

ROZPRZESTRZENIANIE SIĘ SKUTKÓW DUŻYCH KATASTROF KOLEJOWYCH¹

Eligiusz MIELOSZYK, Anita MILEWSKA, Sławomir GRULKOWSKI
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Przy ciągle rosnącej wielkości kolejowych przewozów towarowych z udziałem materiałów niebezpiecznych, coraz większego znaczenia nabiera bezpieczeństwo tych przewozów. W przypadku katastrofy należy minimalizować jej skutki. Jest to możliwe tylko wtedy, gdy zostanie rozpoznany mechanizm rozprzestrzeniania się skutków katastrofy z udziałem materiałów niebezpiecznych. Pomocne tu jest modelowanie tych zjawisk.

Słowa kluczowe: katastrofa kolejowa, materiały niebezpieczne, modelowanie.

1. WYBRANE KATASTROFY KOLEJOWE I ICH SKUTKI

Wśród rosnącego popytu na przewóz towarów koleją istotną grupę stanowią tzw. towary niebezpieczne. W Polsce w 2015 r. przewieziono koleją około 23 mln ton towarów niebezpiecznych, co stanowi aż 10% całego krajowego wolumenu kolejowych przewozów towarowych. Około 90% tych towarów to ropa i produkty ropopochodne (benzyny, oleje napędowe), gazy techniczne (głównie propan-butan) i kwas siarkowy. Ich udział w rynku kształtował się na poziomie 65%, zarówno pod względem przewiezionej masy, jak i wykonanej pracy przewozowej. W porównaniu do 2014 r. był to wzrost o 1,5% w masie i 0,7% w pracy przewozowej. Poza materiałami ciekłymi zapalnymi, największy udział w przewozie miały m.in. gazy (12,6% według masy i 10,2% według wykonanej pracy przewozowej), materiały żrące (odpowiednio 6,5% i 5,6%) oraz materiały stałe zapalne (2,4% i 2,7%). Skutkiem wzrostu ilości przewożonych ładunków niebezpiecznych jest zwiększone prawdopodobieństwo wystąpienia niebezpiecznych zdarzeń na torach kolejowych, zwiększone zagrożenie potencjalną katastrofą ekologiczną i społeczną oraz potencjalnie zwiększony zasięg zagrożenia (wzrasta również praca przewozowa w grupie ładunków niebezpiecznych) [11].

Katastrofy w transporcie kolejowym mają miejsce na skutek tzw. czynników ludzkich, czyli błędów powodowanych bezpośrednio przez człowieka (np. błędów z zakresu zarządzania ruchem kolejowym, błędów nieodpowiedniego zamknięcia zbiorników itp.). Drugą grupą czynników będących przyczyną zdarzeń są awarie

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.25.23

techniczne systemów (np. taboru lub infrastruktury). Trzecia grupa przyczyn to te niezależne od systemu kolejowego, ale wpływające na niezawodność funkcjonowania kolei lub mające miejsce na torach kolejowych (np. spadek cysterny z wiaduktu na teren kolejowy; rys. 1) [2].



Rys. 1. Upadek cysterny z wiaduktu przebiegającego nad torami kolejowymi (linia nr 201) samochodu – cysterny z 20t gazu propan-butan wprost na peron przystanku Podleś w dniu 14.07.2008 r. [Komenda Wojewódzka Policji – Gdańsk]

Z punktu widzenia kolei rozróżnia się dwa rodzaje katastrof: wykolejenia i kolizje, a skutkiem zdarzenia jest zawsze zagrożenie dla człowieka i środowiska. Do rozważenia pozostaje skala i zasięg zagrożenia [7].

Według raportów Urzędu Transportu Kolejowego co roku w Polsce ma miejsce kilkadziesiąt zdarzeń z udziałem ładunków niebezpiecznych. W przeszłości także dochodziło do poważnych zdarzeń z udziałem materiałów niebezpiecznych. W 1968 roku w pobliżu Jackowic doszło do katastrofy kolejowej, w wyniku której nastąpiło wybite w dennicy jednej z cystern otworu wielkości zderzaka kolejowego. W wyniku zdarzenia śmiertelnemu zatruciu uległo kilka osób. Dwie największe w Polsce katastrofy kolejowe w czasie przewozu materiałów niebezpiecznych miały miejsce w węźle białostockim. 9 marca 1989 r. około godz. 2:30 na odcinku Białystok Fabryczna – Białystok Główny wykoleił się pociąg tranzytowy Jadący z ZSRR do zakładów "Buna Werke" (NRD). W jego skład wchodziły 32 wagony, z których 6 stanowiły cysterny o pojemności 46 m³ zawierające skroplony chlor. W wyniku zdarzenia 3 cysterny zawierające skroplony chlor wykoleiły się, z czego dwie stoczyły się z nasypu (rys. 2). Całkowicie została zniszczona nawierzchnia kolejowa na odcinku

