

Lucyna BRZOWSKA, Monika NIESYTO

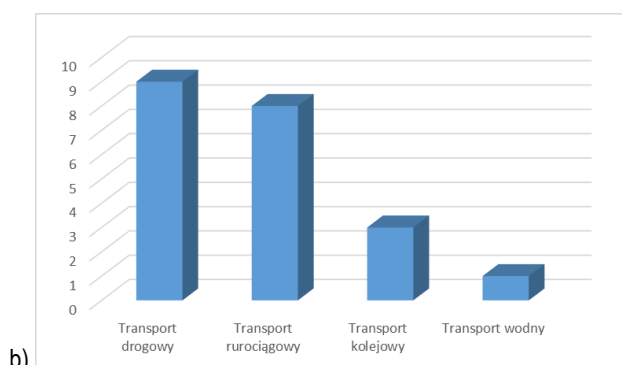
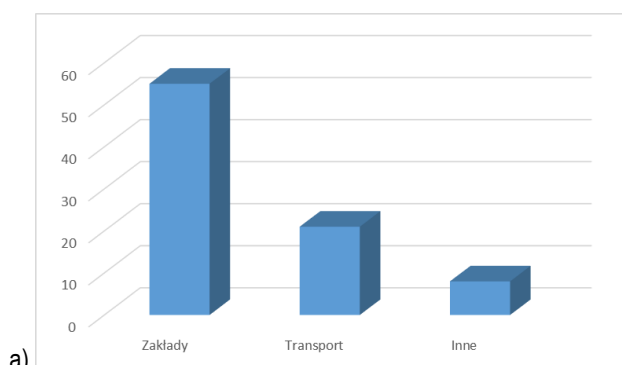
WPLYW WARUNKÓW METEOROLOGICZNYCH NA SKUTKI UWOLNIENIA CHLORU W WYNIKU WYPADKU DROGOWEGO

W artykule przedstawiono wpływ warunków meteorologicznych i szorstkości aerodynamicznej podłoża na rozprzestrzenianie się substancji niebezpiecznej, wysoce toksycznej – chloru. Przeprowadzono symulacje w programie ALOHA, zakładając, że w wyniku nagłego zdarzenia następuje wyciek 10 ton płynnego chloru z przewożącej go cysterny. Przyjęto, że czas wycieku wynosił jedną godzinę. Otrzymane wyniki naniesiono na mapę z uwzględnieniem zakładanej lokalizacji: droga E463 w Pszczynie. Dokonano analizy stopnia zagrożenia w zależności od kierunku i prędkości wiatru. Dodatkowe symulacje wykonano przyjmując różne szorstkości aerodynamiczne.

Analiza wyników pozwala określić najmniej korzystne warunki meteorologiczne z punktu widzenia bezpieczeństwa mieszkańców.

WSTĘP

Transport towarów niebezpiecznych wzrasta z roku na rok, w 2009 roku wynosił 5967 mln tkm, a w 2013 roku były to już 7024 mln tkm [12]. Zdarzenia noszące znamiona poważnych awarii są rejestrowane w raportach Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska (rys. 1a). Jak podaje najnowszy z opublikowanych do tej pory raportów, w 2013 roku miały miejsce 84 takie zdarzenia, wśród których 21 zdarzeń wystąpiło podczas transportu substancji, co oznacza, że udział transportu stanowił 25 %, przy czym najwięcej wydarzeń tego typu miało miejsce podczas transportu drogowego (9 zdarzeń) – rys. 1b.



Rys. 1. Poważne awarie w Polsce w 2013 roku: a) ogólnie, b) w transporcie

Zdarzenia z udziałem materiałów niebezpiecznych mogą mieć miejsce zarówno w trakcie przemieszczania się pojazdów przewożących je, jak i w miejscach postoju [8]

Najczęściej niebezpieczne substancje chemiczne przewożone transportem drogowym trafiają do przedsiębiorstw przemysłowych, z których około 400 należy do grupy tych o podwyższonym ryzyku wystąpienia poważnej awarii. Przewożone są najczęściej ciekłe materiały zapalne, takie jak paliwa silnikowe i farby – ponad 65 % oraz gazy, wśród których najczęściej transportuje się propan-butan i acetylen – 25 %. W pozostałych 10% mieszczą się materiały zaliczające się do klasy różnych ładunków niebezpiecznych (na przykład azbest i poduszki powietrzne) – 3%, materiały żrące – 1,6%, materiały stałe zapalne i samoreaktywne – 1,5% [5].

Do najczęściej występujących przyczyn wypadków drogowych z udziałem niebezpiecznych materiałów należą: awarie mechaniczne, wycieki związane z procesami technologicznymi oraz niepożądane reakcje chemiczne [2].

