłaniem tych substancji. Szczególną rolę – w przypadku chloru – odgrywają *EURO CHLOR* w Belgii oraz *Chlorine Institute* w Stanach Zjednoczonych.

Koncepcja analizy ryzyka [1] pozwala na identyfikację i ocenę zagrożeń, które mogą powstawać w trakcie projektowania, budowy, uruchamiania i eksploatacji instalacji wysokiego ryzyka, do których można zaliczyć stokaż skroplonych gazów toksycznych (termin *stokaż* oznacza operacje magazynowania i dystrybucji substancji chemicznych). Daje to możliwość stosowania odpowiednich środków bezpieczeństwa, a tym samym kontroli ryzyka.

Istnieje wiele sformalizowanych technik identyfikacji zagrożeń. W niniejszej pracy wykorzystano technikę HAZOP [2] i zastosowano ją do typowej instalacji stokażowej chloru, zbudowanej w latach 70. Sformułowano listę potencjalnych zdarzeń wypadkowych, które następnie poddano oszacowa-

niu ryzyka stosując matrycę ryzyka, co pozwoliło na wytypowanie określonych wydarzeń awaryjnych do dalszej ilościowej analizy ryzyka [3]. Zaproponowano również dodatkowe zalecenia niezbędne dla zmniejszenia ryzyka.

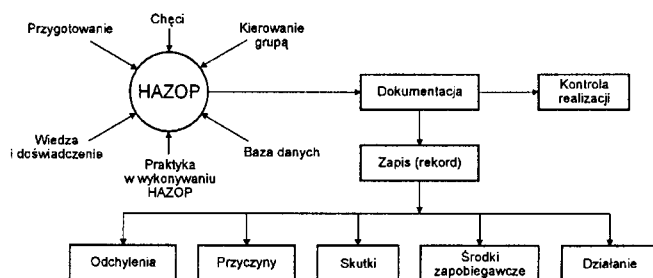
### Opis metody HAZOP

Analiza HAZOP wykorzystuje zestaw słów zwanych odchyleniami, które tworzone są za pomocą parametrów procesu lub intencji oraz słów przewodnich, sugerujących rodzaj odchylenia od założonych parametrów lub intencji: odchylenie = parametr + słowo przewodnie (np. brak przepływu = przepływ + brak).

Analizę przeprowadza zespół kierowany przez lidera, wykorzystując utworzony zestaw odchylenia parametru. Instalacja dzielona jest na małe odcinki zwane węzłami, stanowiące funkcjonalną całość i zespół określa czy dane odchylenie może realnie wystąpić, a następnie identyfikuje przyczyny jego powstawania i ocenia skutki. Jeśli skutki przedstawiają zagrożenia lub stanowią problemy operacyjne, to zespół ocenia czy istniejące systemy bezpieczeństwa, sprzęt czy procedury są odpowiednie względem ewentualnych skutków. Czasem zespół proponuje propozycje ulepszeń lub zaleca przeprowadzenie dodatkowych badań. Procedurę wykonywania badań HAZOP przedstawia rysunek 1.

Dla oszacowania ryzyka występowania zdarzeń wypadkowych dokonano ich klasyfikacji, którą odniesiono do częstotliwości występowania zagrożeń (P) oraz potencjalnych skutków (C), które z tego tytułu mogą powstawać (tab.1) [4].

Wykorzystując otrzymane wartości częstotliwości i skutków dla każdego zdarzenia oraz scenariusza wypadkowego, poddano je następnie oszacowaniu ryzyka w oparciu o adaptowaną dla potrzeb tego projektu matrycę ryzyka [4] (rys.2).

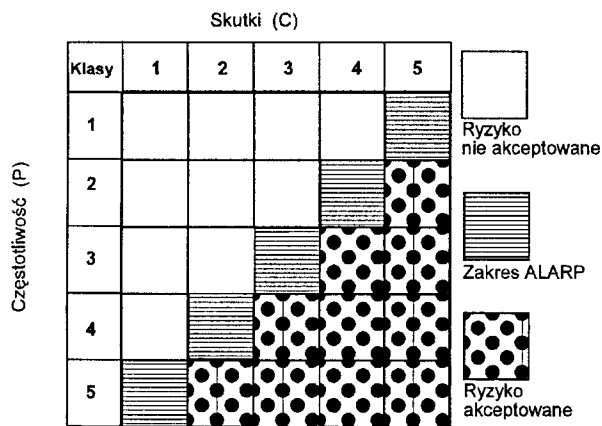


Rys. 1. Struktura analizy HAZOP

Matryca ryzyka wskazuje wydarzenia wypadkowe (scenariusze), które mogą być akceptowane oraz wydarzenia, dla