ok. 120 metrów. Przyczyną zdarzenia okazała się pęknięta szyna. Wagony szczęśliwie wstawiono na tory. Gdyby doszło do rozszczelnienia przynajmniej jednej cysterne z chlorem, życie biologiczne w promieniu od kilku do kilkunastu kilometrów nie byłoby możliwe [15].



Rys. 2. Wstawianie radzieckich wagonów cystern na tory po wykolejeniu 9 marca 1989 r. w Białymstoku [Państwowa Straż Pożarna w Białymstoku]

Z kolei 8 listopada 2010 roku około godziny 5:30 na stacji Białystok w rejonie zakładu PKP Energetyka zderzyły się ze sobą pociąg towarowy Orlen KolTrans relacji Płock Trzepowo – Sokółka i pociąg towarowy PKP Cargo relacji Białystok – Warszawa Praga. W składzie pociągu Orlen KolTrans znajdowały się 32 wagony cysterny wypełnione paliwem ciekłym, a w składzie pociągu PKP Cargo – 2 wagony cysterny z gazem propan-butan i 5 węglarek załadowanych złomem.

Na skutek zderzenia doszło do wykolejenia pociągu spółki Orlen KolTrans, a następnie zapalenia się lokomotywy, rozszczelnienia i wybuchu jednego z wagonów cystern z paliwem. Eksplozja wywołała pożar, który objął drugą lokomotywę pociągu oraz 17 z 32 wagonów z ciekłym paliwem. Około 07:20 eksplodował drugi z wagonów cystern. Pożar rozprzestrzenił się na infrastrukturę kolejową, nastawnię wykonawczą i sąsiadujące z linią kolejową budynki PKP Energetyka. Pożar dogaszono dopiero około godziny 1:00 dnia następnego (rys. 3). Wskutek zdarzenia ranne zostały 3 osoby (pracownicy kolei i ratownicy). Doszło do uszkodzenia infrastruktury kolejowej stacji Białystok (torów, sieci trakcyjnej i nastawni wykonawczej); zniszczenia 17 wagonów z olejem napędowym i benzyną; zniszczenia 2 lokomotyw spółki Orlen KolTrans.



Rys. 3. Skutki katastrofy w Białymstoku z 8 listopada 2010 roku [TVN24]

Najbardziej niebezpieczne pozostają zdarzenia, gdy udział biorą pociągi z pasażerami. W środę 30 sierpnia 2017 r. wieczorem na stacji Smętowo doszło do nieuprawnionego wjazdu pociągu towarowego spółki STK na tor główny zasadniczy nr 2, po którym poruszał się pociąg pasażerski Intercity relacji Gdynia Główna (- Bielsko Biała) - Zakopane. Po gwałtownym hamowaniu i zderzeniu z pociągiem towarowym wykoł się pociąg pasażerski. Poszkodowanych zostało co najmniej 28 osób. Na szczęście dodatkowo nie doszło do poważnych w skutkach uszkodzeń składu towarowego.

Podane wybrane przykłady katastrof kolejowych pokazują, jak duże mogą być negatywne ich skutki. Z tego wynika, że należy dążyć do sytuacji bez katastrof (tzw. opcja zerowa). Jednak, jeżeli już wydarzy się katastrofa, wtedy należy minimalizować jej skutki. Jest to możliwe tylko wtedy, jeżeli będą znane właściwości i przebieg zjawisk towarzyszących tym katastrofom kolejowym.

2. PROCESY TOWARZYSZĄCE KATASTROFOM KOLEJOWYM

Katastrofa jest procesem dynamicznym, który szczególnie w początkowej fazie jest niesterowalny i należy dążyć do tego, aby w jak najkrótszym czasie możliwe było przejście do sterowania tym procesem, ponieważ wówczas można ograniczyć skutki katastrofy [9].

