

# Запобігання та ліквідація надзвичайних ситуацій

УДК 656.21 : 657.073.436 : 629.4

В.К. Мироненко<sup>1</sup>, М.Д. Кацман<sup>2</sup>, М.М. Горбаха<sup>1</sup>, В.І. Мацюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Державний економіко-технологічний університет транспорту, Київ

<sup>2</sup> Південно-Західна залізниця, Київ

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СТАНІВ ТА НАДІЙНОСТІ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ

Вперше формалізовано систему залізничних перевезень небезпечних вантажів у вигляді орієнтованого графу станів: безпечного функціонування системи, настання надзвичайної ситуації, її оцінювання, локалізації та ліквідації її наслідків, а також повернення системи у вихідний стан; запропоновані математичні моделі ймовірності перебування системи у стані безпечного функціонування в залежності від застосування різних технологічних та організаційних заходів підтримання системи у стані надійності.

**Ключові слова:** математична модель, ліквідація надзвичайної ситуації, небезпечні вантажі, залізничні перевезення, ліквідаційні заходи.

### Українсько-англійський глосарій позначень, що використовуються в моделі

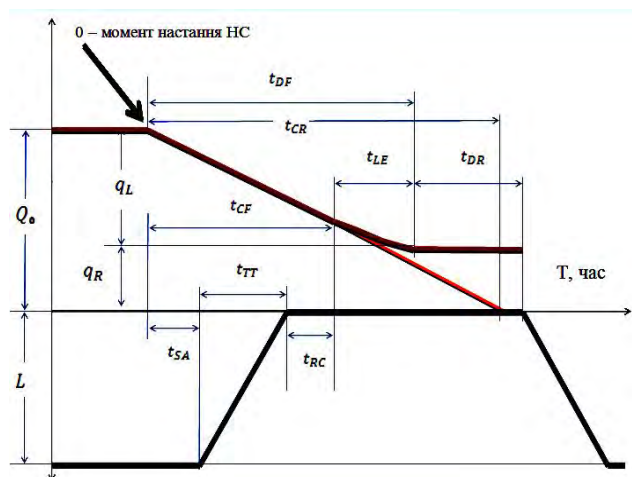
$t_{CR}$  – критичний час (critical time);  
 $t_{LE}$  – локалізація надзвичайної ситуації (localization of emergency);  
 $t_{DR}$  – ліквідація наслідків надзвичайної ситуації (disaster relief);  
 $t_{CF}$  – зосередження сил та засобів (concentration of forces and means);  
 $t_{SA}$  – оцінка ситуації (situation assessment);  
 $t_{RC}$  – розвідка місцевості (reconnaissance);  
 $t_{TT}$  – час ходу, руху (travel time);  
 $L$  – відстань (distance);  
 $V$  – швидкість (velocity);  
 $Q_0$  – початкова вага вантажу (initial cargo weight);  
 $q_L$  – втрата вантажу (cargo loss);  
 $q_R$  – залишки вантажу (cargo residues).

### Вступ

Надійність залізничної транспортної системи при перевезеннях небезпечних вантажів слід розуміти як її здатність у визначені терміни часу із заданою ймовірністю відновлювати своє безпечне функціонування після надзвичайних ситуацій, що супроводжуються дією небезпечних факторів, шкідливих для людей, довкілля, вантажів та об'єктів залізничного транспорту. До таких надзвичайних ситуацій відносяться вибухи, пожежі, розсипання твердих, витoki рідких і викиди в атмосферу газоподібних небезпечних речовин, що перевозяться залізничним транспортом.

Дослідженню проблем безпеки та надійності таких перевезень присвячено чимало наукових праць, зокрема й роботи авторів [1 – 4], у яких розглядалися відповідні теоретичні моделі та окремі практичні аспекти цих проблем.

У даній статті пропонується, продовжуючи застосовані раніше теоретичні підходи, підійти до більш практичного, на рівні інженерних розрахунків, використання отриманих авторами результатів. Для розуміння цих результатів нижче наводиться необхідний глосарій. На рис. 1 наведена графічна модель функціонування і станів транспортної системи при перевезеннях небезпечних вантажів, яка в подальшому використовується для побудови відповідних математичних моделей.



