

prof. dr hab. inż. JERZY S. MICHALIK

dr AGNIESZKA GAJEK

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

płk dr LESZEK SŁOMKA

Akademia Obrony Narodowej,
Centrum Szkolenia Obrony przed Bronią Masowego Rażenia

Poważne awarie w transporcie drogowym niebezpiecznych chemikaliów (2)

– ocena skutków

W artykule przedstawiono przykładowe prognozy skutków awarii w transporcie drogowym, wykonane przy zastosowaniu symulacji komputerowej, które dotyczyły wypadków drogowych z udziałem cystern przewożących chlor i amoniak. W symulacji wyznaczono strefy skutków toksycznych skażeń powstałych w wyniku wycieku tych gazów z cysterny w terenie otwartym, o luźnej oraz o zwartej zabudowie, w warunkach zimowych i letnich. Przedstawiono także prognozy skutków ataków terrorystycznych – detonacji cystern z kwasem azotowym lub z benzyną w terenie o zwartej zabudowie. Omówione, porównane i ocenione zostały skutki awarii transportowych, powodujących uwolnienie z cystern samochodowych benzyny, chloru oraz amoniaku w zależności od warunków terenowych i atmosferycznych.

Major accidents in road transport of dangerous materials (2) – assessing consequences

This paper presents sample results of computer simulations predicting potential consequences for people of accidents in road transport of chlorine and ammonia. Contaminated areas, being a result of chlorine and ammonia leaks, have been foretold, taking uninhabited, low- and high-density housing areas both in winter and summer into account. The article also predicts potential consequences of cisterns with nitric acid and gasoline's detonation by terrorists. It discusses, compares and assesses the results of potential consequences of accidents in road transportation of gasoline, chlorine and ammonia, depending on terrain conditions and weather.



Fot. Sheri Armstrong / Bigstockphoto

W artykule opublikowanym w poprzednim numerze „Bezpieczeństwa Pracy” [1] opisane zostały prognozy komputerowe potencjalnych skutków awarii transportowych w przewozie cystemi paliw węglowodorowych – benzyny oraz LPG, wykonane z uwzględnieniem rodzaju zagospodarowania terenu oraz warunków meteorologicznych.

Niniejsza publikacja to kontynuacja tej tematyki, jako że dotyczy wyników prognoz możliwych skutków awarii transportowych uwolnienia z cystern substancji toksycznych oraz żrących – chloru i amoniaku, a także możliwych skutków ataku terrorystycznego z wykorzystaniem cystern samochodowych, przewożących niebezpieczne chemikalia, wykonanych w ramach prac przedstawionych szczegółowo w opracowaniu [2].

Cysterna z chlorem

Scenariusz zdarzenia zakłada kolizję cysterny przewożącej 20 ton chloru na drodze ekspresowej w terenie otwartym (rejon Zakroczymia, rys. 1.). W wyniku zdarzenia doszło do uszkodzenia cysterny, skutkiem czego było przedostanie się do atmosfery się ok. 10 ton chloru.

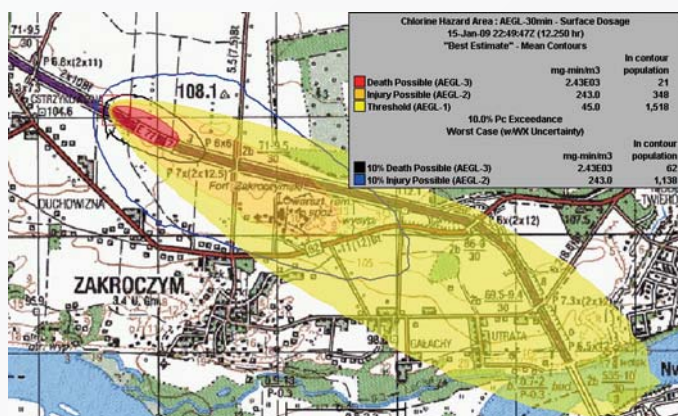
Zaznaczone na mapach (rys. 1–3.) strefy skażenia, pozwalają na określenie rozkładu dawek chloru znajdującego się w powietrzu, możliwych do wchłonięcia przez ludzi, zarówno w warunkach letnich, jak i zimowych. Ponadto tabela zamieszczona na rysunku zawiera szacunkową liczbę porażonych osób, która może wystąpić w ciągu 12 godzin po zdarzeniu. Charakterystyka poszczególnych stref zaznaczona została na mapie za pomocą następujących kolorów:

- strefa czerwona (AEGL-3* – 30 min) – stężenie śmiertelne chloru na poziomie $2,43 \cdot 10^3 \text{ mg} \cdot \text{min} / \text{m}^3$ – 21 ofiar
- strefa pomarańczowa (AEGL-2 – 30 min) – stężenie chloru powodujące obrażenia na poziomie $243 \text{ mg} \cdot \text{min} / \text{m}^3$ – 348 osób silnie zatrutych
- strefa żółta (AEGL-1 – 30 min) – stężenie progowe chloru na poziomie $45 \text{ mg} \cdot \text{min} / \text{m}^3$ – 1518 osób lekko zatrutych.

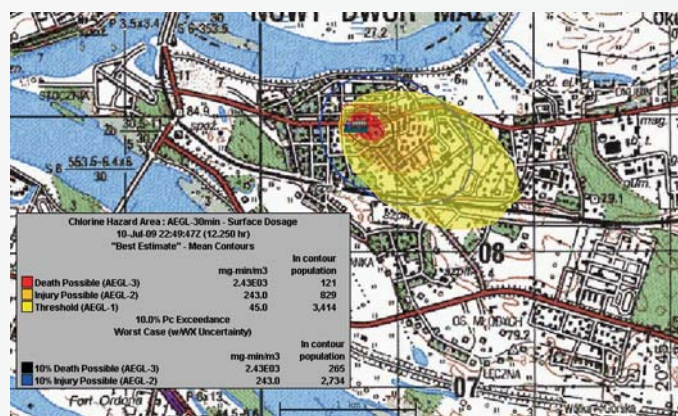
Jak widać na przedstawionych grafikach, skutki uwolnienia chloru do atmosfery mogą spowodować obrażenia u niemal 2 tys. osób, przy czym ok. 20 osób może ponieść śmierć w wyniku ekspozycji na tę substancję. Dodajmy też, że luźna zabudowa terenu nie stanowi istotnej przeszkody w swobodnym rozprzestrzenianiu się gazu, natomiast teren o zwartej, ale nie wysokiej zabudowie, ma jedynie niewielki wpływ na zakres i czas rozprzestrzeniania się chloru. Istotną zaporę mogą stanowić dopiero kompleksy leśne (liściaste i mieszane).

Skutki uwolnienia chloru są też uzależnione od warunków meteorologicznych. W każdym rodzaju terenu: otwartym, wiejskim i miejskim, liczby osób poszkodowanych są znacznie większe w warunkach zimowych – odpowiednio 1,8 tys., 3,3 tys. i 11,4 tys. osób (a w lecie – 300, 1,8 tys. oraz 4,3 tys.).

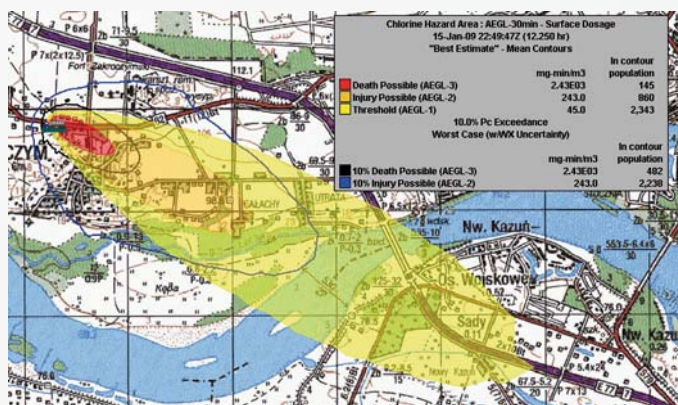
* Stężenia AEGL (*Acute Exposure Guideline Levels*) opisują ryzyko wystąpienia skutków medycznych u osób narażonych na oddziaływanie substancji toksycznej. Określono trzy poziomy stężenia: AEGL-1 – wywołujące u porażonych działanie drażniące lub inne pomijalne efekty zdrowotne; AEGL-2 – stężenie stanowiące poważne zagrożenie dla zdrowia, jednak nie zagrażające życiu, wymagana kwalifikowana pomoc medyczna; AEGL-3 to maksymalne stężenie substancji w powietrzu, które może bezpośrednio lub pośrednio zagrażać życiu porażonych.