Nagłe zdarzenia drogowe z udziałem substancji niebezpiecznych mogą być przyczyną powstawania zagrożenia życia i zdrowia ludzi na znacznych obszarach. Wielkość tych obszarów oraz wysokość stężeń zanieczyszczeń zależna jest zarówno od rodzaju substancji, sposobu jej uwolnienia, jak i od warunków meteorologicznych oraz pokrycia terenu.

Na stężenie wyemitowanych substancji wpływają przede wszystkim: temperatura i stopień stateczności pionowej powietrza, stopień zachmurzenia, opady atmosferyczne oraz wilgotność powietrza, ciśnienie atmosferyczne, prędkość i kierunek wiatru oraz charakter turbulencji powietrza. Czynniki najsilniej oddziałującymi na sposób propagacji są dwa ostatnie parametry, kluczowa wydaje się prędkość wiatru, a uwzględniając zagospodarowanie terenu także jego kierunek.

1. WPLYW WARUNKÓW METEOROLOGICZNYCH I SZORSTKOŚCI AERODYNAMICZNEJ NA ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ I STĘŻENIA ZANIECZYSZCZEŃ

1.1. Warunki meteorologiczne a rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń

Warunki meteorologiczne są zespołem zjawisk i elementów zależnych od wielu czynników, między innymi miejsca, klimatu, pory

roku i dnia. Czynniki te można podzielić na lokalne i synoptyczne [11]:

- czynniki lokalne – są one warunkowane przez położenie geograficzne i jego aspekty: wysokość nad poziomem morza, szerokość geograficzną, odległość od mórz bądź lądów, rzeźbę i ukształtowanie terenu oraz zanieczyszczenie powietrza,
- czynniki synoptyczne – to aktualny stan pogody warunkowany przez: rodzaj masy powietrza znajdujący się nad określonym obszarem, przemieszczanie się frontów atmosferycznych oraz układy baryczne.

Można tu wymienić więc promieniowanie słoneczne – temperaturę, prędkość i kierunek wiatru, zachmurzenie. Znaczenie mają też nierówności powierzchni ziemi wpływające na powstawanie turbulencji, czy w szerszym aspekcie (góry) pionowych ruchów powietrza (wiatr halny).

Istotnym czynnikiem mającym wpływ na stężenie zanieczyszczeń w powietrzu jest pionowa stateczność powietrza. Od pionowej stateczności powietrza uzależnione jest to, w której warstwie atmosfery zachodzi rozpraszanie i propagacja chmury zanieczyszczeń. Rozróżnia się trzy stopnie tego zjawiska: inwersję, konwekcję i izotermię [4]. Pierwsze i ostatnie są wyjątkowo niekorzystne z punktu widzenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń.

W przypadku inwersji cząstki substancji w obłoku stosunkowo łatwo rozprzestrzeniają się w warstwach sąsiadujących z powierzchnią ziemi, gdzie najczęściej ma miejsce emisja związków szkodliwych, czy niebezpiecznych, natomiast utrudnione jest przejście mas zimnego powietrza zawierających wyemitowaną substancję do warstw położonych wyżej. Takie zjawisko zachodzi najczęściej podczas bezwietrznych i bezchmurnych nocy po zachodzie słońca (przede wszystkim latem) oraz w mroźne dni, gdy powietrze ochładza się od śniegu. Istnieje również rodzaj inwersji charakterystyczny dla dolin górskich. Smog, który jest ogromnym problemem nie tylko terenów o wysokim stopniu urbanizacji, ale również miasteczek i wsi podgórskich jest ściśle związany właśnie ze zjawiskiem inwersji atmosferycznej.

Z kolei w czasie występowania izotermii obłok substancji szkodliwych utrzymuje się w miejscu emisji. Zjawisko to występuje gdy zarówno gęstość, jak i temperatura powietrza nie zmieniają się wraz z wysokością nad powierzchnią ziemi. Można ją zaobserwować zimą, kiedy przy bezchmurnym niebie ogrzewanie dolnych warstw powietrza jest minimalne, a także w pochmurne dni, gdy nisko uformowane, gęste obłoki przeszkadzają intensywnemu nagrzaniu w ciągu dnia powierzchni ziemi i niskich warstw powietrza, a także ochładzaniu ich w trakcie nocy. Często izotermia jest przejściowym stanem atmosfery do wspomnianej wyżej inwersji.

Znacznie korzystniejsza, z punktu widzenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń jest konwekcja, występująca, kiedy przylegające do powierzchni ziemi warstwy powietrza przyjmują oddawane przez nią ciepło, a następnie rozszerzają się, zmniejszając swoją gęstość i unoszą się w górę pod wpływem chłodniejszych mas powietrza. Można ją zaobserwować przede wszystkim podczas ciepłych, bezchmurnych dni. Przy konwekcji obłok zanieczyszczeń podczas unoszenia ku górnym warstwom powietrza ulega rozrzedzeniu.