### Умовні позначення

$t_{SA}$  – час оцінки інформації і прийняття рішення;  $t_{TT}$  – час руху до місця НС;  $t_{RC}$  – час розвідки на місці НС і уточнення рішення;  $t_{CF}$  – час зосередження сил та засобів для ліквідації НС;  $t_{LE}$  – час локалізації НС;  $t_{DR}$  – час ліквідації наслідків НС;  $t_{DF}$  – час припинення дії небезпечних факторів НС.

Рис. 1. Графічна модель функціонування і станів транспортної системи при перевезеннях небезпечних вантажів

Поняття «критичний час» було введено раніше [2], і він являє собою час, протягом якого відбудеться повна втрата вантажу за умови, що не буде вживатися ніяких ліквідаційних заходів згідно із регламентами (алгоритмами дій), встановленими відповідно до чинних нормативних документів.

### Стани транспортної системи при перевезеннях небезпечних вантажів

$S_1$  – стан безпечного функціонування системи (safe system), перед настанням НС, тривалістю  $t_{SS}$ ;

$S_2$  – стан дії небезпечних факторів надзвичайної ситуації тривалістю  $t_{DF}$ , який закінчується, коли зникає «джерело» потоку небезпечних факторів (наприклад, весь вантаж згорає ще до того, як встигають прибути сили та засоби ліквідації НС, тобто час зосередження цих сил та засобів  $t_{CF}$  більше за «критичний час»  $t_{CR}$  для даної НС, що відповідає умові  $0 < t_{CR} \leq t_{CF}$ ) або коли до того, як закінчився «критичний час», прибули необхідні сили та засоби і починається локалізація надзвичайної ситуації,  $0 < t_{CF} < t_{CR}$ ; з рис. 1 видно, що

$$t_{CF} = t_{CA} + t_{TT} + t_{RC} = t_{SA} + L/V + t_{RC};$$

$S_3$  – стан локалізації надзвичайної ситуації тривалістю  $t_{LE}$ , яка залежить від того, роботи якої тривалості належить виконати спочатку для припинення втрат вантажу (тривалість  $t_{SL}$ ), а потім для рятування залишків вантажу, якщо він частково був втрачений (тривалість  $t_{QCR}$ ), тобто

$$t_{LE} = t_{SL} + t_{QCR};$$

$S_4$  – стан ліквідації наслідків надзвичайної ситуації тривалістю  $t_{DR}$ , яка залежить від того, якої тривалості роботи належить для цього виконати.

Описані стани та напрямки можливих переходів системи між ними представлені на рис. 2.

Система рівнянь фінальних ймовірностей станів системи  $p_i$ , складених як рівняння балансу інтенсивностей вхідних та вихідних потоків подій  $\lambda_{ij}$ , що зумовлюють зміну станів транспортної системи, має такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{12}p_1 &= \lambda_{41}p_4; \\ (\lambda_{23} + \lambda_{24})p_2 &= \lambda_{12}p_1; \\ \lambda_{34}p_3 &= \lambda_{23}p_2; \\ \lambda_{41}p_4 &= \lambda_{24}p_2 + \lambda_{34}p_3; \\ p_1 + p_2 + p_3 + p_4 &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В останнє рівняння системи (1) замість ймовірностей  $p_2, p_3$  та  $p_4$  підставимо їх вирази через ймовірність  $p_1$  та інтенсивності відповідних потоків подій  $\lambda_{ij}$ , що містяться у перших чотирьох рівняннях системи (1). Отримаємо рівняння (2):

$$p_1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{22} + \lambda_{24}}p_1 + \frac{\lambda_{22}}{\lambda_{24}} \cdot \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{22} + \lambda_{24}}p_1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{41}}p_1 = 1. \quad (2)$$

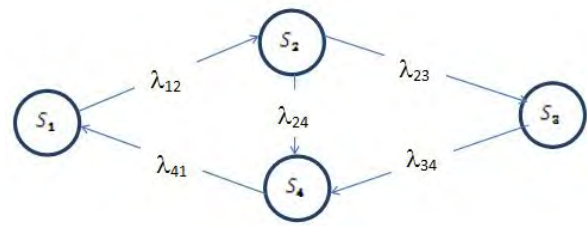


Рис. 2. Граф станів транспортної системи при перевезенні небезпечних вантажів, що може супроводжуватися транспортними подіями і надзвичайними ситуаціями