„Dużej” katastrofie kolejowej często towarzyszy:

- wyciek materiałów ropopochodnych z (wykolejonych) cystern – bez pożaru,
- wyciek materiałów ropopochodnych z (wykolejonych) cystern połączony z pożarem,
- wyciek innych materiałów niebezpiecznych (np. chlor), itp.



W przypadku katastrofy z udziałem cystem z substancjami niebezpiecznymi i w przypadku ich rozszczelnienia rozprzestrzenia się skażenie (zanieczyszczenie) w powietrzu i gruncie – w jego wodach podziemnych oraz w przypadku katastrofy w pobliżu zbiornika wodnego – także w wodzie i wodach powierzchniowych. Skażenie wód gruntowych ze strefy nienasyconej (wód glebowych, wód błonkowych, wód kapilarnych) i wody gruntowej zasadniczej ze strefy nasyconej oraz wód z przepływem otwartym (ze swobodną powierzchnią) jest niebezpieczne z punktu widzenia zagrożeń dla środowiska naturalnego [13].

W każdym z tych przypadków ma także miejsce emisja oparów mających negatywny wpływ na drogi oddechowe oraz skórę szczególnie tych osób, które znajdują się w rejonie katastrofy, a głównie osób biorących udział w akcji ratowniczej. Są to między innymi składniki niskolotne oraz lotne związki organiczne, których zasięg oddziaływania na środowisko i bezpośrednio na stan aerosanitarny jest duży, podobnie jak w przypadku emisji oparów asfaltu przy budowie dróg [12], a ta emisja wynosi w przypadku lotnych związków organicznych $0,1-2,0 \text{ mg/m}^3$ [3].

Stosowanie modeli wielowymiarowych lub nieliniowych do opisu tego zjawiska [4, 10] często nie jest konieczne, bowiem nawet w przypadku dyfuzji pionowej (rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu w pionie – pionowa wymiana zanieczyszczeń) wystarczy jak w [8] uwzględnić warstwową zasadę rozchodzenia się zanieczyszczeń, polegającą na wykorzystaniu szacunkowej ilości zanieczyszczeń i -tej warstwy o grubości h_i , przenikających do warstwy sąsiedniej. W przypadku rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze konieczna jest aproksymacja pola wiatru.

Cząstki dowolnego ośrodka (stałego, ciekłego, gazowego) znajdują się w ciągłym przypadkowym ruchu, którego intensywność jest określona przez temperaturę danego ośrodka. W wyniku tego ruchu zachodzi wymiana molekuł między sąsiednimi warstwami ośrodka, wywołując zjawisko przenoszenia zwane przeniesieniem dyfuzyjnym, często krótko zwanym dyfuzją. Jeżeli warstwy mają różną temperaturę, wymiana powoduje przenoszenie ciepła. Jeżeli są one w ruchu z różnymi prędkościami średnimi, występuje przenoszenie pędu. Jeżeli z kolei mamy do czynienia z ośrodkiem ciekłym z domieszkami (np. z zanieczyszczeniami), to różnica w koncentracji domieszki w sąsiadujących warstwach cieczy (w tym przypadku głównie wody) powoduje przenoszenie masy. Wartości poszczególnych wielkości są wprost proporcjonalne do odpowiednich gradientów przestrzennych temperatury lub koncentracji. Współczynniki przepływu zależą od właściwości ośrodka, a ich zależność od temperatury, ciśnienia i koncentracji określa się na ogół eksperymentalnie. Z kolei podstawowym równaniem opisującym przenoszenie energii cieplnej jest równanie Fouriera. Przy założeniu jednowymiarowego przepływu przyjmuje ono formę analogiczną do równania dyfuzji, czyli w modelowaniu matematycznym opisywane są one analogicznymi formułami z wykorzystaniem równań różniczkowych typu parabolicznego. W ogólnym przypadku, matematyczna postać modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń jest połączeniem (równoległym lub łańcuchowym) opisu poszczególnych procesów składowych, wśród których istotny jest proces dyfuzji.

Jednowymiarowe jednorodne równanie dyfuzji:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (1)$$

gdzie D jest współczynnikiem dyfuzji, u oznacza stężenie składnika podlegającego dyfuzji w miejscu x w chwili t , odpowiada jednorodnemu równaniu przewodnictwa cieplnego:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial u}{\partial x} \right) = c \rho \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (2)$$

gdzie: k jest współczynnikiem przewodnictwa cieplnego, c – ciepłem właściwym ciała, ρ – gęstością, natomiast u – temperaturą ciała w miejscu x w chwili t .