Z pionową statecznością powietrza związana jest klasa stabilności atmosfery. Można wyróżnić trzy podstawowe klasy stabilności: stałą, obojętną oraz chwiejną. Pierwsza z nich występuje, kiedy gradient termiczny jest mniejszy niż wilgotno adiabatyczny – wzrost temperatury potencjalnej następuje wraz z wysokością. Ta klasa stabilności, powiązana ze zjawiskiem inwersji, sprzyja zatrzymywaniu się zanieczyszczeń w warstwie przyziemnej.

Stabilność obojętna występuje, kiedy pionowym ruchom powietrza nie towarzyszą powstrzymujące je siły. W takim przypadku przemieszczające się cząsteczki mają temperaturę otaczającego je

powietrza i po przemieszczeniu pozostają na danym poziomie. Stabilność chwiejna jest konsekwencją sytuacji, kiedy rzeczywisty spadek temperatury powietrza jest większy niż adiabatyczny i występuje w przypadkach napływu ciepłych mas powietrza nad dany obszar w niższych warstwach atmosfery, napływu zimniejszych mas w warstwach wyższych bądź wtedy, gdy powietrze ogrzewane jest od powierzchni ziemi.

Przeważnie wyróżnia się dodatkowe stany stabilności atmosfery, najczęściej według podziału Pasquilla na równowagę: A – bardzo chwiejną, B – chwiejną, C – nieznacznie chwiejną, D – obojętną, E – stałą i F – bardzo stałą. Taki podział stosuje się również w Polsce [9].

Istotnymi czynnikami wpływającymi na propagację wyemitowanych substancji są opady atmosferyczne oraz wilgotność powietrza. Wraz ze wzrostem wilgotności powietrza bądź intensywności opadów maleje stężenie uwolnionej do atmosfery substancji – jest to konsekwencją takich procesów jak:

- rozpuszczania się substancji w wodzie,
- mechanicznego działania opadów,
- absorpcji zachodzącej na powierzchni kropel wody.

Kolejnym czynnikiem meteorologicznym oddziałującym na stężenia uwolnionych do atmosfery substancji jest zachmurzenie. Wysoki stopień zachmurzenia nieba utrudnia propagację zanieczyszczeń w powietrzu – dzieje się tak, gdyż chmury mogą pochłaniać cząstki substancji [11]. Ponadto, zachmurzenie ma wpływ na stabilność atmosfery, która również jest istotnym czynnikiem oddziałującym na propagację zanieczyszczeń.

1.2. Aerodynamiczna szorstkość terenu

Jak już wspomniano we wstępie, istotnym czynnikiem wpływającym na propagację zanieczyszczeń jest topografia terenu; nie tylko ukształtowanie terenu, ale również jego zagospodarowanie. Wyraża się to poprzez współczynnik szorstkości aerodynamicznej przyjmowany jako wartość liczbową zależna od rodzaju pokrycia terenu (np. krzewy, drzewa, zabudowania niskie, wysokie) [6]. Na terenach charakteryzujących się wysoką wartością tego współczynnika, jak np. centra dużych miast, można zaobserwować takie zjawiska jak obniżenie prędkości wiatrów (dla przykładu w centrum Krakowa osłabienie prędkości wiatru wynosi średnio 30%) czy też zwiększenie prędkości słabych wiatrów na skutek hiperwentylacji [1]. Wartości współczynnika szorstkości aerodynamicznej dla różnych rodzajów pokrycia terenu zostały podane w [8] i wynosi on od 0,00008 – dla wody do 5 – dla zabudowy wysokiej w miastach powyżej 500 tys. mieszkańców. W większości modeli obliczeniowych rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń wartość aerodynamicznej szorstkości terenu odgrywa istotną rolę. Często prowadzone są dodatkowe obliczenia, aby dokładnie określić wartość tego parametru.

2. EKSPOZYCJA NA SUBSTANCJE NIEBEZPIECZNE

2.1. Kryteria progowe do szacowania ekspozycji na substancje niebezpieczne

Aby możliwe było właściwe oszacowanie skutków uwolnień substancji niebezpiecznych do atmosfery należy wybrać odpowiednie kryteria pozwalające na określenie stopnia zagrożenia. Najczęściej kryteria te stanowią odniesienie do wartości stężeń dopuszczalnych definiowanych i publikowanych przez odpowiednie organy ustawodawcze w danym państwie. W Polsce wartości dopuszczalne stężeń zanieczyszczeń zostały określone w [10]. Dla chloru wartość dopuszczalna w odniesieniu do 30 min. wynosi 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (ok. 0,07 ppm).

Korzystne jest wyznaczenie stref zagrożeń toksycznych oparte o kryteria progowe narażenia na poszczególne substancje. Kryteria takie odnoszą się do efektów zdrowotnych związanych z ekspozycją na daną substancję, np.: zagrożenie zgonem, trwałe i czasowe uszkodzenie zdrowia, efekty przejściowe i ustępujące [7]. Najczęściej stosowane kryteria dzielone są na trzy klasy:

- klasa 1 – brak zagrożenia dla zdrowia i życia,
- klasa 2 – zagrożenie zdrowia,
- klasa 3 – zagrożenie życia.