Tabela 1. Klasyfikacja częstotliwości oraz skutków zagrożeń

Klasa	Częstotliwość	Skutki (C)
1	Więcej niż raz w roku	Katastroficzne, ofiary ludzkie i straty >50 tys. zł
2	Raz na 1+10 lat	Duże, liczne urazy i straty 10+ 50 tys. zł
3	Raz na 10+100 lat	Średnie, urazy i straty 5+10 tys. zł
4	Raz na 100+1000 lat	Małe, drobne urazy i straty <5 tys. zł
5	Raz na ponad 1000 lat	Pomijalnie małe



których konieczne jest wprowadzenie odpowiednich środków kontroli ryzyka. Zakres ALARP (*as low as reasonable practicable*) wskazuje, że poziom ryzyka powinien być przyjęty wg zasady „tak niski jak jest to praktycznie uzasadnione” [1].

W celu wytypowania zdarzeń charakteryzujących się szczególnie wysokim poziomem ryzyka i skutków, a następnie dalszej analizy ilościowej ryzyka, wprowadzono dwa kryteria priorytetyzacji:

– kryterium priorytetyzacji ryzyka:

$$KPR = \sum_{i=1}^m [((R_m+1) - R_i)n_i] \quad (1)$$

– kryterium priorytetyzacji skutków:

$$KPC = \sum_{i=1}^m [((C_m+1) - C_i)n_i] \quad (2)$$

gdzie:

$i$  – zakres klas ryzyka lub skutków w danym zdarzeniu wypadkowym, obejmującym kilka scenariuszy,

$m$  – najniższa wartość klasy ryzyka lub skutków,

$R_i, C_i$  – wartość klasy ryzyka lub skutków dla  $i$ -tej klasy ryzyka lub skutków ( $R_i$  lub  $S_i=i$ ),

$R_m, C_m$  – wartość klasy ryzyka lub skutków odpowiadająca wartości  $m$ , ( $R_m$  lub  $S_m=m$ ),

$n$  – liczba scenariuszy odpowiadającej  $i$ -tej klasie ryzyka lub skutków w danym zdarzeniu wypadkowym.

## Dane wyjściowe

Wiedza o dotychczas zaistniałych wypadkach stanowi punkt wyjściowy analizy, wskazując na główne przyczyny powstawania zagrożeń oraz ich skutki. Wskazówki te są następnie wykorzystywane do wprowadzenia odpowiednich systemów i środków bezpieczeństwa. Na podstawie analizy wypadków z chlorem zebranych w bazie danych EURO-CHLOR [5] oraz TNO-FACTS [6] można sformułować następujące wnioski:

♦ Ogólnie można wyróżnić następujące grupy wydarzeń powodujące uwolnienia chloru:

– uszkodzenie połączenia cysterna–rurociąg poprzez przesunięcie się cysterny podczas operacji rozładowywania,

– uszkodzenie połączeń cysterna–rurociąg transportowy wskutek ruchu pionowego cysterny na zawieszaniu (szczególnie w przypadku autocystern),

– uszkodzenie cysterny, zbiornika magazynowego (beczki) lub połączenia przez zderzenie z innym poruszającym się obiektem (np. inną cysterną),

– błędy w procedurach operacyjnych,

– awarie sprzętu i wyposażenia (korozja, zużycie, wady materiałowe),

– uszkodzenia spowodowane pożarem.

♦ Zasadniczą przyczyną wypadków z chlorem są tzw. błędy ludzkie, które odpowiadają za około 70% wypadków. Nie są one raczej związane z cechami psychofizycznymi pracowników, lecz z niewłaściwą metodą operacyjną, a więc systemem zarządzania. Awaryjne zdarzenia odpowiadają za 30% wypadków. Główne przyczyny to awarie zaworów, pęknięcia rurociągów, niewłaściwe uszczelnienie oraz korozja. Pewne znaczenie odgrywają również czynniki zewnętrzne związane z zagrożeniami naturalnymi lub przyczyny nieznanne.