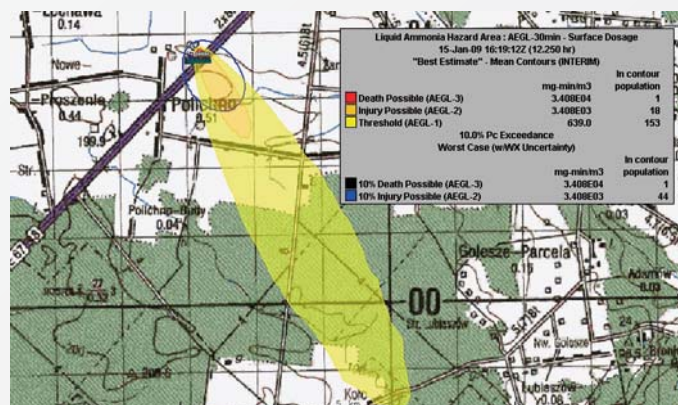
Rys. 1. Strefy skażeń powstałe w wyniku wycieku chloru z cysterny w terenie otwartym – warunki zimowe. Prognoza wykonana przy użyciu programu komputerowego H-PAC
Fig. 1. Hazardous contamination areas after a chlorine leak from a cistern; uninhabited area; winter; predicted with H-PAC computer program



Rys. 3. Strefy skażeń powstałe w wyniku wycieku chloru z cysterny w terenie o zwartej zabudowie – warunki letnie. Prognoza wykonana przy użyciu programu komputerowego H-PAC
Fig. 3. Hazardous contamination areas after a chlorine leak from a cistern; high-density housing; summer; predicted with H-PAC computer program



Rys. 2. Strefy skażeń powstałe w wyniku wycieku chloru z cysterny w terenie luźno zabudowanym – warunki zimowe. Prognoza wykonana przy użyciu programu komputerowego H-PAC
Fig. 2. Hazardous contamination areas after a chlorine leak from a cistern; low-density housing; winter; predicted with H-PAC computer program



Rys. 4. Strefy skażeń powstałe w wyniku wycieku amoniaku z cysterny w terenie otwartym – warunki zimowe. Prognoza wykonana przy użyciu programu komputerowego H-PAC
Fig. 4. Hazardous contamination areas after an ammonia leak from a cistern; uninhabited area; winter; predicted with H-PAC computer program

Cysterna z amoniakiem

Dla porównania ze sobą skutków uwolnienia powszechnie przewożonych substancji chemicznych – chloru i amoniaku, przeprowadzono prognozę stref skażeń, jakie mogą powstać w sytuacji kolizji cysterny przewożącej ok. 20 ton tej drugiej substancji. Niska temperatura powietrza oraz odkryty teren sprawiają, że zasięg uwolnionej substancji (ok. 30-40% całkowitej objętości) może dochodzić do kilku kilometrów (zob. prognoza na rys. 4.).

Z analizy sporządzonej prognozy wynika, że stężenie amoniaku w poszczególnych strefach skażeń, będzie miało ograniczony wpływ na bezpieczeństwo zdrowotne ludzi:

- strefa czerwona (AEGL-3 – 30 min) – stężenie śmiertelne amoniaku na poziomie $3,408 \cdot 10^4 \text{ mg} \cdot \text{min} / \text{m}^3$
- strefa pomarańczowa (AEGL-2 – 30 min) – stężenie amoniaku powodujące obrażenia na poziomie $3,408 \cdot 10^3 \text{ mg} \cdot \text{min} / \text{m}^3$
- strefa żółta (AEGL-1 – 30 min) – stężenie progowe amoniaku na poziomie $639 \text{ mg} \cdot \text{min} / \text{m}^3$.

Zatem zdarzenie tego typu może generować negatywne skutki zdrowotne dla ok. 150 osób, z czego jedna może ponieść śmierć (zob. ramka na rys. 4.).