W programie ALOHA, wykorzystanym do wykonania symulacji omówionych w dalszej części artykułu możliwe jest wybranie jednego z czterech kryteriów:

- ERPG (Emergency Response Planning Guidelines), w którym wartości graniczne stężeń przy jednogodzinnej ekspozycji na chlor wynoszą dla klas 1 – 3 odpowiednio: 1 ppm, 3 ppm oraz 20 ppm;
- PACs (Protective Action Criteria for Chemicals), w którym, podobnie jak wyżej odniesiono się do stężeń jednogodzinnych, odpowiednio dla klas 1 – 3: 0,5 ppm, 2 ppm oraz 20 ppm.
- IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) – kryterium progowe, które określa jaka ilość uwolnionej do atmosfery niebezpiecznej substancji powoduje zagrożenie życia, nieodwracalny bądź długotrwały uszczerbek na zdrowiu lub wystąpienie symptomów wpływających na zdolność do podjęcia działań ochronnych. Kryterium to jest określane na podstawie wartości dawki śmiertelnej LD₅₀ bądź LC₅₀. W przypadku chloru stężenie dla strefy IDHL wynosi 10 ppm;
- AEGL (Acute Exposure Guideline Levels) – jeden z najpowszechniej stosowanych, obok ERPG, zestawów kryteriów progowych. AEGL pozwala na szacowanie stref dla innych niż jednogodzinne czasów trwania ekspozycji: 10 minut, 30 minut, 60 minut, 240 minut oraz 480 minut. Efekty zdrowotne, występujące u ludzi narażonych na stężenia przypisane każdej z trzech klas AEGL oraz wartości tych stężeń dla czasów ekspozycji do jednej godziny dla chloru zostały przedstawione w tabeli 1. Kryterium to zostało przyjęte do analiz stref zagrożenia przedstawionych w dalszej części artykułu.

Tab. 1. Stężenia chloru dla poszczególnych klas AEGL i różnych czasów ekspozycji

Klasa AEGL	Efekty toksyczne występujące u ludzi	Stężenie chloru dla czasu ekspozycji [ppm]		
		10 min	30 min	60 min
AEGL-1	przejściowe i ustępujące po zakończeniu ekspozycji – dyskomfort, efekty bezobjawowe, brak ryzyka zgonu bądź poważnych powikłań	0,5	0,5	0,5
AEGL-2	poważne i nieodwracalne lub długotrwałe; ograniczenie zdolności do ewakuacji	2,8	2,8	2,0
AEGL-3	zagrożające życiu	50	28	20

2.2. Chlor jako substancja niebezpieczna

Chlor jest substancją powszechnie wykorzystywaną w przemyśle – jest stosowany do uzdatniania wody pitnej, odkażania i bielenia, jego związki są półproduktami i odczynnikami w syntezie licznych substancji, takich jak fenole i freony, ma szerokie zastosowanie w przemyśle papierniczym, celulozowym, medycznym i motoryzacyjnym, a ponadto stosowany jest do produkcji środków dezynfekujących, bakteriobójczych i rozpuszczalników. O jego istotnej roli w przemyśle świadczy fakt, że stosowany jest w ponad połowie chemicznych procesów przemysłowych, a w przypadku produkcji leków i chemicznych środków ochrony roślin jest to ponad 90 % [2].

Ze względu na powszechność stosowania chloru oraz na jego silną agresywność chemiczną, niebezpieczne wypadki z udziałem tej substancji mają miejsce stosunkowo często [13]. Mogą one być przyczyną powstawania zagrożenia nie tylko ze względu na silną toksyczność chloru, która zagraża życiu i zdrowiu ludzi narażonych na jego wdychanie, ale także z powodu niebezpieczeństwa wystąpienia pożarów i wybuchów oraz dewastację środowiska naturalnego.

Z przeprowadzonego przez U.S. Department of Transportation (DOT) badania analizującego wypadki podczas transportu niebezpiecznych substancji chemicznych wynika, że wypadki z udziałem chloru stwarzają najpoważniejsze zagrożenie. Badanie dotyczyło okresu 5 lat (2005-2009) i wykazało, że spośród 48 zarejestrowanych wypadków w USA, 83 osoby poniosły poważne obrażenia, a 9 osób zginęło. Wśród poważniejszych awarii podczas transportu chloru mających miejsce w USA można wymienić kolizję dwóch pociągów towarowych, która wydarzyła się w 2009 roku w Południowej Karolinie – uwolniono się wtedy 43500 m³ chloru, powodując śmierć dziewięciu osób (rysunek 2). Inna poważna awaria podczas transportu tej substancji miała miejsce w 2005 roku w Chinach, kiedy z cysternej samochodowej wyciekło 30 ton chloru; jej skutkiem była ewakuacja 10 000 osób oraz 27 ofiar śmiertelnych i 285 zatrutych (rysunek 3). Najpoważniejszy wypadek tego typu miał miejsce w Rumunii w 1939 roku – w wyniku rozsadzenia zbiornika z chlorem śmierć poniosło 68 osób [13].