♦ Odnotowano znaczną liczbę wypadków z chlorem wskutek oddziaływania pożarów, jak również na skutek wybuchów zbiorników i pojemników z chlorem.

♦ Zwracają uwagę występujące przypadki przepełnienia zbiorników i pojemników z chlorem, co daje katastrofalne konsekwencje.

♦ Specyficzne właściwości chloru spowodowały powstanie wielu wypadków na skutek następujących przyczyn:

– spalanie tytanu w suchym chlorze, np. aparatura akp, zawory, siatki, wirniki itp.,

– spalanie żelaza w chlorze w wysokiej temperaturze,

– silnie utleniające działanie chloru tworzy warunki do powstawania wybuchów (np.  $NCl_3$ ).

♦ Układy niszczenia nadmiaru chloru gazowego (z wentylacji), szczególnie wrażliwe na fluktuacyjność parametrów operacyjnych, powinny zawierać specjalne systemy bezpieczeństwa:

– awaryjny system zasilania,

– podwójny zestaw pomp zasilających,

– alarm niskiej cyrkulacji ługu.

♦ Dane statystyczne dotyczące wypadków w instalacjach chlorowych wskazują, że bezpieczeństwo tych instalacji jest wyższe niż w standardowych instalacjach przemysłu chemicznego. Analiza zarejestrowanych wypadków doprowadziła do powstania odpowiednich wytycznych postępowania [7,8].

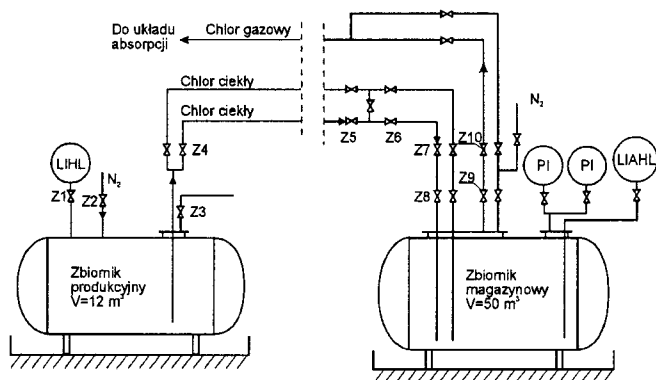
## Ogólna charakterystyka systemu produkcyjnego

Analizowany system produkcyjny stanowił zespół magazynowy kilku zbiorników o pojemności od 50 do 63 m<sup>3</sup>, typowy zespół do rozładunku/załadunku cystern i beczek, system rurociągów przesyłowych i rozbrojeniowych, zestaw do odparowania chloru ciekłego oraz układ absorpcyjny do niszczenia chloru. Do przetwarzania chloru stosowano poduszki chlorowe lub azotowe, a chlor transportowany był dwo-

ma rurociągami o długościach 230 m i 330 m. System wyposażony był w typową armaturę i aparaturę kontrolno-pomiarową, przy czym nie było centralnej sterowni służącej do jednoczesnej kontroli operacyjnej jak i odpowiedniego zdalnego sterowania instalacją. System bezpieczeństwa zapewniało umieszczenie zbiorników w boksach (w tym jeden ze zbiorników był zawsze pusty), płaszczowe rurociągi przesyłowe, system kurtyn wodnych oraz awaryjny układ do niszczenia chloru, natomiast brak było alarmów wysokociśnieniowych, układów upustu nadciśnienia oraz zdalnie sterowanych zaworów odcinających sprężonych z automatyczną detekcją chloru, jak zalecają poradniki [7,8]. System produkcyjny zlokalizowany został w środku zakładu (minimalna odległość od dużych skupisk ludności wynosi 1,2+1,3 km).

### Analiza HAZOP

Po zebraniu wszelkiej niezbędnej dokumentacji oraz kilkukrotnym wizytowaniu instalacji, wytypowano zespół analizujący, w skład którego weszli: analityk bezpieczeństwa (lider zespołu), technolog wydziału, specjalista ds. bhp oraz mechanik i pomiarowiec. Zespół ten dokonał podziału instalacji na węzły, które stanowiły podstawę wykonania analizy. Ogółem wytypowano 10 węzłów, dla których wykonano odrębne analizy. Schemat procesowy jednego z węzłów, pokazujący rurociąg transportowy łączący dwa zbiorniki, przedstawia rysunek 3, natomiast zapis analizy HAZOP zawiera tabela 2. Podano również sposób obliczenia kryteriów KPC i KPR.



