

dr **Tomasz WĘSIERSKI**¹

st. kpt. mgr inż. **Małgorzata MAJDER-ŁOPATKA**²

Szkoła Główna Służby Pożarniczej

WYKOLEJENIE SIĘ WAGONÓW KOLEJOWYCH Z CHLOREM W BIAŁYMSTOKU. ANALIZA ZDARZENIA I MOŻLIWYCH SCENARIUSZY

Derailment of the tanks with chlorine in Białystok. The analysis of event and possible scenarios.

Streszczenie

Chlor ze względu na skalę jego wykorzystania przemysłowego, agresywność chemiczną oraz toksyczność stanowi substancję mogącą potencjalnie spowodować awarie przemysłową o znacznych rozmiarach. 9 marca 1989 r o godz. 2:22 ze stacji Białystok Fabryczny wyruszył pociąg tranzytowy nadany z ZSRR do zakładów "Buna Werke" (NRD). W jego skład wchodziły 32 wagony z których 6 stanowiły cysterny o pojemności 46 m³ zawierających skroplony chlor.

O godz. 2:25 na wysokości ul. Poleskiej nastąpiło wykolejenie się składu pociągu w odległości 100 m. za wiaduktem przy ul. Sienkiewicza. W wyniku zdarzenia 3 cysterny z chlorem przewracają się a jedna wypada z szyn, natomiast 2 puste wagony osuwają się w kierunku ul. Poleskiej. W artykule zawarto analizę zagrożeń związanych z uwolnieniem się chloru. Założono scenariusz natychmiastowego uwolnienia się całości medium na skutek urazu mechanicznego podczas wykolejenia się oraz uwolnienie ciągłe o przykładowej intensywności w warunkach częściowej utraty szczelności zaworów wyładowczych. Określone strefy zagrożenia odniesiono do decyzji podejmowanych przez Sztab Akcji.

Summary

Chlorine due to the scale of its industrial use, chemical aggressiveness and toxicity might potentially lead to industrial accidents of considerable size. At 2:22, 9-th March 1989 from Białystok Fabryczny station departed transit train from the Soviet Union designed for the Buna Werke " factory (GDR). It consisted of 32 wagons of which 6 were tanks with a capacity of 46 m³ containing liquefied chlorine.

As a result of derailment at height of Poleska Street at 2:25, three chlorine tanks roll over, one falls out of the rails, while the two empty wagons subside toward the street. The article is the case study analysis of the risks associated with the release of the chlorine. Scenario assumes the immediate release of the whole medium as a result of mechanical damage during the derailment and release of chlorine with constant intensity with

¹ Wkład merytoryczny w powstanie artykułu – 50%

² Wkład merytoryczny w powstanie artykułu – 50%

assumption of partial loss tightness of the discharge valve. Determined danger zones were related to decisions made by the Staff Action.

Słowa kluczowe: chlor, wypadki z udziałem chloru, wykojenie się cysterny z chlorem;

Keywords: chlorine, chlorine events, chlorine tank derailment;

Chlor ze względu na wielkość swego wykorzystania przemysłowego stanowi substancję, z którą stosunkowo często dochodzi do zdarzeń o charakterze zagrożeń chemicznych. Na przestrzeni 10 lat (2000-2009) na terenie Polski doszło do 53 zdarzeń z jego udziałem co wskazuje, iż przeciętnie dochodzi do 5 przypadków rocznie (tabela 1).

Tabela 1.

**Statystyka zdarzeń z udziałem chloru na terenie Polski w latach 2000-2009 r.
(na podstawie analizy danych z EWID)**

Table 1.

Chlorine accidents statistics in Poland (period: 2000-2009)

Rok	Ilość zdarzeń
2000	2
2001	10
2002	8
2003	6
2004	4
2005	5
2006	2
2007	4
2008	5
2009	7

Agresywność chemiczna chloru powoduje, iż zanotowano wiele przypadków śmiertelnych w wyniku niekontrolowanego uwolnienia się tej substancji. W styczniu 2005 roku w Południowej Karolinie (USA) na skutek kolizji dwóch pociągów towarowych uwolniło się natychmiastowo 11500 galonów (43500 dm^3) chloru powodując śmierć 9 osób [1]. Niecały rok wcześniej (czerwiec 2004) przy zaistnieniu podobnych okoliczności zdarzenia w Teksasie (USA) uwolniło się 90000 funtów (41000 kg) chloru powodując dwa wypadki śmiertelne wśród mieszkańców budynków mieszkalnych znajdujących się niedaleko miejsca zdarzenia [1]. Natomiast w czasie uwolnienia Cl_2 podczas katastrofy kolejowej na Florydzie (luty 1978) śmierć poniosło 8 osób [1]. W 2005 r. podczas wycieku skroplonego

chloru z cysterny samochodowej (autostrada Pekin-Szanghaj niedaleko miasta Hui'an) o pojemności 30 t. zginęło 27 osób, a 285 doznało zatrucia. Przeprowadzono również ewakuację 10 tysięcy osób zamieszkujących głównie tereny wiejskie, gdyż nie udało się zatrzymać wycieku gazu.

Bardzo tragiczne w skutkach uwolnienie miało miejsce również w San Luis Potosí (Meksyk, sierpień 1981), w wyniku którego śmierć poniosło 14 osób. Jednakże do najbardziej katastroficznych w skutkach zdarzenia doszło na terenie Rumunii w roku 1939 [1]. W następstwie rozsadzenia zbiornika, śmierć na skutek zatrucia poniosło sumarycznie 68 osób.

W Polsce także dochodziło do poważnych zdarzeń z udziałem chloru. W 1968 roku w pobliżu Jackowic doszło do katastrofy kolejowej w wyniku której nastąpiło wybitcie w dennicy jednej z cystern otworu wielkości zderzaka kolejowego. W wyniku zdarzenia śmiertelnemu zatruciu uległo kilka osób [2].