Rys. 2. Kolizja pociągów w Południowej Karolinie w roku 2009 skutkująca uwolnieniem chloru



Rys. 3. Wypadek cysterny w Chinach w 2005 r.

Wypadki z udziałem chloru mają miejsce także w Polsce. Na przestrzeni dziesięciu lat (2000-2009) doszło do 53 takich wydarzeń. Potencjalnie najbardziej niebezpieczna w Polsce awaria pod-

czas transportu wydarzyła się w marcu 1989 roku, kiedy pociąg przewożący tę substancję z ZSRR do NRD wykoleił się w Białymstoku (rysunek 4). Ze względu na fakt, że nie nastąpił wyciek chloru z cystern nie było żadnych ofiar śmiertelnych. Symulacja tego wydarzenia za pomocą programu ALOHA wykazała, że w przypadku gdyby chlor został wtedy uwolniony zagrożone byłoby życie ludzi znajdujących się w promieniu 5,6 km [12]. W Polsce miały także miejsce podobne wypadki ze skutkiem śmiertelnym – w 1968 roku miała miejsce katastrofa kolejowa, w wyniku której nastąpiło wybite dennicy jednej z cystern przewożących chlor, co spowodowało śmiertelne zatrucie kilku osób.



Rys. 4. Wypadek kolejowy w Białymstoku w 1989 r.

3. ANALIZA WYNIKÓW SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

3.1. Wartości początkowe i warunki symulacji

Wszystkie przedstawione w niniejszym rozdziale symulacje wykonano w programie ALOHA. Program ten pozwala na wykonanie obliczeń zasięgu stref zagrożenia przyjętych według jednego z omówionych wyżej kryteriów. W programie możliwe jest wybranie substancji niebezpiecznej i automatyczne wczytanie jej parametrów, a następnie zdefiniowanie scenariusza uwolnienia, przy czym możliwy czas symulacji to jedna godzina. Stanowi to znaczne ograniczenie w programie. Założono, że wyciek substancji występował przez sześćdziesiąt minut z jednakowym natężeniem emisji. Chlor przewożony był w temperaturze otoczenia, pod postacią ciecży (gaz sprężony pod ciśnieniem). W zbiorniku znajdowało się 20 ton tej substancji, z czego 10 ton przedostało się do atmosfery. Ustalono także parametry geometryczne cysterny.

Parametry meteorologiczne, za wyjątkiem kierunku wiatru (założono, że w każdym przypadku jest to wiatr wschodni), oraz szorstkość aerodynamiczną wprowadzano zależnie od analizowanego wariantu. Przy czym, możliwe jest ustalenie jednego zastępczego współczynnika szorstkości aerodynamicznej dla całego obszaru.

3.2. Wpływ warunków meteorologicznych na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń

W pierwszym kroku analizowano wpływ prędkości wiatru na wielkość chmury zanieczyszczeń. Przyjęto, że prędkość wiatru może mieścić się w przedziale od 2 m/s do 8 m/s, przy czym analizowano różne przypadki ze zmianą o 1,5 m/s. Pozostałe warunki meteorologiczne przyjęto zgodnie z uśrednionymi wartościami dla miesiąca lipca w Polsce:

- zachmurzenie nieba na poziomie 60%,
- temperaturę powietrza 22°C,
- wilgotność powietrza na poziomie 72%.

Analizowano również wpływ prędkości wiatru dla warunków zimowych. W tym przypadku przyjęto:

- zachmurzenie nieba na poziomie 80%,
- temperaturę powietrza 1°C,
- wilgotność powietrza na poziomie 86%.

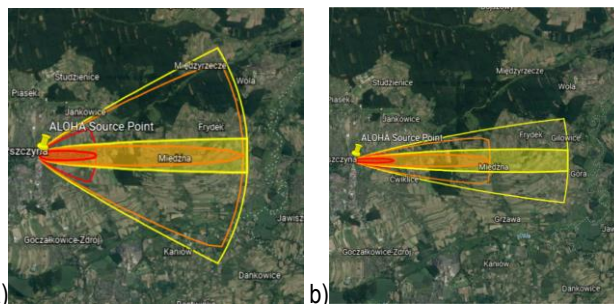
Wszystkie symulacje przeprowadzono dla tego samego miejsca wypadku: prawego pasa drogi E75 przy ulicy Górnośląskiej

w Pszczynie (rysunek 5), przyjęto wartość współczynnika szorstkości aerodynamicznej jak dla zabudowy miejskiej.