Інтенсивності відповідних потоків подій  $\lambda_{ij}$  слід виразити через введені вище технологічні часові параметри моделі, наведеної на рис. 1:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{t_{SS}}; \quad (3)$$

$$\lambda_{23} = \frac{1}{t_{CF}} = \frac{1}{t_{SA} + t_{TT} + t_{RC}} = \frac{1}{t_{SA} + L/V + t_{RC}}; \quad (4)$$

$$\lambda_{24} = \frac{1}{t_{CR} + t_{CF}}; \quad (5)$$

$$\lambda_{34} = \frac{1}{t_{LE}} = \frac{1}{t_{SL} + t_{QCR}}; \quad (6)$$

$$\lambda_{41} = \frac{1}{t_{DR}}. \quad (7)$$

З рівняння (2) легко знайти його корінь  $p_1$ , а підставивши значення  $\lambda_{ij}$  з формул (3) – (7), отримаємо формулу (8), за якою можна розрахувати ймовірність безпечного та надійного функціонування транспортної системи  $p_{SS}$  (протягом якого не відбувається надзвичайних ситуацій за час  $t_{SS}$ , а їх наслідки локалізуються та ліквідуються за час  $t_{SL} + t_{QCR} + t_{DR}$ ):

$$p_{SS} = p_1 = \frac{t_{SS}}{t_{SS} + \frac{t_{CR} + t_{CF}}{t_{CR} + 2t_{CF}}(t_{CF} + t_{LE}) + t_{DR}}. \quad (8)$$

Проведений аналіз формули (8) свідчить, що вона вірно відображає характер впливу усіх змінних, які до неї входять, на величину  $p_1$ .

До формули (8) входить комплекс величин  $(t_{CR} + t_{CF}) / (t_{CR} + 2t_{CF})$ , який, на нашу думку, потребує окремого аналізу, адже він містить дві величини, одна з яких є повністю незалежна від волі суб'єкта транспортної системи ( $t_{CR}$ ), а друга може бути ними цілеспрямовано змінена ( $t_{CF}$ ), причому обидві вони можуть впливати на надійність системи. Цей аналіз виконано за допомогою розрахунків, результати яких наведені у табл. 1 та на рис. 3.

З табл. 1 та рис. 3 видно, що при нульових значеннях обох змінних ( $t_{CR}$  та  $t_{CF}$ ) функція є невизначеною (ділення на 0). Звертає на себе увагу те, що при  $t_{CR} = 0$  та будь-яких значеннях тривалості зосередження ліквідаційних сил та засобів  $t_{CF} > 0$  (практично – це миттєва втрата вантажу, наприклад, внаслідок

вибуху чи пожежі, що закінчилися значно швидше, ніж прибули ліквідаційні сили та засоби) величина комплексу  $(t_{CR} + t_{CF}) / (t_{CR} + 2t_{CF})$  завжди дорівнює 0,5. Таке сполучення змінних ( $t_{CR} = 0$  та  $t_{CF} > 0$ ), що може відповідати певним реальним ситуаціям, назовемо випадком «нетерплячого вантажу», тобто такого, який за своїми фізико-хімічними властивостями має на місці надзвичайної ситуації дуже короткий час перебування у незмінному стані.

Таблиця 1

Аналіз комплексу величин  $(t_{CR} + t_{CF}) / (t_{CR} + 2t_{CF})$ , що впливає на надійність транспортної системи

$t_{CR}$ , год.	$t_{CF}$ , год.					
	0	0,5	1	1,5	2	2,5
0	#ДЕЛ/0!	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,5000
0,5	1,0000	0,6667	0,6000	0,5714	0,5556	0,5455
1	1,0000	0,7500	0,6667	0,6250	0,6000	0,5833
1,5	1,0000	0,8000	0,7143	0,6667	0,6364	0,6154
2	1,0000	0,8333	0,7500	0,7000	0,6667	0,6429
2,5	1,0000	0,8571	0,7778	0,7273	0,6923	0,6667

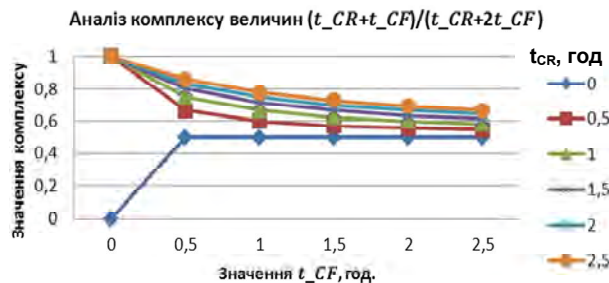


Рис. 3. Аналіз комплексу величин  $(t_{CR} + t_{CF}) / (t_{CR} + 2t_{CF})$ , що впливає на надійність транспортної системи