W przypadku zdarzenia awaryjnego w terenie o zwartej zabudowie, w warunkach zimowych przy wycieku tak dużej ilości substancji, w warunkach bardzo ograniczonego parowania, negatywne skutki mogą być katastrofalne dla znacznej części miasta. Uwzględniając uśrednioną gęstość zaludnienia dla Piotrkowa Trybunalskiego, zdarzenie to może wywołać różnorodne objawy chorobowe u ok. 30 000 mieszkańców (rys. 5.)

Z kolei przykład z rys. 6. (warunki letnie) pokazuje skanalizowany „przepływ” skażonego powietrza wzdłuż drogi. Skutki zdrowotne tego skażenia, w porównaniu z poprzednim przykładem, są znacznie ograniczone. W wyniku tego typu zdarzenia może ucierpieć do 2 000 osób.

Skutki uwolnienia amoniaku są zdecydowanie zależne od warunków meteorologicznych. Różnice w sile oddziaływania na ludzi podczas obu pór roku są jeszcze

większe niż miało to miejsce w przypadku uwolnienia chloru. Charakterystycznym zjawiskiem, podobnie jak w przypadku chloru jest znacznie większa liczba osób poszkodowanych zimą, odpowiednio w terenie otwartym, wiejskim i miejskim jest to: ok. 170, ok. 200 i aż 30 tys. (!) osób. Latem zaś w terenie otwartym i wiejskim poszkodowanych jest zaledwie kilkanaście osób, a w mieście niecałe 2 tysiące. Tak duże różnice wynikają również z faktu, że – w odróżnieniu od chloru – uwolniony amoniak latem, ze względu na jego mniejszy ciężar właściwy rozprzestrzenia się w kierunku wyższych warstw atmosfery i przy gruncie ma znacznie mniejszy zasięg, niż zimą.

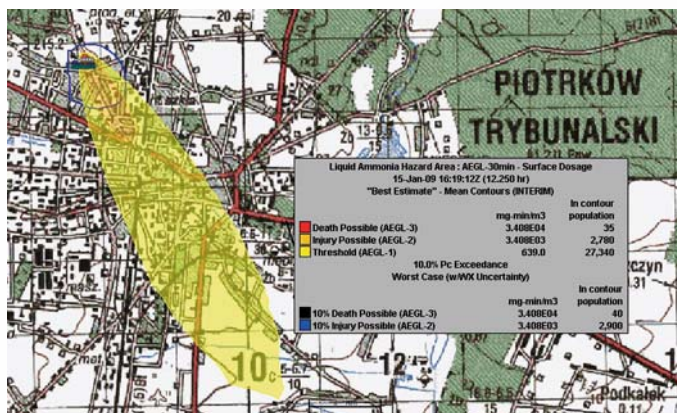
Zagrożenia terrorystyczne

Przeanalizowano także inny rodzaj zagrożenia, jakie może nieść ze sobą transport materiałów niebezpiecznych. Jak pokazują doświadczenia z innych regionów świata, pojazdy transportujące takie substancje mogą być wykorzystane przez grupy przestępcze jako narzędzie ataku terrorystycznego.

Analizowany scenariusz polegał na detonacji i uwolnieniu 100% zawartości cysterny zawierającej 18 ton kwasu azotowego (rys. 7.) oraz cysterny przewożącej ok. 20 ton benzyny. Oba przykładowe zdarzenia ulokowano w pobliżu jednego z centrów handlowych Warszawy, w warunkach zimowych oraz letnich.

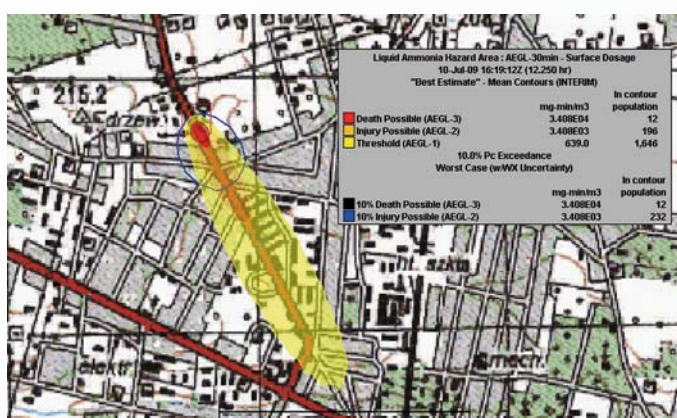
Warunki meteorologiczne odgrywały w tym przypadku zasadniczą rolę – jak się okazało, w zimie zasięg stref narażenia jest znacznie większy niż latem i może wynosić nawet kilkanaście kilometrów. Liczba ofiar śmiertelnych może sięgnąć od ok. 800 (benzyna) do ponad 1100 osób (kwas azotowy), a ogólna liczba poszkodowanych może przekroczyć ok. 16 tys. w odniesieniu do benzyny, a w przypadku kwasu azotowego – nawet 40 tys. Z kolei w warunkach letnich, przy temperaturze ok. 20 °C, zarówno zasięg stref skażenia, jak i liczba potencjalnych ofiar ulegają redukcji nawet o ok. 60%.