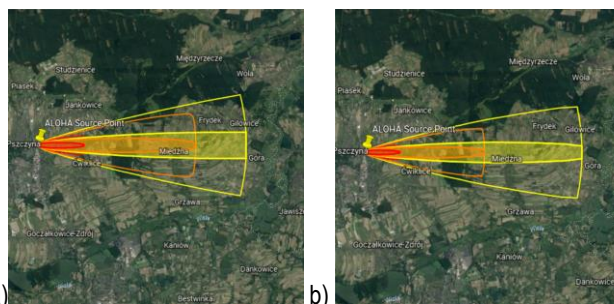


Rys. 5. Miejsce analizowanego hipotetycznego zdarzenia

Przykładowe chmury stężeń z zaznaczonymi wartościami progowymi AEGL przedstawiono na rys. 6 i 7 natomiast długość i szerokość stref zarówno dla warunków letnich, jak i zimowych przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 6. Chmura stężeń naniesiona na mapę w Google Earth, w przypadku prędkości wiatru: a) 2 m/s, b) 5 m/s dla warunków letnich.

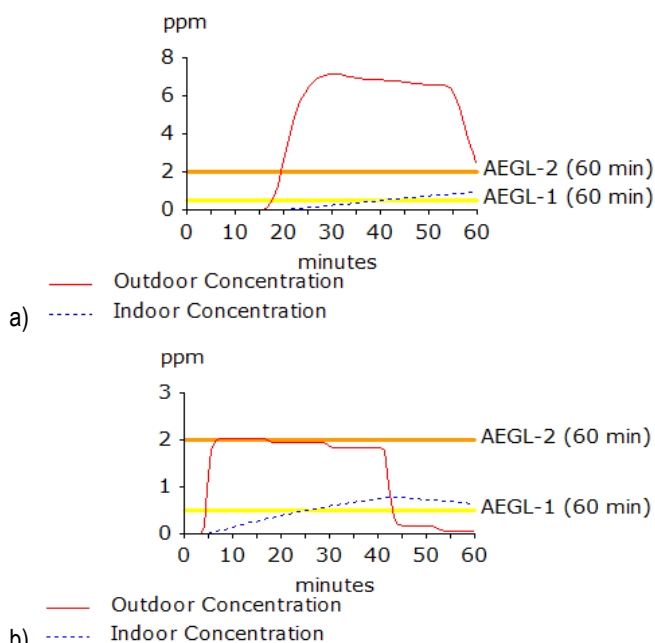


Rys. 7. Chmura stężeń naniesiona na mapę w Google Earth, w przypadku prędkości wiatru 3,5 m/s: a) dla warunków letnich i b) dla warunków zimowych.

Tab. 2. Zasięg oddziaływania chloru dla poszczególnych klas AEGL i różnych prędkości wiatru

Prędkość wiatru	Zasięg oddziaływania chloru w km							
	AEGL-1		AEGL-2		AEGL-3		Szerokość maksymalna	
	lato	zima	lato	zima	lato	zima	lato	zima
2 m/s	>10	>10	9,8	7,2	2,7	2	1,8	1,4
3,5 m/s	>10	>10	7,6	5,5	2,2	1,6	1,2	1
5 m/s	>10	9,5	6,4	4,6	1,9	1,4	1,1	1
6,5 m/s	>10	8,3	5,6	4	1,6	1,2	1	0,9
8 m/s	7,5	7,3	3,5	3,6	1	1,1	0,9	0,8

Na rys. 8 przedstawiono zmianę stężenia w czasie trwania symulacji w odległości 5 km od źródła (w linii prostej), dla prędkości wiatru 2 m/s oraz 8 m/s. W odległości 5 km w linii prostej od emitora stężenie chloru wyniosło 2 ppm, o 11 ppm mniej niż w przypadku symulacji przeprowadzonej dla prędkości wiatru 2 m/s. Natomiast w punkcie 5 km w linii prostej i 500 metrów na linii równoległej do źródła emisji (czyli w skrajnym punkcie szerokości chmury chloru) stężenie wyniosło 0,23 ppm, a więc nieco ponad 10 % stężenia mierzonego w tej samej odległości i w linii prostej.



Rys. 8. Stężenie chloru w odległości 5 km od emitora dla warunków meteorologicznych letnich i prędkości wiatru: a) 2 m/s i b) 8 m/s.

Analiza wartości stężeń zanieczyszczeń w chmurze, w odległości 5 km od emitora pozwala stwierdzić, że ich wartości mieszczą się w przedziale od 0,02 ppm (prędkość wiatru 8 m/s – warunki zimowe) do 13 ppm (prędkość wiatru 2 m/s – warunki letnie).