Натомість протилежну ситуацію, коли  $t_{CR} = 0$ , а  $t_{CF} = 0$ , тобто коли ліквідаційні сили та засоби прибувають миттєво, назовемо ситуацією «швидкої допомоги» і відзначимо, що в цьому випадку величина комплексу  $(t_{CR} + t_{CF}) / (t_{CR} + 2t_{CF})$  завжди дорівнює 1. Таким чином, для випадку «нетерплячий вантаж» маємо формулу

$$p_1 = t_{SS} / (t_{SS} + (t_{CF} + t_{LE}) / 2 + t_{DR}), \quad (9)$$

а для випадку «швидка допомога» – формулу

$$p_1 = t_{SS} / (t_{SS} + t_{LE} + t_{DR}). \quad (10)$$

Очевидно, що ці два крайні випадки в реальному світі в чистому виді не трапляються, а формула (8) по суті є інтерполяцією між ними, що враховує ненульові додатні значення ( $t_{CR} > 0$  та  $t_{CF} > 0$ )

Щоб зробити формулу (8) більш придатною для практичних технологічних (а згодом й економічних) розрахунків, застосуємо наступні допоміжні формули:

$$t_{CF} = t_{SA} + t_{TT} + t_{RC} = t_{SA} + L/V + t_{RC}, \quad (11)$$

де усі складові визначені вище (рис. 1а пояснення до нього);

$$t_{LE} = t_{RC} + D_{LE} / \mu_{LE}, \quad (12)$$

де  $\mu_{LE}$  – продуктивність робіт, які проводяться під час локалізації надзвичайної ситуації, у тому числі для збереження залишків вантажу, у кількості  $D_{LE}$ , яка вимірюється у тих же величинах, що  $D_{LE}$ , за одиницю часу (наприклад, у якості  $\mu_{LE}$  може використовуватися продуктивність насосів, тонн чи кубічних метрів за годину для перекачування залишку вантажу, тонн чи кубічних метрів рідкої небезпечної речовини із пошкодженої цистерни у резервну, або продуктивність екскаваторів при виконанні земляних робіт);

$$t_{DR} = D_{DR} / \mu_{DR}, \quad (13)$$

де  $D_{DR}$  – обсяг робіт, що їх необхідно виконати для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації (наприклад, зняття та вивезення верхнього шару ґрунту, просоченого небезпечною рідиною), у тоннах, кубічних, квадратних метрах або інших одиницях виміру;  $\mu_{DR}$  – продуктивність виконання робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, у тих же одиницях виміру за одиницю часу.

Очевидно, що величини  $\mu_{LE}$  та  $\mu_{DR}$ , які використовуються у формулах (10) та (11), залежать від тактико-технічних характеристик сил та засобів, що використовуються для локалізації та ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, тому за величиною  $p_{SS} = p_1$ , отриманою за формулою (8), можна оцінити ефективність застосування цих сил та засобів.

Аналізуючи формулу (9), бачимо, що до неї входить комплекс змінних  $t_{SA} + L/V + t_{RC}$  (рис. 1 та пояснення до нього), на які можна цілеспрямовано впливати технічними, технологічними та організаційними засобами і завдяки цьому збільшувати величину ймовірності  $p_{SS} = p_1$  перебування транспортної системи у стані безпечного функціонування. Наприклад, величини  $t_{SA}$  та  $t_{RC}$  можна суттєво скоротити, застосувавши для оцінювання, розвідки та моніторингу обстановки на місці надзвичайної ситуації безпілотні літальні апарати. Шляхом раціональної дислокації ліквідаційних сил та засобів (пожежно-рятувальних та інших поїздів), їх модернізації та підвищення швидкостей можна зменшити час ходу  $t_{TT} = L/V$ .

Проте на багато величин, що входять до розрахункових формул, немає можливості вплинути, їх можна лише враховувати як зовнішні, незалежні чинники. Зокрема, «критичний час»  $t_{CR}$  залежить від властивостей небезпечної речовини, характеру пошкодження транспортного засобу, умов перевезення у ньому речовини (рідкі та газоподібні небезпечні вантажі), що зумовило її взаємодію із довкіллям, зовнішніх топографічних, метеорологічних та інших умов на місці надзвичайної ситуації.