Ze względu na szczególny charakter scenariusza przykładowych zdarzeń terrorystycznych oraz wyniki prognoz ich skutków, dalsze szczegółowe informacje na ten temat nie będą prezentowane w niniejszej publikacji.



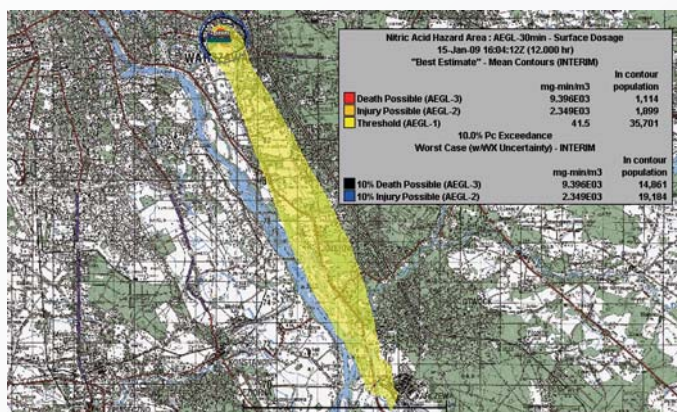
Rys. 5. Strefy skażeń powstałe w wyniku wycieku amoniaku z cysterny w terenie o zwartej zabudowie – warunki zimowe. Prognoza wykonana przy użyciu programu komputerowego H-PAC

Fig. 5. Hazardous contamination areas after an ammonia leak from a cistern; high-density housing; winter; predicted with H-PAC computer program



Rys. 6. Strefy skażeń powstałe w wyniku wycieku amoniaku z cysterny w terenie o zwartej zabudowie – warunki letnie. Prognoza wykonana przy użyciu programu komputerowego H-PAC

Fig. 6. Hazardous contamination areas after an ammonia leak from a cistern; high-density housing; summer; predicted with H-PAC computer program



Rys. 7. Strefy skażeń powstałe w wyniku detonacji cysterny z kwasem azotowym w terenie o zwartej zabudowie – warunki zimowe. Prognoza wykonana przy użyciu programu komputerowego H-PAC

Fig. 7. Hazardous contamination areas after detonation of cistern and release of nitric acid; high-density housing; winter; predicted with H-PAC computer program

Ocena skutków – podsumowanie i wnioski

Zgodnie z przewidywaniami, i podobnie jak w przypadku zagrożeń związanych z transportem drogowym paliw węglowodorowych, skutki uwolnienia chloru w terenie otwartym są dla ludzi niewielkie. Ale już w zabudowie wiejskiej, ze względu na gęstość zaludnienia – skutki zdarzenia może odczuć więcej osób. W przypadku zaś zwartej zabudowy, zarówno rozmiar strefy skażenia powsta-

tego w wyniku tego typu zdarzenia jest znaczący, jak i liczba poszkodowanych osób jest zdecydowanie większa.

Warunki atmosferyczne mają bardzo duży wpływ na liczbę potencjalnych ofiar zdarzenia, w przypadku zdarzeń przebiegających w okresie zimowym liczba poszkodowanych jest, w porównaniu z warunkami letnimi, sześciokrotnie większa w przypadku terenu otwartego, prawie 2-krotnie (1,8) w przypadku terenu o luźniej zabudowie oraz ponad 2,5-krotnie w przypadku zwartej zabudowy.