Przeprowadzono również analizy zmieniając wartość współczynnika szorstkości aerodynamicznej. Przyjęto warunki meteorologiczne będące wartościami uśrednionymi dla Polski:

- prędkość wiatru 3,5 m/s,
- zachmurzeniu nieba na poziomie 60%,
- temperatury powietrza 8,7 °C,
- wilgotności powietrza na poziomie 80%.

Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Zasięg oddziaływania chloru dla poszczególnych klas AEGL i różnych wartości aerodynamicznego współczynnika szorstkości

Współczynnik szorstkości aerodynamicznej w cm	Zasięg oddziaływania chloru w km			
	AEGL-1	AEGL-2	AEGL-3	Szerokość maksymalna
0,008 (woda)	>10	>10	4,1	>2
2 (pastwiska)	>10	8,1	2,4	1,4
3,5 (pola uprawne)	>10	7,5	2,2	1,3
50 cm (zabudowa wiejska)	>10	6,4	1,8	1,2
200 cm (las)	>10	6,4	1,8	1,2

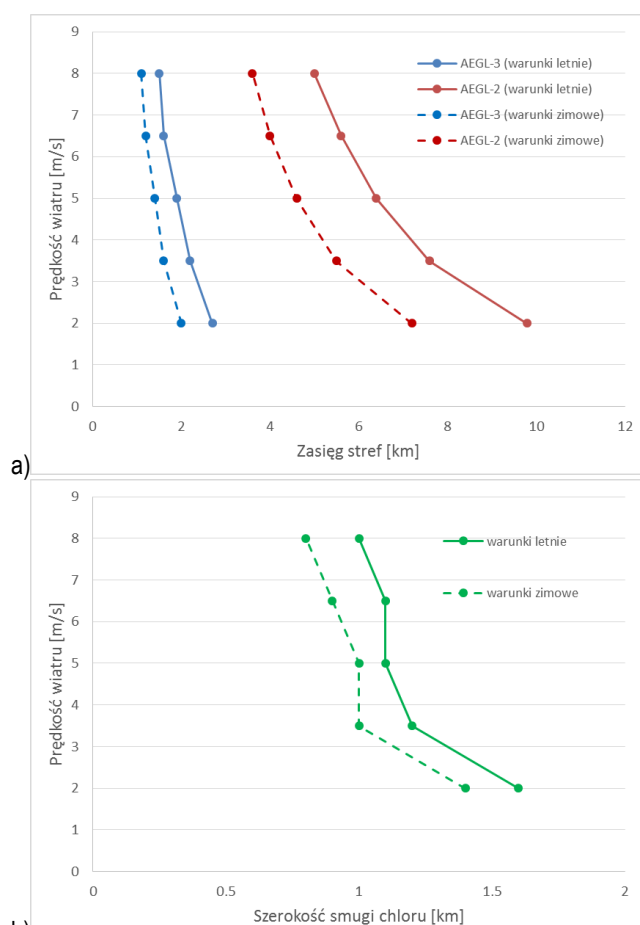
Na podstawie przeprowadzonych analiz wyników symulacji dla zmiennych wartości współczynnika szorstkości aerodynamicznej można stwierdzić, że zwiększenie jego wartości powyżej pół metra

nie wpływa na wielkość chmury stężeń. Wydaje się jednak, że takie wyniki są spowodowane ograniczeniami programu ALOHA, w którym zakłada się stałą szorstkość na całym analizowanym obszarze. Istotny jest również fakt, że wyniki podawano dla wysokości 3 m nad powierzchnią ziemi. W pracy [3] przedstawiono porównanie wyników symulacji przeprowadzonych w programie ALOHA oraz autorskim oprogramowaniu umożliwiającym uwzględnienie dokładnej mapy szorstkości aerodynamicznej i ukształtowania terenu. Analizy tych symulacji wskazały na znaczący wpływ tego parametru.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule wyniki symulacji pozwalają stwierdzić w jaki sposób parametry meteorologiczne wpływają na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń, a co za tym idzie zasięg stref, w których narażone jest zdrowie i życie ludzi.

Na wykresach 9 a) i b) przedstawiono zestawienie wartości zasięgu i szerokości stref AEGL-2 i AEGL-3 dla analizowanych przypadków.



Rys. 9. Zasięg stref AEGL-2 i AEGL-3 – a) oraz szerokości smugi – b) dla różnych prędkości wiatru.

Można stwierdzić, że chmura zanieczyszczeń chloru o śmiertelnym stężeniu może mieć zasięg prawie 3 km, a o stężeniu powodującym zmiany chorobowe, czy też uniemożliwiającym ewakuację ponad 10 km, przy niekorzystnych warunkach meteorologicznych (lato, prędkość wiatru 2 m/s). Szerokość stref nie jest podawana w programie, a jej szacunki są zgrubne, można jednak zauważyć, że oscyluje ona wokół 1 km. Obliczenia dla analogicznych przypadków przeprowadzone w programie autorskim pozwalają stwierdzić, że program ALOHA wyraźnie niedoszacowuje wartości szerokości smugi zanieczyszczeń, co może mieć istotne znaczenie podczas

planowania ewakuacji. Mimo to jest narzędzie powszechnie stosowane przez służby ratownictwa głównie Straży Pożarnej. Pozwala ono także na ocenę oddziaływania skutków poważnej awarii w transporcie drogowym.