Як правило, достеменно невідомо, які саме роботи та в якому обсязі необхідно буде виконати для локалізації надзвичайної ситуації, а отже, невизначеними можуть бути величини  $t_{SL}$  та  $q_R$ . Зрозуміло що й  $D_{DR}$  – обсяг робіт, що їх необхідно виконати для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації –

також є величиною важко прогнозованою, але її можна принаймні намагатися зменшити, наприклад, завдяки більш швидкому зосередженню ліквідаційних сил та засобів (скорочення часу  $t_{CF}$ ).

Нарешті, окремого розгляду потребує величина  $t_{SS}$ , що визначає тривалість стану безпечного функціонування транспортної системи. Цю величину можна визначити як середню за певний період часу  $T$ , значно більший за  $t_{SS}$ , якщо відомі кількість відмов у безпечному функціонуванні системи  $n_{SF}$ , які трапилися за цей період часу, тобто

$$t_{SS} = T/n_{SF}. \quad (14)$$

Під відмовою у безпечному функціонуванні транспортної системи слід розуміти будь-яку транспортну подію, внаслідок якої може трапитися надзвичайна ситуація за участю небезпечних вантажів. Аналіз статистики вантажних перевезень на залізницях України та інших джерел інформації за 2004 – 2011 роки дозволив встановити, що кількість таких транспортних подій з небезпечними вантажами залежить від загального тоннажу всіх вантажів, перевезеного залізницями, що представлено на рис. 4.

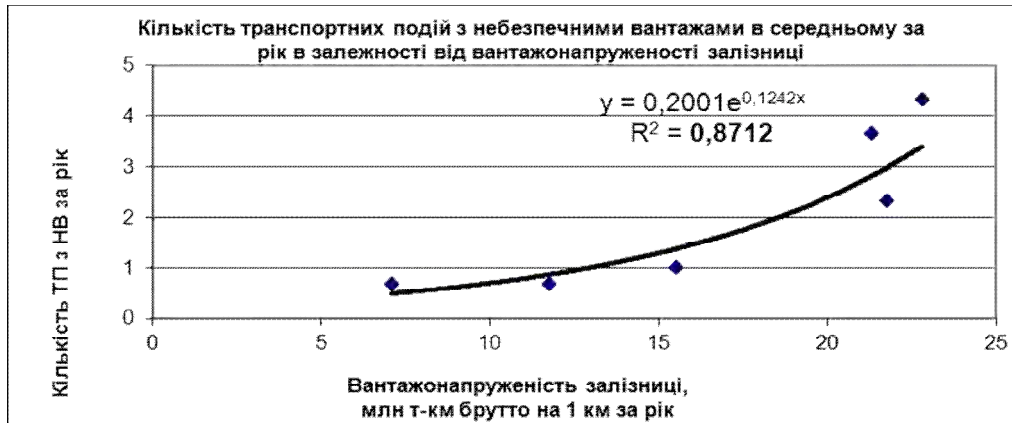


Рис. 4. Кількість транспортних подій з небезпечними вантажами в середньому за рік в залежності від вантажонапруженості залізниць

Наведені на рис. 4 шість точок відповідають узагальненим даним по шести регіональних залізницях України за згаданий період. Залежність кількості транспортних подій з небезпечними вантажами від вантажонапруженості залізниць є незаперечною, з коефіцієнтом апроксимації  $R^2$  близько 0,9, і очевидно, що вона носить загальний характер, тобто її можна віднести не тільки до певної регіональної залізниці, а й до будь-якої залізничної лінії, мережі залізничних ліній («умовної залізниці»), якими пропускається відповідний тоннаж.

Наведена на рис. 4 залежність  $y = 0,2001e^{0,1242x}$  може бути представлена у більш простому виді, придатному для необхідних у даній моделі розрахунків  $y = \exp\{\chi/8\}/5$  (враховуючи те, що  $0,2001 \approx 0,2 = 1/5$ , а  $0,1242 \approx 0,125 = 1/8$ ).

З урахуванням технологічних параметрів, що використовуються у моделі, величина  $y = n_{SF}$ , тоді:

$$n_{SF} = \frac{1}{5} \exp\left\{\frac{365 \cdot N \cdot G}{8 \cdot 10^6}\right\}, \quad (15)$$

де  $N$  – середньодобова кількість поїздів, що пропускаються лінією («умовною залізницею»), в обох напрямках;  $G$  – середня маса поїзда бруто, тонн.