Zatem w przypadku pożaru towarzyszącego katastrofie kolejowej funkcję $u(x, t)$ można potraktować jako przedstawienie rozchodzenia się temperatury w szynach, czy innych elementach konstrukcji infrastruktury kolejowej lub taboru.

Wynika stąd, że procesy dyfuzji i przewodnictwa cieplnego przebiegają analogicznie. Jeden z nich może być modelowany za pomocą drugiego i wystarczy skupić się na jednym z nich przy analizie rozprzestrzeniania się negatywnych zjawisk towarzyszących katastrofom kolejowym, a co istotne, są to zawsze szczególnie przypadki uogólnionych układów dynamicznych, w których $S = \frac{\partial}{\partial t}$, natomiast endomorfizm A

jest odpowiednio postaci $\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial u}{\partial x} \right)$ lub $\frac{1}{c \rho} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial u}{\partial x} \right)$.

Aby w modelu wykorzystać wpływ źródła, do danego równania różniczkowego cząstkowego należy dołączyć funkcję $f(x, t)$ charakteryzującą (opisującą) źródło dyfundującej substancji bądź źródło ciepła, zwaną też członem źródłowym. Prowadzi to wówczas do równania różniczkowego cząstkowego niejednorodnego [1, 5, 6, 14, 16]. O wykorzystaniu jego w modelowaniu zjawiska rozchodzenia się skutków katastrof kolejowych zdecydowały właściwości rozwiązań wspomnianych równań. Powstały (wytworzony) w chwili początkowej $t = 0$ efekt katastrofy rozchodzi się w środowisku (w gruncie, w wodzie, w powietrzu) podobnie jak ciepło w materiale (rozgrzane szyny) zgodnie z przyjętymi modelami (1), (2), a właściwie – ze względu na pewną równoważność między nimi – zgodnie z jednym z nich. Należy zauważyć, że wspomniane już równanie (1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial u}{\partial t}, D = const$$

z warunkiem początkowym:

$$u(x, 0) = \varphi(x), \quad (3)$$



może być zaadaptowane do potrzeb problemu, bowiem wystarczy przyjąć, że teraz D oznacza stały współczynnik dyfuzji lub $D = \frac{k}{c\varphi} \text{const}$, ponadto $\varphi(x)$ jest wielkością charakteryzującą początkową fazę katastrofy, wygenerowaną w chwili $t=0$, a $u(x, t)$ oznacza rozprzestrzenianie się wybranego zjawiska towarzyszącego katastrofie (w chwili t w punkcie x), gdy problem traktowany jest jako jednowymiarowy. Z tego wynika, że musi być poszukiwana funkcja jako rozwiązanie ostatniego problemu początkowego (1), (3) lub (2), (3). Taka funkcja, zgodnie z [1], określona jest wzorem:

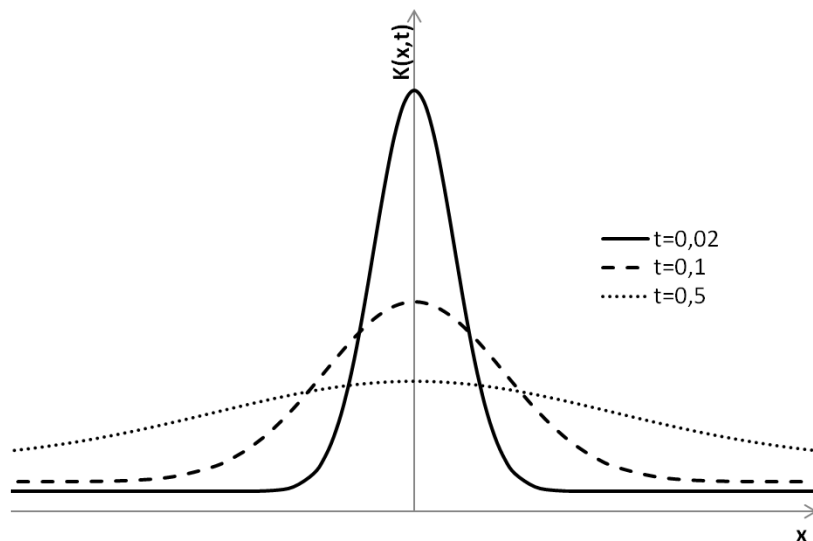
$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\xi) K(x - \xi, t) d\xi, \quad (4)$$

gdzie:

$$K(z, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{z^2}{4Dt}\right). \quad (5)$$