Jednakże do potencjalnie najbardziej niebezpiecznego zdarzenia na terenie Polski doszło 9 marca 1989 r., gdy o godz. 2:22 ze stacji Białystok Fabryczny ruszył pociąg tranzytowy nadany z ZSRR do zakładów "Buna Werke" (NRD). Składał się z 32 wagonów, z których: 6 cystern o pojemności 46.000 l zawierało skroplony chlor, 3 cysterny - parafinę techniczną, pozostałe wagony były puste z przeznaczeniem do osłony cystern. O godz. 2:25 na wysokości ul. Poleskiej nastąpiło wykolejenie się pociągu w odległości 100 m. za wiaduktem przy ul. Sienkiewicza. W wyniku zdarzenia 3 cysterny zawierające skroplony chlor przewróciły się natomiast jedna uległa wykolejeniu z toku szyn. Całkowicie został zniszczony nasyp kolejowy na odcinku ok. 120 metrów. Zważywszy na miejsce zdarzenia, odbiło się ono szerokim echem w ówczesnej Polsce. Efektem tego była interpelacja poselska połączona z interwencją wojewody białostockiego, celem uzyskania całkowitego zakazu transportu chloru przez miasto. Zakaz ten uzyskano wyrokiem sądu z dnia 27 grudnia 1989 roku [3].

Przebieg zdarzenia

Przebieg zdarzenia mającego miejsce w Białymstoku przedstawiono w formie tabelarycznej w tabeli 2 oraz 3 [4];

Tabela 2.

Przebieg podjętych działań w pierwszym dniu zdarzenia (9 marca 1989)

Table 2.

The course of actions taken on the first day of the event (March 9, 1989)

Godzina	Opis podjętych działań. Dzień pierwszy - 9 marca 1989
2:30	Przekazanie do Dyżurnego Ruchu PKP przez maszynistę pociągu informacji o zdarzeniu. W dalszej kolejności zostają zawiadomione podstawowe służby PKP m.in.: Kierownik Rejonu, Dyrektor, Służba Wagonowa i Trakcji, Kolejowe Pogotowie Techniczne (miejscowe i w Warszawie);
2:50	Powiadomiono Zakładową Straż Pożarną PKP Białystok (strażnica przy ul. Sosnowej), która wyjechała do zdarzenia 2 samochodami: GBA-2,5/16 i SRT na samochodzie Żuk
3:05-3:10	Rejonowe i Wojewódzkie Stanowiska Kierowania drogą radiową otrzymują informacje o wyniku rozpoznania wykonanego przez ZZSP PKP tj. o leżących cysternach i wagonach, zniszczonym torze i nasypie oraz sprawdzeniu listów przewozowych z których wynikało że w cysternach przewożony jest chlor o czystości 99,9 %. Stwierdzono niewielkie wycieki chloru z zaworów bezpieczeństwa.
3:10	Rejonowe i Wojewódzkie Stanowiska Kierowania zgodnie z obowiązującymi zasadami powiadamiają dowództwo Komendy Rejonowej oraz Komendy Wojewódzkiej. Dysponowanie do zdarzenia oficerów dyspozycyjnych.
3:10	Przejęcie koordynacji działań przez Wojewódzkie Stanowisko Kierowania Straży Pożarnej, które informuje Główne Stanowisko Kierowania Straży Pożarnej w Warszawie oraz m.in.: pełnomocnika wojewody ds. nadzwyczajnego zagrożenia środowiska, dyżurnego WUSW. Zgodnie z kompetencjami, Główne Stanowisko Kierowania Straży Pożarnej informuje Centralną Stację Ratownictwa Chemicznego w Płocku.
do 3:45	Na miejsce zdarzenia przybywają zadysponowani oficerowie dyspozycyjni Komendy Rejonowej i Wojewódzkiej Straży Pożarnej oraz Komendant ZZSP PKP. Przejmuje on dowództwo nad całością działań i wraz z przybyłymi funkcjonariuszami oraz kierownictwem pionu technicznego PKP tworzy sztab

	akcji.
	<p>Po analizie i ocenie sytuacji sztab akcji wydał następujące decyzje:</p> <p>a. 2 sekcje ZZSP PKP będące na miejscu katastrofy – przygotowane do prowadzenia doraźnych działań w ubraniach gąsoszczelnych mają zabezpieczyć odholowanie lokomotywy oraz nieuszkodzonych wagonów,</p> <p>b. maszynista ma odjechać lokomotywą – po uzgodnieniu z milicjantami zostaje zwolniony ze wstępnych przesłuchań</p> <p>c. przygotowanie do ewakuacji Jednostki Wojskowej z tzw. Węglówki – informację o decyzji Dowódcy Akcji do JW przekazało Rejonowe Stanowisko Kierowania. Oficer dyżurny JW przybył na miejsce katastrofy i zameldował, że decyzja o ewakuacji jednostki musi zapaść w Warszawie,</p> <p>d. zamknięcie ruchu drogowego na ul. Poleskiej oraz zabezpieczenie terenu katastrofy w promieniu min. 200 m. przed osobami postronnymi – zadanie przeznaczone do realizacji przez funkcjonariuszy MO,</p> <p>e. postawienie w stan gotowości bojowej sił i środków Straży Pożarnej województwa m.in. samochodów ratownictwa technicznego i Pgaz-dym, 7 sekcji gaśniczych ciężkich, które otrzymały polecenie sprawdzenia ubrań gąsoszczelnych i aparatów ochrony dróg oddechowych, przeciwiczenia kierowania samochodami w maskach i aparatach powietrznych oraz podawania rozproszonych prądów wody z dachu samochodu w czasie ruchu,</p> <p>e. rozpoznać zakłady, w których stosowany jest chlor oraz możliwość pozyskania masek i pochłaniaczy,</p> <p>f. wyznaczone siły i środki do godz. 10,00 skoncentrować na terenie Zawodowej Straży Pożarnej w Białymstoku.</p>
8:25	Samochodem osobowym przybywa grupa 4 ratowników z Centralnej Stacji Ratownictwa Chemicznego w Płocku. Grupa dysponowała wyposażeniem w postaci aparatów oddechowych, odzieży ochronnej i dwóch systemów do uszczelniania niewielkich uszkodzeń cystern
9:00	<p>Sztab akcji udaje się na naradę do Prezydenta Białegostoku w której uczestniczą również Szefowie RUSW i Miejskiego Inspektoratu OC. Podczas narady Strażacy zapoznają jej uczestników z:</p> <p>a. charakterystyką fizyko-chemiczną i właściwościami niebezpiecznymi chloru</p>