З урахуванням формул (12) та (13), прийнявши період часу  $T=365$  діб, отримаємо значення середньої тривалості стану безпечного функціонування транспортної системи  $t_{SS}$  (у добях):

$$t_{SS} = \frac{T}{n_{SF}} = 5 \cdot 365 \exp\left\{-\frac{365 \cdot N \cdot G}{8 \cdot 10^6}\right\}. \quad (16)$$

Тепер формулу (8) можна видозмінити, використовуючи в ній, якщо це необхідно, часові (формула (17)) або технологічні параметри (шляхом підстановки величин, визначених формулами (11) – (13)):

$$P_1 = \left\{ \frac{1 + \exp\left\{365 \cdot N \cdot G / (8 \cdot 10^6)\right\}}{(5 \cdot 365) \times} \right\}^{-1}, \quad (17)$$

$$\left\{ \times \left[ (t_{CF} + t_{LE})(t_{CR} + t_{CF}) / (t_{CR} + 2t_{CF}) + t_{DR} \right] \right\}$$

де всі параметри визначені вище (рис. 1, пояснення до нього та формули (11) – (13)).

З практики відомо, що запізнення прибуття ліквідаційних сил та засобів і неефективне їх застосування завжди приводить до більш тяжких наслідків надзвичайної ситуації та більш тривалої її ліквідації. Причому найбільш стрімко надзвичайна ситуація розвивається у безпечному напрямку збільшення втрат від неї саме після початку процесу, що не можна не враховувати у його математичній моделі.

Зауважимо, що стрімкий розвиток будь-якого процесу у часі добре описується експоненціальною залежністю, чим і скористаємося у наступний спосіб, взявши за основу формулу (13) нашої моделі:



$$t_{DR} = \frac{D_{DR}}{\mu_{DR}} = \frac{D_{DR}^{max}}{\mu_{DR}} \left[ 1 - \exp \left\{ -\frac{t_{CF} + t_{LE}}{t_{CR}} \right\} \right], \quad (18)$$

де  $D_{DR}^{max}$  – максимально можливий обсяг робіт, що їх необхідно виконати для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації (наприклад, зняття та вивезення верхнього шару ґрунту, просоченого небезпечною рідиною, у тоннах, кубічних, квадратних метрах або інших одиницях виміру), а  $\mu_{DR}$  – продуктивність ліквідаційних сил та засобів у тих же одиницях виміру за одиницю часу.

З формули (18) видно, що при  $t_{CR} \rightarrow 0$ , коли повна втрата вантажу відбувається практично миттєво (наприклад, вибух), обсяг ліквідаційних робіт прагне до максимально можливого (оскільки  $\exp \left\{ -(t_{CF} + t_{LE})/t_{CR} \right\} \rightarrow 0$ , то й  $D_{DR} \rightarrow D_{DR}^{max}$ ).

Видно з формули й те, що при будь-якому ненульовому додатному  $t_{CR} > 0$ , чим більшим є час зосередження ліквідаційних сил та засобів та локалізації надзвичайної ситуації  $t_{CF} + t_{LE}$ , тим теж більшим є обсяг ліквідаційних робіт ( $D_{DR} \rightarrow D_{DR}^{max}$ ). Таким чином, модель адекватно враховуватиме як швидкість небажаного розвитку надзвичайної ситуації, що залежить від її характеру та зовнішніх умов, властивостей вантажу (через параметр  $t_{CR}$ ), так і швидкість реагування на цю ситуацію (через  $t_{CF} + t_{LE}$ ).

Стосовно формули (18) та попередніх формул, що містять величину  $\mu_{DR}$  слід відзначити, що ця величина теж є залежною від багатьох чинників, тому зупинимося на її аналізі.

Величина продуктивності ліквідаційних сил та засобів  $\mu_{DR}$  є «інтегральною» величиною, яку можна представити як  $\mu_{DR} = \sum_{i=1}^m \mu_i n_i$ , де  $\mu_i$  – продуктивність ліквідаційних сил та засобів  $i$ -го виду (наприклад, пожежних стволів, бульдозерів або кранів), а  $n_i$  – кількість одиниць ліквідаційних сил та засобів  $i$ -го виду. Більше того, і величина  $t_{DR}$  є «інтегральною» в тому сенсі, що зазначені ліквідаційні сили та засоби можуть застосовуватися одночасно для виконання різних видів робіт, причому ці роботи залежно від характеру надзвичайної ситуації та плану ліквідації її наслідків можуть закінчуватися у різний час. Таким чином, загальна тривалість ліквідаційних робіт  $t_{DR}$  визначається часом від початку «першої» (за черговістю) роботи і до закінчення «останньої» роботи, а її визначення та мінімізація можуть бути здійснені за допомогою відповідних математичних методів (наприклад, сітьового планування або методу PERT).