Rys. 3. Schemat przetłaczania ciekłego chloru ze zbiornika produkcyjnego do zbiornika magazynowego (Z – zawory przełotowe, LIHL – wskaźnik wysokiego i niskiego poziomu, LIAHL – wskaźnik z alarmem wysokiego i niskiego poziomu, PI – wskaźnik ciśnienia)

Przeprowadzona analiza wskazała na możliwość występowania wielu zagrożeń, do których w pierwszym rzędzie zaliczono:

- pęknięcie lub przeciek rurociągu transportowego chloru powodujące awarie gazowe,
- przepływy odwrotne,
- przepełnienia i przelania na inne instalacje,
- opóźnienia operacyjne,
- trudności w kierowaniu instalacją w sytuacji awaryjnej.

Niektóre z nich, np. przepływy odwrotne lub przepełnienia i przelania nie były przewidywane, co może prowadzić do

Tabela 2. Arkusz HAZOP (Rurociąg transportowy (1) ze zbiornika produkcyjnego do zbiornika magazynowego)

Arkusz HAZOP					Projekt: System: Strona: 1      Data:			
Nr	Odchylenie	Przyczyna	Skutki	Środki bezpieczeństwa	Wymagane działania	Ryzyko		
1	Brak przepływu	Zamknięte lub zablokowane zawory Z4, Z5-Z8	Zwłoka operacyjna	Postępowanie zgodnie z instrukcją ruchową	Nie wymaga	P	C	R
		Zamknięte lub zablokowane zawory Z9, Z10	Zwłoka operacyjna	Postępowanie zgodnie z instrukcją ruchową	Nie wymaga			
		Brak różnicy ciśnień (min 2 bar)	Zwłoka operacyjna	Postępowanie zgodnie z instrukcją ruchową	Nie wymaga			
		Brak chloru w zbiorniku produkcyjnym	Zwłoka operacyjna	Wskaźnik LIHL	Okresowy przegląd			
		Pęknięcie lub zniszczenie rurociągu	Awarja gazowa	Zamknięcie zaworów Z4 i Z8	Wymiana zaworów na zdalnie sterowane lub uruchamiane za pomocą detektorów gazu Szkolenie załogi	3	2	6
2	Mniejszy przepływ	Przeciek (mały otwór w rurociągu lub nieszczelność na uszczelnieniach zaworów lub kołnierzy)	Awarja gazowa	Wskaźnik ciśnienia w płaszczu rurociągu	Zawory odcinające zdalnie sterowane Szkolenie załogi	2	3	6
3	Przepływ odwrotny	Pęknięcie rurociągu	Awarja gazowa	Brak	Zawór zwrotny na rurze importowej zbiornika magazynowego Szkolenie załogi	3	3	7
		Odwrotna różnica ciśnień	Przelanie zbiornika produkcyjnego	Wskaźnik LIAHL	jak wyżej	3	3	7
4	Wysokie ciśnienie	Wzrost temperatury zewnętrznej (np. pożar zewnętrzny)	Pęknięcie rurociągu i awaria gazowa	Przeciwdziałanie ratownicze	Upust ciśnienia na rurociągu (płytką bezpieczeństwa)	3	4	8

$$KPR = (10+1-6)2+(10+1-7)2+(10+1-8)1=10+8+3=21$$

$$KPC = (5+1-2)1+(5+1-3)3+(5+1-4)1 = 15$$

powstawania poważnych zagrożeń i strat. Zaproponowano liczne zalecenia, które głównie dotyczyły modyfikacji istniejących układów kontrolno-pomiarowych, wprowadzenia dodatkowych awaryjnych systemów bezpieczeństwa, np. upusty ciśnienia, zawory zwrotne na rurach importowych w zbiornikach magazynowych itp. oraz wnioski w zakresie zarządzania instalacją. Wszystkie zdarzenia wypadkowe oceniono pod względem kryteriów priorytetyzacji. Wyniki analizy przedstawia tabela 3.