	<p>b. rodzajem niezbędnych środków ochrony pracujących przy usuwaniu skutków katastrofy (aparaty oddechowe, ubrania gazoszczelne oraz maski z pochłaniaczami na chlor dla pracowników pociągu ratowniczego PKP do ewakuacji w przypadku uszkodzenia cysterny podczas jej podnoszenia</p> <p>c. wypracowaną koncepcją użycia sił i środków straży pożarnej w przypadku uszkodzenia cysterny podczas podnoszenia i stawiania przewróconych cystern tj. izolowanie miejsca katastrofy rozproszonymi prądami w przypadku wycieku chloru, kierowanie i rozpraszanie chmury chloru poprzez nadmuchiwanie powietrza agregatami oddymiającymi, wspomaganie grupy Ratownictwa Chemicznego z Płocka podczas uszczelniania cystern</p> <p>d. wyłączenie z ruchu dzielnicy miasta, zamknięcie sklepów, żłobków, przedszkoli i szkół, ewakuacja mieszkańców z parteru i I kondygnacji na wyższe kondygnacje, opracowanie komunikatu o katastrofie i podaniu go do publicznej wiadomości ze wskazówkami postępowania w przypadku wycieku chloru, postawienie w stan ostrego dyżuru pogotowia ratunkowego i wszystkich ZOZ-ów na terenie miasta, wprowadzenie ostrych dyżurów wszystkich szpitali, Koncepcje zostały zaakceptowane.</p> <p>Rozważano również możliwość przepompowania chloru do pustych cystern, jednak skomplikowane aspekty techniczne, operacyjne i czasowe podstawienia pustych cystern uniemożliwił realizację tego zamiaru.</p>
9:55	<p>Przyjeżdża z Warszawy specjalny pociąg Ratownictwa Technicznego z dźwigiem 125 t. (od. godz. 4,00 w gotowości był pociąg ratowniczy z węzła PKP Białystok, ze względu na mniejsze parametry dźwigu pozostał w odwodzie)</p>
	<p>W trakcie spotkania sztabu akcji z Prezydentem Miasta do pracy przygotowywała się ekipa pociągu ratowniczego z Warszawy współdziałająca z pracownikami PKP Białystok, naprawiając uszkodzony odcinek toru umożliwiając dojazd dźwigu do pierwszej przewróconej cysterny;</p> <p>Natomiast jednostki taktyczne straży pożarnej będące w rejonie koncentracji sprawdzały sprzęt, kierowcy samochodów bojowych ćwiczyli jazdę samochodami w aparatach powietrznych, ćwiczone podawanie prądów wody z samochodów w ruchu.</p>
10:00	<p>Teren katastrofy podzielony został na III Odcinki Bojowe z odwodem.</p>

	Zaangażowane sumarycznie siły i środki straży pożarnej z terenu województwa stanowiło: 13 samochodów w tym 8 gaśniczych ciężkich, 2 ratownictwa technicznego, 1 Pgaz-dym, 2 operacyjne specjalne, 2 agregaty oddymiające, 16 ubrań gazoszczelnych i 80 aparatów izolujących drogi oddechowe.
11:00	Radio na II, III i IV programie nadaje pierwszy komunikat o występującym zagrożeniu w związku z katastrofą
12:40	Osiągnięto pełną gotowość w zabezpieczeniu terenu akcji, Ustalono rodzaj znaków gestowych, po których: a. następowałyby stawianie osłony wodnej z samochodów straży pożarnej i izolowanie terenu katastrofy, b. ewakuacja – ucieczka obsługi pociągu ratowniczego (w trakcie operacji tylko 3 pracowników PKP), Bezpośrednio przed podniesieniem cysterny, wszyscy strażacy znajdujący się w bezpośrednim rejonie zagrożenia zakładali ubrania gazoszczelne i aparaty oddechowe, celem maksymalnego wykorzystania zapasu powietrza w butlach.
13:05	Rozpoczęcie stawiania pierwszej cysterny (w trakcie podnoszenia nastąpiło oderwanie się blachy stanowiącej górną osłonę cysterny)
14:28	Podniesienie pierwszej cysterny i ułożenie na platformie wagonu. W trakcie tej operacji popękały podkłady kolejowe którymi zabezpieczono.
14:30	Załoga pociągów ratowniczych PKP przystąpiła do odbudowy następnego odcinka toru do podjazdu dźwigu kolejowego. Cykl przygotowania i odbudowy zniszczonego toru, podnoszenia kolejnych cystern przy każdorazowej pełnej gotowości strażaków (zakładanie aparatów oddechowych i ubrań gazoszczelnych) powtarzany jest do momentu podniesienia ostatniej cysterny. W okresach przygotowania do kolejnych operacji podnoszenia cystern wkolejono dwie cysterny, które wypadły z torów, stosując specjalne zestawy hydrauliczne do wkolejania taboru kolejowego,
19:30	Rozpoczęto proces cięcia palnikiem acetylenowo-tlenowym wygiętych i zakleszczonych złącz cystern. Operację cięcia zabezpieczono 2 prądami wody celem zabezpieczenia cysterny przed nagrzewaniem a także pożarem zaoliwionych podkładów kolejowych od padających iskier.
20:00	Dostarczenie 20 pochłaniaczy na chlor do masek przez OC
21:05	Podniesiono drugą cysternę i o godz. 21:43 położono ją na wózki jezdne

	Płaszcz trzeciej cysterny jest uszkodzony i tu wystąpiły największe obawy o jej szczelność przy podnoszeniu – w trakcie operacji odrywa się blacha stanowiąca osłonę cysterny.
--	--

Tabela 3.

Przebieg podjętych działań w drugim dniu zdarzenia (10 marca 1989)

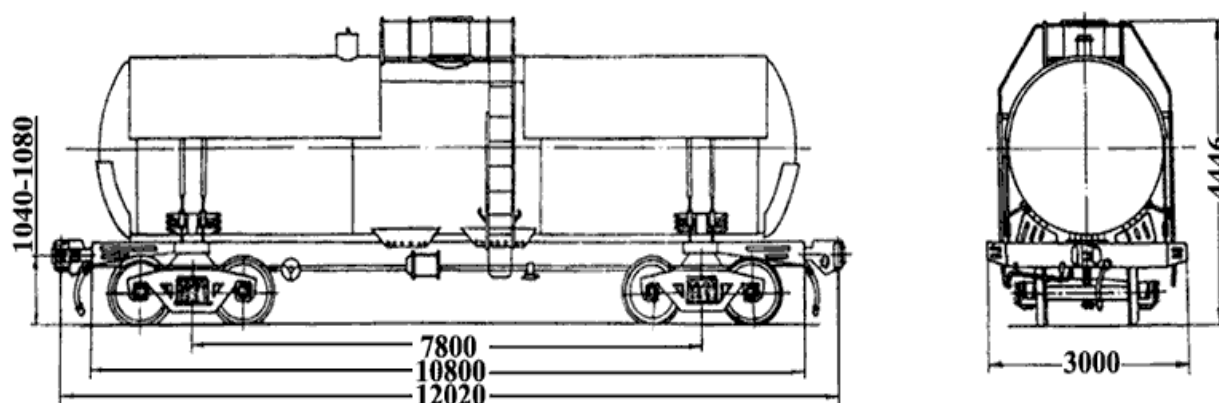
Table 3.