Подальшу увагу зосередимо на тому, що чим раніше та достовірніше буде оцінено надзвичайну ситуацію та прийнято управлінське рішення щодо вибору, зосередження та бойового розгортання адекватних ситуації сил та засобів у необхідній кілько-

сті, тим швидше надзвичайна ситуація буде локалізована, менш тяжкими будуть її наслідки і вони швидше будуть ліквідовані. В термінах нашої моделі це означає, що її математичні параметри  $t_{CF} = t_{SA} + t_{TT} + t_{RC} = t_{SA} + L/V + t_{RC}$  (рис. 1 та пояснення до нього), а також  $\mu_{DR} = \sum_{i=1}^m \mu_i n_i$ , (формула (18) та пояснення до неї) можуть бути оптимізовані шляхом застосування відповідних організаційних та технологічних заходів (наприклад, оптимальна дислокація ліквідаційних сил та засобів, їх відповідне оснащення та швидке зосередження) та технічних засобів. Наприклад, можливе застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та систем підтримки прийняття рішень (СППР) для розвідки, оцінювання обстановки та прийняття рішення на місці надзвичайної ситуації. Таким чином, може бути забезпечено максимальну ефективність проведення локалізації та ліквідації надзвичайної ситуації, а отже максимально можливу надійність транспортної системи при перевезеннях небезпечних вантажів.

Повернемося до нашої моделі з урахуванням попередніх міркувань. Тепер можемо записати такий аналітичний вираз:

$$P_1 = \frac{1}{1 + \exp \left\{ 365 \cdot N \cdot G / (8 \cdot 10^6) \right\} / (5 \cdot 365) \times \left[ \frac{t_{CF} + 3t_{LE}}{4} + \frac{D_{DR}^{max}}{\mu_{DR}} \left[ 1 - \exp \left\{ -\frac{t_{CF} + t_{LE}}{t_{CR}} \right\} \right] \right]} \quad (19)$$

Для того, щоб відобразити логіку цих міркувань, складемо наступне рівняння:

$$t_{CF} = t_{min} + \frac{t_{CF} - t_{CR}}{t_{max} - t_{CR}} (t_{max} - t_{CF}). \quad (20)$$

Рівняння (20) відображає той факт, що фактичний час зосередження ліквідаційних сил та засобів завжди знаходиться у певних межах  $t_{min} \leq t_{CF} \leq t_{max}$  і його певним чином намагаються зменшити, якщо  $t_{CR} \rightarrow 0$ . Після перетворень рівняння (20) отримаємо квадратне рівняння відносно  $t_{CR}$ , єдиним коренем якого при  $t_{min} = t_{SA} + L/V$  та  $t_{max} = t_{SA} + L/V + t_{RC}$  буде

$$t_{CF} = t_{CR} + \sqrt{t_{CR}^2 + \left( t_{SA} + \frac{L}{V} \right) \left( t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC} - t_{CR} \right)}. \quad (21)$$

Проте якщо  $t_{CR} = 0$ , тоді мінімальним значенням  $t_{CF}$  буде середньгеометричне

$$t_{CF} = \sqrt{\left( t_{SA} + \frac{L}{V} \right) \left( t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC} \right)},$$

котре, як відомо, є ближчим до меншого значення. Це й відображає той факт, що на практиці в особливо небезпечних ситуаціях намагаються всіляко скоротити час зосередження. Якщо ж значення «критичного часу» порівняно великі, тобто  $t_{CR} \gg 0$ , то з'являється певний резерв часу для зосередження сил.

Далі припустимо, що тривалість локалізації надзвичайної ситуації є тим меншою, чим скоріше зосереджені відповідні до ситуації та її масштабів сили та засоби. Виходячи із цього припущення та на підставі наведених вище формул промодельовано можливі два варіанти розвитку ситуації.

В першому варіанті тривалість часу на оцінювання ситуації і прийняття рішення приймемо  $t_{SA} = 0,50$  год., а у другому варіанті цей час прийнятий  $t_{SA} = 0,25$  год.