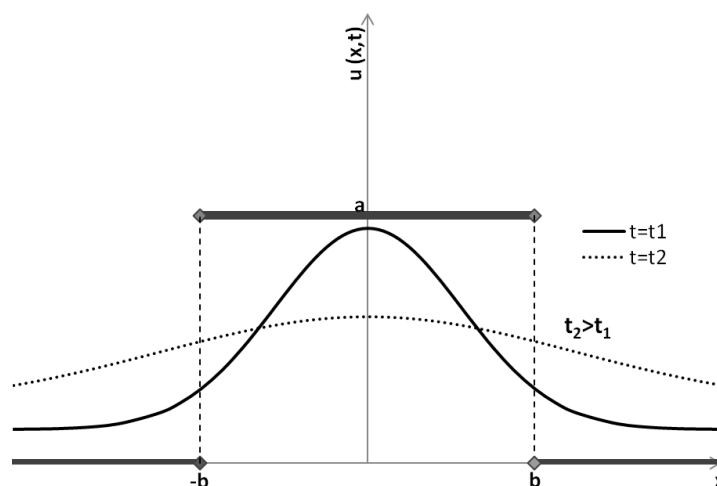
Biorąc pod uwagę cele analizy należy zauważyć, że:

- Rozwiązanie $u(x, t)$ jest niezerowe w każdym punkcie obszaru $\mathbb{R} \times \mathbb{R}_+$ natychmiast po rozpoczęciu procesu, ponieważ występująca we wzorze na $u(x, t)$ funkcja $K(x, t)$ (rys. 4) jest dodatnia ($\varphi(x) > 0$). Jest to ważny fakt z punktu widzenia modelowania, ponieważ świadczy o szybkim rozprzestrzenianiu się katastrofy i pokazuje kierunki przeciwdziałania jej rozprzestrzenianiu się.



Rys. 4. Rozprzestrzenianie się zjawiska w czasie przy gwałtownym jego pojawieniu się w chwili początkowej w postaci dystrybucji Diraca $\delta(x)$

- Funkcja $K(x,t)$ jest też rozwiązaniem równania dyfuzji, czyli opisuje rozwój zjawiska w zależności od x i t dla bardzo niegładkiego warunku początkowego, czyli dla $\varphi(x) = \delta(x)$ – dystrybucja Diraca, czyli dla bardzo „gwałtownego” pojawienia się zjawiska towarzyszącego katastrofom w chwili $t = 0$ (rys. 4).
- Zjawiska towarzyszące katastrofom opisywane funkcjami $u(x,t)$ w praktyce są funkcjami gładkimi w czasie t , co pokazują modele i rzeczywiście funkcja $K(x,t)$ jest także funkcją nieskończenie gładką dla $t > 0$ przypominającą dla ustalonego t krzywą Gaussa symetryczną względem zera, dążącą do zera przy zwiększeniu czasu do nieskończoności, tzn. że zjawisko towarzyszące katastrofie z czasem zanika, aż w ostateczności zniknie (rys. 4).
- Dane początkowe (warunki początkowe) są wygładzane nawet w przypadku bardzo nieregularnym, kiedy warunek (3) odpowiadający za gwałtowny („wybuchowy”) początek procesu niekorzystnego zjawiska jest np. impulsem prostokątnym o długości $2b$ i wysokości a albo impulsem trójkątnym, więc proces zawsze dąży do stanu możliwie najbardziej gładkiego, tzn. z czasem jego gwałtowność zanika; zanika po bardzo krótkim czasie (rys. 5).



Rys. 5. Idea wygładzania zjawiska w czasie przy gwałtownym jego pojawieniu się w chwili początkowej w postaci impulsu prostokątnego

- Tutaj też zjawiska towarzyszące katastrofom rozprzestrzeniają się od punktów (od miejsc), w których ich efekt jest duży, do punktów (do miejsc), w których jest on mniejszy.