The course of actions taken on the second day of the event (March 10, 1989)

Godzina	Opis podjętych działań. Dzień drugi - 10 marca 1989
01:50	Zakończenie operacji wstawiania i podnoszenia cystern
03:00	Zakończenie zabezpieczenia terenu akcji przez jednostki straży pożarnej. Na miejscu pozostał samochód gaśniczy z ZZSP PKP do zabezpieczenia czynności stawiania 2 pustych wagonów.

Analiza zagrożeń związaną z uwolnieniem chloru**1. Sposób transportu medium**

Cysterny które uległy wypadkowi w Białymstoku stanowiły wagony produkcji radzieckiej model 15-1556 będące w produkcji seryjnej od 1975 roku (rys. 1). Ten typ wagonu posiada zbiornik o średnicy 2400 mm i maksymalnej długości 10616 mm. przy maksymalnej wysokości wagonu 4446 mm. liczonej od krawędzi główki szyny. Objętość całego zbiornika wagonu wynosi 46 m³. Ciśnienie robocze zbiornika wynosi 1,5 MPa przy maksymalnej dopuszczalnej temperaturze wynoszącej 50°C.



Ryc. 1 Model wagonu 15-1556 [5].

Fig. 1. Chlorine tank model 15-1556 [5]

Zakłada się, że względu na wysoką rozszerzalność temperaturową chloru, ładunek 1,25 kg Cl₂ na każdy 1 dm³ objętości cysterny. A zatem wagony mogły maksymalnie przewozić 57,5 tony skroplonego medium.

Biorąc pod uwagę, że cysterny zostały wyrócone bokiem jako wysokość emisji (przy rozważaniu wariantu uwolnienia ciągłego) założono połowę średnicy cysterny, a więc 1,2 metra w przypadku uszkodzenia zaworów wyładowczych.

2. Warunki meteorologiczne

Rozważone zostaną warunki, jakie panowały w pierwszym dniu prowadzenia akcji. Wynika to z faktu, iż przeważającą większość czynności ratowniczych prowadzono właśnie 9 marca. Dodatkowym aspektem jest również fakt, iż największe prawdopodobieństwo zajścia zdarzenia o skutkach katastroficznych występowało w fazie samego wykolejenia się wagonów, a więc o godzinie 2:25 w nocy.

W dniu 9 marca panowała temperatura w przedziale od 0°C do 4,4°C przy średniej temperaturze wynoszącej 1,6°C [6]. Wilgotność powietrza wynosiła 84%. Obserwowano opady deszczu oraz śniegu z deszczem. Maksymalna prędkość wiatru dochodziła do 10,7 km/h przy jego przeciętnej wartości 4,1 km/h, z wartością nieco niższą w porze nocnej. Wiatr był w porywach słaby, charakteryzujący się dużą zmiennością kierunku, z tendencją spadku prędkości. Ciśnienie było wysokie, osiągające 1021 hPa z tendencją wzrostową.

Biorąc pod uwagę powyższe parametry oraz nocną porę wykolejenia się pociągu do symulacji zostaną wzięte następujące założenia pogodowe: wilgotność względna H=84%, ciśnienie p = 1021 hPa, prędkość wiatru v=3,6 km/h (1 m/s), temperatura 1°C. Zważywszy na zmienny kierunek wiatru zakładać się będzie maksymalna wielkość strefy w każdym kierunku.

3. Tryb przeprowadzenia do analizy

Analiza podstawowa zostanie przeprowadzona z wykorzystaniem oprogramowania ALOHA 5.4.1.2. Mimo, iż jest to oprogramowanie bezpłatne, w zupełności wystarczy do przeprowadzenia analizy maksymalnego zasięgu stref oraz określenia profilu stężeniowego w obrębie czasowym nie dłuższym niż 1 godzina. Określenie skutków toksykologicznych zostanie wykonane między innymi z wykorzystaniem równania funkcji probitowej określonej dla śmiertelnych wypadków z udziałem chloru. Założone zostaną dwa scenariusze:

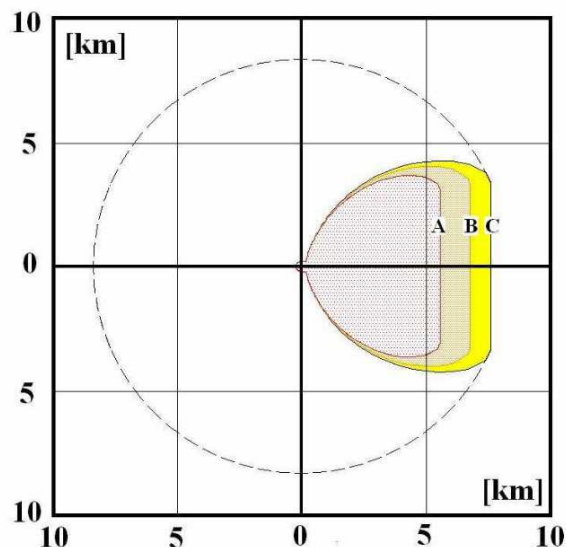
- natychmiastowe uwolnienie się medium z pojedynczego zbiornika powstałe na skutek uszkodzenia mechanicznego w momencie wykołajenia. Przypadki takie są znane i opisane we wcześniejszej części artykułu.
- uwolnienie ciągłe w warunkach zabudowy miejskiej o intensywności $Q=1$ kg/s. Schemat ten odpowiada nieszczelnościom jakie mogły powstać na skutek wykołajenia się wagonów związanych np. z częściowym rozszczelnieniem zaworów wyładowczych.

W toku analizy ocenie poddane zostaną niektóre decyzje podjęte w czasie prowadzenia działań np. decyzja nakazująca ewakuację mieszkańców z terenów potencjalnie zagrożonych na wyższe kondygnacje czy też decyzja o promieniu zabezpieczenia terenu akcji.