W przypadku uwolnienia amoniaku na terenie otwartym skutki negatywne dla ludzi są relatywnie małe, zwłaszcza latem. Sytuacja zmienia się diametralnie w odniesieniu do miast, w których rozmiar strefy skażenia powstałego w wyniku tego typu zdarzenia jest bardzo znaczący, a liczba poszkodowanych osób jest zdecydowanie większa. Znacznie większe znaczenie, w porównaniu z pozostałymi substancjami, mają też warunki atmosferyczne. W zimie, w przypadku zwartej zabudowy, skutki uwolnienia amoniaku w warunkach zimowych są po prostu katastrofalne, co doskonale widać w tabeli. Przedstawiono w niej liczby osób poszkodowanych w symulowanej awarii podczas transportu drogowego niebezpiecznych towarów (benzyna [1], chlor, amoniak) na terenie otwartym, terenie o zabudowie luźniej oraz terenie o zabudowie zwartej, z uwzględnieniem warunków pogodowych.

Tabela. Porównanie sumarycznej możliwej liczby osób poszkodowanych w zależności od substancji, warunków terenowych i atmosferycznych [2]

Table. Injured persons count in dependence of chemical substance, terrain conditions and weather [2]

	Benzyna		Chlor		Amoniak	
	warunki zimowe	warunki letnie	warunki zimowe	warunki letnie	warunki zimowe	warunki letnie
Teren otwarty	13	7	1 887	289	172	16
Luźna zabudowa	49	28	3 348	1 811	208	18
Zwarta zabudowa	748	504	11 426	4 364	30 155	1 854

Porównując przedstawione w tabeli zestawienie liczby osób poszkodowanych, można stwierdzić, że transport substancji toksycznych – chloru, amoniaku przez tereny o zwartej zabudowie wiąże się z ryzykiem wystąpienia bardzo poważnych skutków w przypadku uwolnienia tych substancji do otoczenia.

Przedstawione w tej, a także we wcześniejszych publikacjach poświęconych problematyce bezpieczeństwa transportu drogowego niebezpiecznych chemikaliów w Polsce [1,3,4] wyniki prac badawczych stanowiły podstawę do poszukiwania rozwiązań, mających na celu poprawę bezpieczeństwa kierowców oraz ludności a także środowiska na obszarach, które mogą być dotknięte skutkami poważnych awarii transportowych. Wyniki tych prac oraz propozycje rozwiązań zostaną przedstawione w „Bezpieczeństwie Pracy”, w kolejnym artykule z tego cyklu.

PIŚMIENNICTWO

- [1] J. S. Michalik, A. Gajek, L. Słomka *Poważne awarie w transporcie drogowym niebezpiecznych chemikaliów (1) – prognozy skutków*. „Bezpieczeństwo Pracy” 3 (474) 2011, s. 15-18
- [2] J. S. Michalik, A. Gajek, L. Słomka *Opracowanie programów zarządzania ryzykiem związanym z transportem drogowym niebezpiecznych chemikaliów. Ocena zagrożeń poważnymi awariami chemicznymi w Polsce, związanych z transportem drogowym materiałów niebezpiecznych i opracowanie zaleczanych rozwiązań dotyczących programów zarządzania ryzykiem, związanym z transportem niebezpiecznych chemikaliów, wyboru tras przewozu dla różnych kategorii substancji i materiałów niebezpiecznych. Opracowanie zasad i zakresu informowania o przewozach*. Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa, listopad 2009 r.
- [3] J. S. Michalik, A. Gajek, K. Grzegorzczak, S. Gredecki, M. Piękniewski, L. Słomka, P. Janik, D. Dziwulski, S. Zając *Zagrożenia poważnymi awariami w transporcie drogowym niebezpiecznych chemikaliów w Polsce*. „Bezpieczeństwo Pracy” 9 (456) 2009, s. 6-9
- [4] J. S. Michalik, A. Gajek, K. Grzegorzczak, S. Gredecki, M. Piękniewski, L. Słomka, P. Janik, D. Dziwulski, S. Zając *Przyczyny zagrożeń w transporcie drogowym niebezpiecznych chemikaliów w Polsce*. „Bezpieczeństwo Pracy” 10(457) 2009, s. 14-17

Publikacja opracowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach I etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” dofinansowanego w latach 2008-2010 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.