3. PODSUMOWANIE

Ilość kolejowych przewozów towarowych z udziałem materiałów niebezpiecznych ciągle rośnie. W wyniku katastrof z udziałem materiałów niebezpiecznych może dochodzić np. do pożarów, do skażenia powietrza, gruntu, wody. Katastrofy z udziałem materiałów niebezpiecznych są przyczyną wielu nieszczęść, śmiertelnych zatruc, poparzeń itp. W przypadku katastrofy należy minimalizować jej negatywne skutki. Znajomość właściwości i przebiegu zjawisk towarzyszących katastrofom kolejowym są pomocne przy ograniczaniu ich skutków. Właściwości zjawisk towarzyszących analizowanym katastrofom dobrze oddają ich modele matematyczne.

LITERATURA

- [1] Bicadze A. W., *Równania fizyki matematycznej*, PWN, 1984.
- [2] Borysiewicz M., Kacprzyk W., *Oceny ryzyka w transporcie kolejowym materiałów niebezpiecznych. Cz. II – modele obliczeniowe. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, nr 54, 2012, 59-85.
- [3] Burstyn I., Kromhout H., Johansen C., Langard S., Kauppinen T., Shaham J., Ferro G., Boffetta P., *Bladder cancer incidence and exposure to polycyclic hydrocarbons among asphalt pavers*, *Occup Environ Med.*, 2007, 64(8), 520–526.
- [4] Edwards R., *Functional analysis. Theory and applications*, New York, 1965.
- [5] Evans L. C., *Partial Differential Equations*, American Mathematical Society, 1998 (PWN, 2002).
- [6] Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M., *Feynmana wykłady z fizyki*, PWN, 2001.
- [7] Gheorghe A.V., Birchmeier J., Vamanu D., Papazoglou I., Kröger W.: *Comprehensive risk assessment for rail transportation of dangerous goods: a validated platform for decision support*, *Reliability Engineering and System Safety*, 88 (2005), 247–272.
- [8] Holnicki P., Kałuszko A., Zochowski A.: *A microcomputer implementation of air quality forecasting system for urban scale*. *Microcomputer Applications*, 13, No. 2, 1994, str. 76 – 84.
- [9] Mieloszyk E., *Nieklasyczny rachunek operatorów w zastosowaniu do uogólnionych układów dynamicznych*. Wydawnictwo PAN, Gdańsk 2008.
- [10] Milewska A., *A solution of non-linear differential problem with application to selected geotechnical problems*, *Archives of Civil Engineering*. 1230-2945. Vol. 57, iss. 2 (2011), s. 187-197.
- [11] Raporty Urzędu Transportu Kolejowego www.utk.gov.pl.
- [12] Roskam G. D., Comans R. N. J. : *Availability and leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons: Controlling processes and comparison of testing methods*. *Waste Management (Elsevier)*, 2009, Vol.29, p.136-142.
- [13] Świdziński W., Mierczyński J.: *Badania laboratoryjne zjawiska podatności cyklicznej w nawodnionym gruncie niespoistym*. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, R. 30, Nr 4, 2009, s. 271-280.
- [14] Tihonow A. N., Samarski A. A., *Równania fizyki matematycznej*, PWN, 1963.
- [15] Węsierski T., Majder-Łopatka M.: *Wykolejenie się wagonów kolejowych z chlorem w Białymstoku. Analiza zdarzenia i możliwych scenariuszy*. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*, Vol. 26 Issue 2, 2012, 71-80.



[16] Zwillinger D., Handbook of Differential Equations, Academic Press, 1984.

PROPAGATION OF THE EFFECTS OF LARGE RAILWAY ACCIDENTS

Summary

The safety of freight rail transportation has become an important issue due to the constantly growing amounts of transported goods including hazardous materials. In the case of a freight train accident, the effects of such an event can be minimized if the propagation mechanisms of the effects are carefully studied by modelling.

Keywords: rail accident, hazardous materials, modelling.

Dane autorów:

Prof. dr hab. inż. Eligiusz Mieloszyk
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Transportu Szynowego i Mostów
e-mail: emieloszyk@mif.pg.gda.pl
telefon: +48 347 10 26

Dr Anita Milewska
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Transportu Szynowego i Mostów
e-mail: anita.milewska@wilis.pg.gda.pl
telefon: +48 58 437 1838

Dr inż. Sławomir Grulkowski
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Transportu Szynowego i Mostów
e-mail: slawi@pg.gda.pl
telefon: +48 58 348 6089