Natychmiastowe uwolnienie się medium

W przypadku uwolnienia natychmiastowego zważywszy na ilość uwolnionego medium (57,5 tony dla pojedynczej cysterny) rozważeniu ulegnie zasięg w jakim można byłoby spodziewać się skutków śmiertelnych uwolnienia się substancji. Rozważanie zasięgu strefy względem wartości NDS, NDSch, NDSP, ERPG-1, ERPG-2 nie jest brane pod uwagę ze względu na fakt, iż szacowanie skutków dla odległości większej niż 10 km obarczone jest dużym błędem niezależnie od ograniczeń związanych z oprogramowaniem ALOHA. Biorąc pod uwagę zasięg strefy względem wartości AEGL-3 (dla 10 min = 50 ppm; 30 min = 28 ppm; 60 min = 20 ppm [7]) ekspozycja teoretycznie mogąca powodować zagrożenie dla życia występowałyby odpowiednio w promieniu 5,6 km; 6,8 km; 7,6 km (rys. 2). Jednakże ryzyko w tak dużym promieniu dotyczyłoby osób znajdujących się na zewnątrz. Zważywszy na nocną porę wypadku, ilość osób znajdująca się poza budynkami byłaby na szczęście stosunkowo niewielka. Zdecydowanie lepiej sytuacja przedstawiałaby się dla osób znajdujących w budynkach. Obliczenia wskazują, iż przy dużych stężeniach chloru, wewnątrz budynków należałoby się spodziewać stężeń nawet dwa rzędy mniejszych niż na zewnątrz (tabela 4), przy czym jednak, jak przedstawiono przykładowo na rys. 3, czas utrzymywania się stężenia wewnątrz jest zdecydowanie dłuższy (profil czasowy krzywej B względem A). Utrzymywanie się chmury chloru na zewnątrz przy dużych odległościach trwałoby od kilku do maksymalnie 30 minut, natomiast wewnątrz czas ten mógłby wynosić nawet kilka godzin. Charakterystyka funkcji zewnętrznej ekspozycji (rys. 3, krzywe A) wyraźnie wskazuje, iż czas ekspozycji przy maksymalnych stężeniach wynosi zaledwie kilka minut. Zatem strefa

możliwości osiągnięcia efektów toksycznych zagrażających życiu najlepiej charakteryzowana byłaby przez AEGL-3 10 minutowy (50 ppm), co wskazuje, iż realne zagrożenie życia przy natychmiastowym uwolnieniu istniałoby w promieniu 5,6 km.



Ryc. 2. Zasięg strefy toksycznej przy natychmiastowym uwolnieniu się chloru określony dla wartości AEGL-3 A) 50 ppm (10 min.) B) 28 ppm (30 min.) C) 20 ppm (60 min.). Warunki atmosferyczne: $T = 1^{\circ}\text{C}$; $v = 1\text{m/s}$; $H = 84\%$; $p=1021\text{ hPa}$.

Fig. 2. Toxic zone range determined for AEGL-3 value for sudden chlorine release A) 50 ppm (10 min.) B) 28 ppm (30 min.) C) 20 ppm (60 min.). Atmospheric conditions: $T = 1^{\circ}\text{C}$; $v = 1\text{m/s}$; $H = 84\%$; $p=1021\text{ hPa}$.

Tabela 4.

Charakterystyka stężeniowa chloru na zewnątrz oraz wewnątrz obiektów w odległości X od miejsca natychmiastowego uwolnienia

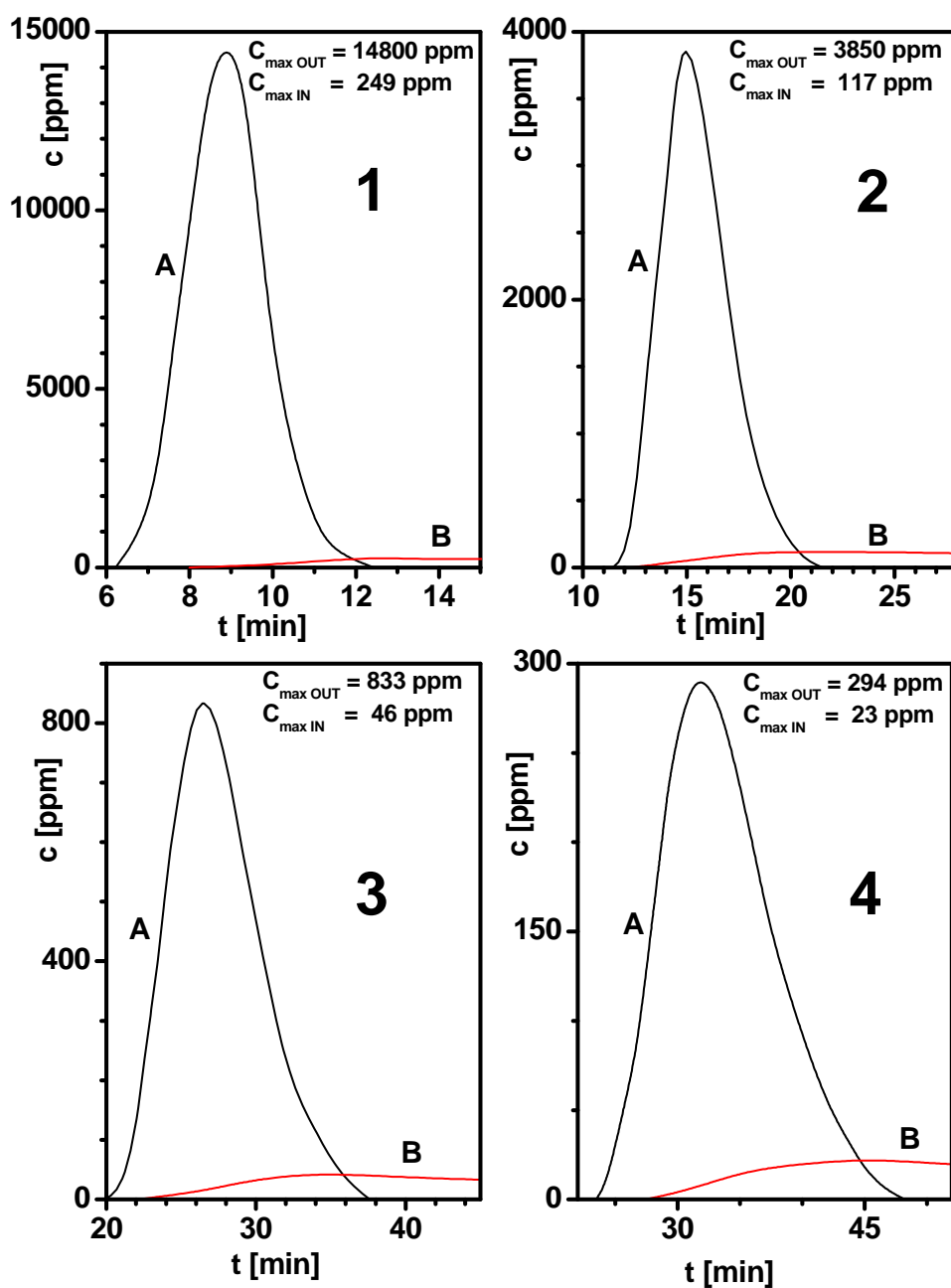
Table 4.