Zagadnienie to jest szczególnie istotne z punktu widzenia zapobiegania i minimalizowania konsekwencji wypadków podczas przewozu substancji niebezpiecznych.

Zestawiając ze sobą wyniki wszystkich symulacji – zarówno tych, które przeprowadzone zostały dla różnych warunków pogodowych, sił wiatru jak i współczynników szorstkości aerodynamicznej można stwierdzić, że największy wpływ na propagację substancji niebezpiecznych mają warunki meteorologiczne, rozumiane jako zestaw parametrów typowych dla pory roku letniej bądź zimowej. Po porównaniu zasięgów stref AEGL-3 i AEGL-2 dla tych samych prędkości wiatru, ale odmiennych zestawów warunków pogodowych obliczono, że średnia różnica wynosi aż 1,21 km, podczas gdy średnia różnica pomiędzy zasięgami przy różnych prędkościach wiatru wyniosła 0,67 km. Zestawienie wyników symulacji przeprowadzonych dla różnych współczynników szorstkości aerodynamicznej pokazało, że czynnik ten ma znaczący wpływ wyłącznie na terenach o bardzo niskiej wartości współczynnika – wraz ze wzrostem tej wartości jego oddziaływanie maleje.

BIBLIOGRAFIA

1. Bochenek A, Klemm K., *Wyznaczanie korytarzy przewietrzających przy użyciu metody morfometrycznej dla wybranego fragmentu miasta Łodzi*, Budownictwo i Architektura, 2015/4: 139-151
2. Brzozowska L., *Modelowanie skutków uwolnień substancji niebezpiecznych w transporcie drogowym*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2015
3. Brzozowska L., *Computer simulation of impacts of a chlorine tanker truck accident*, Transportation Research Part D 43 (2016): 107–122
4. Juda J., Chróściel S., *Ochrona powietrza atmosferycznego: zgadnienia wybrane*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1980
5. Kopczeński R., Nowacki G., Zakrzewski B., *Zagrożenia chemiczne i ekologiczne podczas przewozu drogowego towarów niebezpiecznych*, Bezpieczeństwo i ekologia, 2017/9: 85:92
6. Kośmider J., *Uciążliwość zapachowa*, Wikibooks 2016
7. Matuzik M., *Obowiązki przedsiębiorstw w zakresie zapobiegania poważnym awariom przemysłowym*, Stowarzyszenie Pożarników Polskich, Brenna 2016
8. Razin P., Kruszewski M., Kamiński T., *Miejsca obsługi podróży w aspekcie przewozu towarów niebezpiecznych*, Autobusy 6/2016
9. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 26 stycznia 2010 r., w sprawie wartości odniesienia niektórych substancji w powietrzu, Dz. U. Nr 16, poz. 87
10. Rozporządzeniu Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 28 kwietnia 1998 r. w sprawie dopuszczalnych wartości stężeń substancji zanieczyszczających w powietrzu, Dz. U. 1988 nr 55 poz. 355
11. Rup K., *Procesy przenoszenia zanieczyszczeń w środowisku naturalnym*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2006
12. *Transport – wyniki działalności w 2013 r.*, Główny Urząd Statystyczny, 2014
13. Węsierski T., Majder-Łoparka M., *Wykolejenie się wagonów kolejowych z chlorem w Białymstoku, Analiza zdarzenia i możliwych scenariuszy*, Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza, 2012/2: 71-80

The influence of meteorological conditions on the effects of chlorine emission resulting from a road accident

In the article was presented the effect of meteorological conditions and aerodynamic roughness of the substrate on the dispersion of dangerous, highly toxic substance - chlorine. Simulations were carried out in the ALOHA program, assuming that as a result of an emergency, 10 tons of liquid chlorine from the tanker carrying it were leaked. It was assumed that the leakage time was one hour. The obtained results were placed on the map taking into account the assumed location: road E463 in Pszczyna. The degree of hazard are analyzed depending on the direction and speed of the wind. Additional simulations were performed taking other leakage points and other aerodynamic roughness.

The analysis of the results allows to determine the least favorable meteorological conditions from the point of view of the residents' safety.

Autorzy:

prof. ATH, dr hab. inż. **Lucyna Brzozowska** – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Zarządzania i Transportu, Katedra Modelowania Komputerowego, e-mail: lbrzozowska@ath.bielsko.pl

Monika Niesyto – studentka kierunku Transport na Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej

JEL: R41, Q01 DOI: 10.24136/atest.2018.038

Data zgłoszenia: 2018.05.17 Data akceptacji: 2018.06.15