Tabela 3. Zestawienie zdarzeń wypadkowych względem kryteriów priorytetyzacji

Nazwa zdarzenia	KPC	KPR	Wnioski
Rurociąg transportowy (1) Cl <sub>2</sub>	15	17	Analiza QRA
Magazynowanie Cl <sub>2</sub>	10	12	Zalecenia
Przetłaczanie ze zbiornika do zbiornika	13	17	Analiza QRA
Rozładunek/załadunek cystern	20	27	Analiza QRA
Odparowanie Cl <sub>2</sub> w parownicy	8	11	Nie wymaga
Rurociąg transportowy (2)	14	17	Analiza QRA
Układ absorpcyjny	12	16	Zalecenia
Żaładunek beczek	8	11	Nie wymaga
Przepełnienie cysterny	20	8	Analiza QRA
Operacje organizacji ruchu cystern	4	5	Nie wymaga

Analiza danych wykazuje, że zdarzenia związane z awariami rurociągów oraz operacje przy załadunku/rozładunku cystern charakteryzują się największymi wartościami kryteriów KPC i KPR i powinny zostać poddane innym badaniom zagrożenia, jak również skierowane do ilościowej analizy ryzyka (QRA) w celu oceny ewentualnego oddziaływania na otoczenie. Podobne decyzje podjęto względem zdarzenia dotyczącego przepełnienia cysterny, choć ma ono stosunkowo niski wskaźnik KPR, natomiast charakteryzuje się dużą wartością kryterium KPC. Oznacza to, że mogą wystąpić poważne potencjalne skutki w przypadku zajścia tego zdarzenia. Konieczna więc jest dokładniejsza analiza do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia tego zagrożenia. Potwierdzają to również wnioski wynikające z danych wyjściowych.

Zdarzenia, dla których trzeba sformułować zalecenia zmniejszenia ryzyka, należą do zakresu ALARP i stosowanie dodatkowych środków bezpieczeństwa musi być uzasadnione tzw. analizą kosztów i zysków, z której powinno jasno wynikać, jakie będą korzyści z zastosowania tych środków.

## Wnioski

♦ Analiza HAZOP stanowi efektywną metodę do identyfikacji różnych zagrożeń i problemów operacyjnych. Szczególnie korzystne wyniki można uzyskać, jeśli jest ona stosowana na szczeblu projektowania.

♦ Wykonana analiza pozwoliła na identyfikację niektórych zagrożeń, np. przepływów odwrotnych i przelań, które nie były wcześniej przewidywane.

♦ Dla instalacji stokażowej chloru szczególne znaczenie mają operacje jego transportu rurociągami oraz rozładunku/załadunku cystern, które powinny być poddane dalszej ilościowej analizie ryzyka.

♦ Zastosowanie matrycy ryzyka daje możliwość wyboru zdarzeń wypadkowych dla dalszych ilościowych analiz ryzyka, co powoduje zmniejszenie kosztów wykonania takiej analizy.

♦ Wykonanie analizy HAZOP pozwala na dalsze badanie przyczyn powstawania zagrożeń, a w szczególności daje wskazówki do analizy drzewa błędu.

## LITERATURA

1. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis. Center for Chemical Process Safety, AIChE, New York 1989.
2. T. KLETZ: Hazop and Hazan. IChem E, Rugby, UK 1992.
3. A.S. MARKOWSKI: Analiza ryzyka w procesie magazynowania i przesyłania skroplonych gazów toksycznych. Ochrona Środowiska, 1996 (w przygotowaniu).
4. Guidelines for hazard evaluation procedures. Center for Chemical Process Safety, AIChE, New York 1992.
5. Accidents on the users premises and guidelines for the safe handling and use of chlorine. GEST No. 199, 1993, EURO CHLOR Publications.
6. FACTS – databank for accidents with hazardous materials. TNO Institute of Environmental Sciences, Energy Research and Process Innovation, Apeldoorn, Holland.
7. Guidelines for the safe storage and use of liquid chlorine. GEST No. 169, 1992, EURO CHLOR Publications.
8. Safety advice for bulk chlorine installation. HMSO, London 1986.

## HAZOP Study for the Storage and Transport of Liquefied Gases

*The Hazard and Operability Study (HAZOP) was carried out for a standard unit providing pressure storage and distribution of liquefied chlorine. Accidental events were identified. Analysis of the risk matrix showed that piping and off/on loading were the most hazardous operations which should be included in*

*further quantitative risk analysis. Similar conclusions on chlorine-induced accidents were drawn following analysis of a relevant data base. The HAZOP study disclosed some undiscovered hazards. Making use of the results obtained, a number of new safety measures were recommended.*