Chlorine concentration characteristics outside and inside of the buildings in distance X from the place of sudden release

Odległość od miejsca uwolnienia	Stężenie maksymalne panujące na zewnątrz budynków	Stężenie maksymalne panujące wewnątrz budynków	$C_{\text{OUT}}/C_{\text{IN}}$

STUDIUM PRZYPADKU – ANALIZA AKCJI NA PODSTAWIE ZDARZEŃ RZECZYWISTYCH

X [m]	C _{OUT} [ppm]	C _{IN} [ppm]	
100	135000	1020	132
200	103000	898	115
300	42700	454	94
400	23500	318	74
430	20000	293	68
500	14800	249	59
700	7510	175	43
1000	3850	117	33
1500	1630	79	21
2000	833	45	19
3000	294	23	13
4000	133	13	10
5000	71	7	10

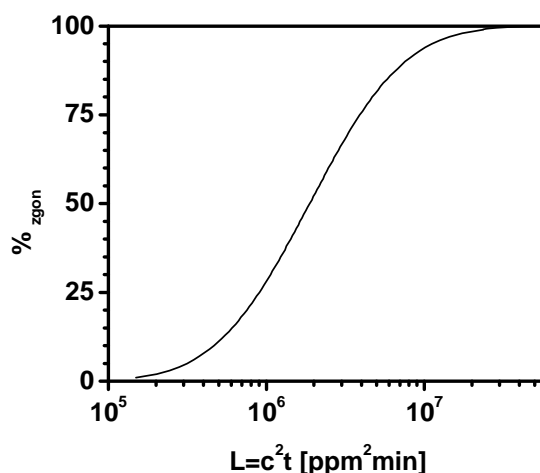


Ryc. 3. Stężenie chloru w funkcji czasu dla czterech wybranych odległości od miejsca natychmiastowego uwolnienia się medium: 1) $X = 0,5$ km 2) $X = 1$ km 3) $X = 2$ km 4) $X = 3$ km.; A – krzywa odpowiadająca stężeniu na zewnątrz; B – krzywa odpowiadająca stężeniu wewnątrz obiektów mieszkalnych. Warunki atmosferyczne: $T = 1^{\circ}\text{C}$; $v = 1\text{m/s}$; $H = 84\%$; $p = 1021$ hPa.

Fig. 3. Chlorine concentration as a function of time for 4 selected distances from place of sudden release 1) $X = 0,5$ km 2) $X = 1$ km 3) $X = 2$ km 4) $X = 3$ km.; A- curve corresponding to outside concentration B) curve corresponding to inside concentration. Atmospheric conditions: $T = 1^{\circ}\text{C}$; $v = 1\text{m/s}$; $H = 84\%$; $p = 1021$ hPa.

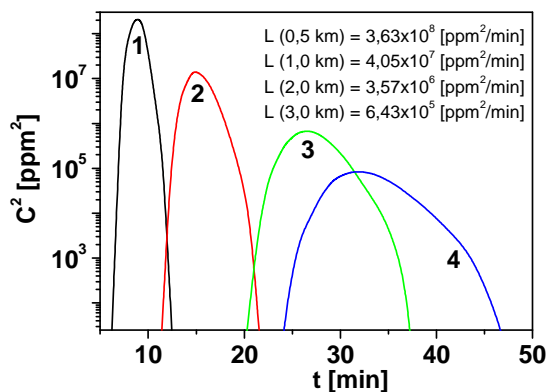
Dla ludzi mieszkających na parterze przekroczenie LC_{50} wynoszącej dla 1 godzinnego czasu ekspozycji 293 ppm [8] nastąpiłoby już poniżej 430 metra od miejsca uwolnienia, zakładając odporność człowieka co najmniej na poziomie szczura. Badania na myszach wykazały natomiast niższe LC_{50} przy 1 h ekspozycji [9]. Wartość odpowiadającą 173 ppm zostaje osiągnięta jeszcze na 700 metrze od miejsca uwolnienia. Czas ekspozycji wewnątrz, jak wspomniano wcześniej, byłby dostatecznie długi. W warunkach całkowitego zaskoczenia, dla osób nie ewakuowanych pozostających jedynie w zabudowaniach, ekspozycja zagrażająca życiu byłaby możliwa praktycznie do odległości 4,5 km (AEGL-3; 10 ppm przy 4h ekspozycji [7]).

Analizując funkcję probitową dla chloru w granicach czasu ekspozycji ($P_r = -8,29 + 0,92 \ln[C^2 dt]$) wyraźnie można zauważyć, iż przyjęcie dawki toksycznej $L = 3 \cdot 10^7$ [ppm²min] powoduje praktycznie 100% śmiertelność narażonych (rys 4) [10,11]. W warunkach zewnętrznej ekspozycji ładunek toksyczny chloru powodujący całkowitą śmiertelność populacji zostałby przekroczony w odległości większej niż 1 km (rys 5).



Ryc 4. Zależność procentu zgonów na skutek działania chloru w funkcji ładunku toksycznego

Fig. 4. Percentage share of casualties as a function of toxic load for chlorine



Ryc. 5. Wykres zależności $C^2=f(t)$ wraz z wyliczonymi wartościami dawki toksycznej dla wybranych odległości X od miejsca natychmiastowego uwolnienia się chloru: 1) $X = 0,5 \text{ km}$, śmiertelność 100% 2) $X = 1 \text{ km}$, śmiertelność 100% 3) $X = 2 \text{ km}$, śmiertelność 72% 4) $X = 3 \text{ km}$, śmiertelność 16%. Warunki ekspozycji zewnętrznej dla osób nie mogących znaleźć schronienia w czasie działania medium. Warunki atmosferyczne: $T = 1^\circ\text{C}$; $v = 1 \text{ m/s}$; $H = 84\%$; $p = 1021 \text{ hPa}$.

Fig. 5. $C^2=f(t)$ dependence with toxic loads calculated for selected distances X from place of sudden release of chlorine. 1) $X = 0,5 \text{ km}$, 100% of casualties 2) $X = 1 \text{ km}$, 100% of casualties 3) $X = 2 \text{ km}$, 72% of casualties 4) $X = 3 \text{ km}$, 16% of casualties. Values determined for external conditions for people who can not find refuge. Atmospheric conditions: $T = 1^\circ\text{C}$; $v = 1 \text{ m/s}$; $H = 84\%$; $p = 1021 \text{ hPa}$.

Wpływ ciągły o intensywności 1 kg/s

Rozważając wpływ ciągły gazu o intensywności 1 kg/s niezależnie od jego gęstości względem powietrza możemy użyć modelu Gaussa w celu określenia skutków toksycznych jakie będą miały miejsce w przypadku uwolnienia się medium. Z wykorzystaniem tego modelu wartości stężenia w odległości X metrów od rozszczelnienia podano w tabeli 5. Określone wartości dawki toksycznej założono dla czasu ekspozycji 1 godziny. Przy stałej szybkości uwolnienia po pewnym czasie stężenie wewnątrz i na zewnątrz osiągnie porównywalną wartość. Założenie to jest słuszne biorąc pod uwagę możliwości interwencyjne jednostek straży pożarnej w tamtych latach. Przybycie jednostek Centralnej Grupy Ratownictwa Chemicznego z Płocka zdolnej podjąć działania zapobiegawcze nastąpiło w szóstej godzinie po wykolejeniu się składu pociągu.

Tabela 5.

Stężenia C, dawki toksyczne L oraz prawdopodobieństwo zgonu w zależności od wysokości na której odbywała się ekspozycja. Dane z indeksem 1: kondygnacja parter (podłoga: h= 0 m) ; dane z indeksem 2: kondygnacja - II piętro (podłoga: h= 8 m). Uwolnienie ciągłe Q = 1 kg/s z wysokości H = 1,2 m; obliczenia wg. modelu Gaussa. Warunki atmosferyczne: T = 1°C; v = 1m/s; H = 84%; p=1021 hPa.

Table 5.

Concentration C, toxic load L and lethality as a function of height (h) at which have place an exposition. Data with 1-index: first floor (floor: h=0 m.). Data with 2-index: third floor (floor: h=8 m.). Continuous release Q=1kg/s, height of release H=1,2 m; calculation model: Gaussian. Atmospheric conditions: T = 1°C; v = 1m/s; H = 84%; p=1021 hPa.

x [m]	C ₁ [ppm]	C ₂ [ppm]	C ₁ /C ₂	L ₁ [ppm ² min]	L ₂ [ppm ² min]	% ₁ zgonów	% ₂ zgonów
100	3064	632	4,85	5,6E+08	2,4E+07	100,0	99,0
200	1029	566	1,82	6,4E+07	1,9E+07	100,0	98,3
300	538	383	1,40	1,7E+07	8,8E+06	93,9	92,1
400	339	270	1,26	6,9E+06	4,4E+06	88,2	78,2
500	236	200	1,18	3,3E+06	2,4E+06	69,6	59,0
600	176	155	1,14	1,9E+06	1,4E+06	50,0	39,4
700	137	124	1,10	1,1E+06	9,2E+05	31,3	25,2
800	111	102	1,09	7,4E+05	6,2E+05	19,6	15,3
900	91	85	1,07	5,0E+05	4,3E+05	11,4	8,9
1000	77	72	1,07	3,6E+05	3,1E+05	6,7	5,0
1500	40	39	1,03	9,6E+04	9,1E+04	< 1%	< 1%
2000	25	25	1,00	3,8E+04	3,8E+04	< 1%	< 1%
3000	13	13	1,00	1,0E+04	1,0E+04	< 1%	< 1%
4000	8	8	1,00	3,8E+03	3,8E+03	< 1%	< 1%
9000	2	2	1,00	2,4E+02	2,4E+02	< 1%	< 1%

Przeprowadzono analizę porównawczą skutków dla osób znajdujących się w różnych odległościach od miejsca uwolnienia oraz dla osób ewakuujących się z kondygnacji zerowej (parter) na kondygnację drugiego piętra. Analizując dane wyraźnie widać, iż największe różnice stężeń przy ewakuacji potencjalnych poszkodowanych na wyższe piętra odnotowuje się dla odległości najbliższych miejscu uwolnienia. Jednakże patrząc pod kątem skutków szkodliwych okazuje się, iż najbardziej wymierne skutki ucieczki na wyższe kondygnacje obserwuje się przy stężeniach powodujących między 25 a 80% zgonów. Wynika to

z własności funkcji probitowej przedstawionej na rys. 4. Stan ten doskonale obrazuje różnica pomiędzy procentem zgonów dla osób pozostających na miejscu w stosunku do osób udających się na wyższą kondygnację $\%_1-\%_2$ (tabela 6). Okazuje się, iż największy efekt przy założonych warunkach początkowych wypływu ($Q=1$ kg/s) obserwuje się między 400 a 700 metrem od miejsca uwolnienia. Dla analizowanego przykładu przejście między parterem a drugim piętrem powinno spowodować przeciętnie około 5% mniejszą śmiertelność.

Interesująco przedstawia się sytuacja porównania zmiany $\%$ zgonów ($\Delta\%_1$) od odległości (kolumna 3; tabela 6; $\Delta\%_1/100m$). Okazuje się, iż oddalenie się poszkodowanego o każde 100 metrów od miejsca rozszczelnienia spowodowałoby przeciętnie o około 10,4% mniejszą śmiertelność, a zatem byłoby 2,2 razy bardziej efektywne od przejścia z parteru na drugą kondygnację. Jednak podanie komunikatu radiowego dotyczącego ucieczki przed skażeniem spowodowałoby chaos i prawdopodobnie skutki bardziej zgubne wynikające z niekontrolowanego zachowania się tłumu [12]. Organizacja sił i środków niezbędnych do kontrolowanej ewakuacji byłaby na tak dużej przestrzeni, o stosunkowo dużej gęstości zaludnienia, zagadnieniem niezwykle trudnym.

Tabela 6.

Różnice procentowe w ilości zgonów. $\%_1-\%_2$ – różnica śmiertelności pomiędzy osobami ewakuowanymi a nieewakuowanymi z parteru na drugą kondygnację; $\Delta\%_1/100m$ – różnica w śmiertelności na każde dodatkowe oddalenie się o 100 metrów od miejsca rozszczelnienia (rozważane dla osób znajdujących się na poziomie ulicy równej poziomowi pierwszej kondygnacji).

Table 6.

Percentage differences in lethality. $\%_1-\%_2$ – lethality difference between people evacuated and not evacuated from first to third floor. $\Delta\%_1/100m$ – lethality difference for each 100-meter additional moving away from place of release (determined for people that are on the level of the first floor).

X [m]	$\%_1-\%_2$	$\Delta\%_1/100m$	$(\Delta\%_1/100m)/(\%_1-\%_2)$
100	1,0	-	-
200	1,7	0,0	0,0
300	1,8	6,1	3,4
400	10,0	5,7	0,6
500	10,6	18,6	1,8
600	10,6	19,6	1,8

700	6,1	18,7	3,1
800	4,3	11,7	2,7
900	2,5	8,2	3,3
1000	1,7	4,7	2,8
<i>średnia=</i>	<i>5,0</i>	<i>10,4</i>	<i>2,2</i>

Podsumowanie

Ze względu na miejsce, charakterystykę toksykologiczną medium przewożonego oraz jego ilość, zdarzenie jakie miało miejsce 9 marca 1989 roku w Białymstoku niewątpliwie stanowiło potencjalnie bardzo poważne zagrożenie dla mieszkańców miasta. W przypadku natychmiastowego uwolnienia się zawartości pojedynczej cysterny z chlorem określono, iż warunki zewnętrznej ekspozycji zagrażającej życiu byłyby spełnione w promieniu 5,6 km od miejsca zdarzenia. Dla osób pozostających w budynkach i nie uciekających na wyższe kondygnacje promień zagrożenia życia wynosiłby 4,5 km. 50% ryzyko zaistnienia wypadków śmiertelnych istniałoby na 430 metrze (700 metrze) od miejsca natychmiastowego uwalniania przy założeniu odporności człowieka odpowiednio na poziomie szczura lub myszy.

Bardzo ryzykowne było prowadzenie operacji logistycznych podnoszenia cystern ze względu możliwość istniejących niewidocznych uszkodzeń mechanicznych powstałych w samym momencie wypadku. A zatem zabezpieczenie jedynie ul. Poleskiej oraz terenu zaledwie w promieniu 200 metrów od katastrofy czy też wyłączenie z ruchu dzielnicy miasta, zamknięcie sklepów, żłobków, przedszkoli i szkół wydaje się być działaniami zdecydowanie niewystarczającymi.

Wykazano, iż zarządzanie ewakuacji z parteru na drugą kondygnację przy założeniu przykładowej wartości uwolnienia ciągłego na poziomie $Q=1\text{kg/s}$ oszczędziłaby przeciętnie o 5% więcej istnień ludzkich. Jednakże oddalenie się od miejsca rozszczelnienia o każde dodatkowe 100 metrów dałoby rezultat przeciętnie dwa razy lepszy zakładając, iż nastąpiłoby po czasie wyrównania się stężenia na zewnątrz i wewnątrz obiektów przy skrajnie niekorzystnym założeniu czasowym. Warunki takie mogłyby jednak zostać teoretycznie osiągnięte zważywszy na 6 godzinny czas do przybycia ratowników Centralnej Stacji Ratownictwa Chemicznego i osiągnięciu pełnej gotowości zabezpieczenia terenu akcji o godzinie 12:40 a więc 10 godzin od momentu wypadku.

Rozpatrując możliwość ewakuacji zewnętrznej należy wziąć jednak pod uwagę trudności związane z osiągnięciem spokojnego przebiegu ewakuacji, zwłaszcza w przypadku działania uwalniającego się gazu. Zagadnienie związane z masową ewakuacją powinno być

zatem tematem szczególnej uwagi zwłaszcza w aspekcie istniejących obecnie standardów bezpieczeństwa.

Literatura

1. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp172-c3.pdf>;
2. Jałoszyński S.K., *Ratownictwo chemiczne*, PPU EKOS, Gdańsk 1990 r.;
3. Strzelecki S., *Czas miłosierdzia*, 3 (143) 2002;
4. Materiały operacyjne KM PSP w Białymstoku;
5. Dokumentacja techniczna wagonu 15-1556 (materiały własne Instytut Kolejnictwa w Warszawie);
6. <http://www.tutienpo.net/en/Climate/BIALYSTOK/03-1989/122950.htm>;
7. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp172-c8.pdf> ;
8. *Karta charakterystyki substancji niebezpiecznej. Chlor*, The Linde Group, 2010;
9. *Hazardous Substances Data Bank. MEDLARS Online Information Retrieval System*, National Library of Medicine. June, 1994;
10. Borysiewicz M., Furtek A., Potemski S., *Poradnik metod ocen ryzyka związanego z niebezpiecznymi instalacjami procesowymi*, Instytut Energii Atomowej Otwock – Świerk 2000;
11. Khan F. I., Abbasi S.A., *Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol 11 Issue 4 (1998) 261;
12. Kołodziej-Saramak A., *Przyszłość systemów wczesnego ostrzegania ludności o zagrożeniach. „Cell Broadcast for Public Warning”*, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 19 (2010) 59.

dr Tomasz Węsierski, absolwent studiów magisterskich i doktoranckich na Wydziale Chemii UAM w Poznaniu. W strukturach PSP od 2008 roku. Obecnie pełni służbę jako adiunkt w Zakładzie Ratownictwa Chemiczno-Ekologicznego SGSP.

st. kpt. mgr inż. Małgorzata Majder-Łopatka, absolwentka Szkoły Głównej Służby Pożarniczej (rocznik 2002). Obecnie pracuje w Zakładzie Ratownictwa Chemicznego. Jest kierownikiem Pracowni Pomiaru Parametrów Środowiska.

Recenzenci

dr inż. Adam Majka

Vladas Praniauskas, PhD