При моделюванні застосовано п'ять сполучень змінних величин, які наведені у табл. 2, що відрізняються різними значеннями критичного часу ( $t_{CR}$ , год.), максимально можливими обсягами локалізаційних ( $D_{LE}^{max}$ ) і ліквідаційних ( $D_{DR}^{max}$ ) робіт в умовних одиницях виміру, а також різними значеннями продуктивності сил та засобів виконання цих робіт (відповідно  $\mu_{LE}$  та  $\mu_{DR}$ ). Результати моделювання наведені на рис. 5.

Таблиця 2

Вихідні дані та результати розрахунків з математичною моделлю можливого розвитку надзвичайної ситуації

Постійні	$t_{SA}$ , год.	$t_{RC}$ , год.	L, км	V, км/год.	$D^{max}$ , од.	
	0,50	0,25	90	60	12	
Змінні	Величина змінної					
$t_{CR}$ , год.	0,05	0,45	0,85	1,25	1,65	
$t_{CF} = t_{CR} + \sqrt{t_{CR}^2 + \left(t_{SA} + \frac{L}{V}\right)\left(t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC} - t_{CR}\right)}$ год. (рис. 1 та формула (11))	2,15	2,40	2,73	3,14	3,63	
$D_{LE}^{max} = \frac{t_{CR} \cdot D^{max}}{t_{CF} - t_{CR}}$ , одиниць	0,29	2,77	5,43	7,95	10,00	
$\mu_{LE}$ , одиниць за 1 год.	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	
$t_{LE} = \frac{t_{CF} - t_{CR}}{1 + t_{CR} / \left(t_{RC} + D_{LE}^{max} / \mu_{LE}\right)}$ , год.	1,88	1,57	1,46	1,42	1,43	
$D_{DR}^{max} = \frac{(t_{CF} - 2t_{CR})D^{max}}{t_{CF} - t_{CR}}$ , одиниць	11,71	9,23	6,57	4,05	2,00	
$\mu_{DR}$ , одиниць за 1 год.	2,50	2,00	1,50	1,00	0,50	
$t_{DR} = \frac{D_{DR}^{max}}{\mu_{DR}} \left[1 - \exp\left\{-\frac{t_{CF} + t_{LE}}{t_{CR}}\right\}\right]$ , год.	4,69	4,61	4,35	3,95	3,82	
$t_{CF} + t_{LE} + t_{DR}$ $t_{CF}$ , год.	при $t_{SA} = 0,50$ год.	8,72	8,58	8,53	8,50	8,88
	при $t_{SA} = 0,25$ год.	8,24	7,98	7,67	7,30	7,01

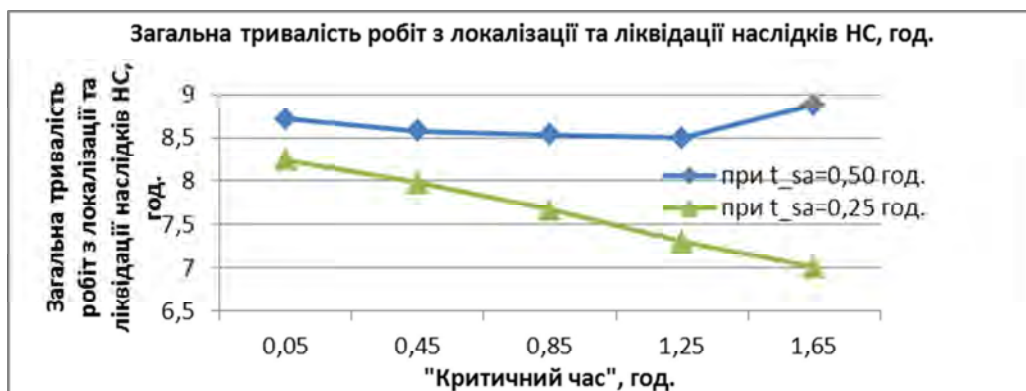


Рис. 5. Результати моделювання загальної тривалості локалізаційних та ліквідаційних робіт залежно від швидкості прийняття рішення ( $t_{SA}$ ) та «критичного часу» вантажу ( $t_{CR}$ )

З рис. 5 видно, що скорочення часу на прийняття рішення щодо проведення ліквідаційних робіт всього на 15 хвилин призводить до зменшення загальної тривалості цих робіт в середньому від однієї до майже чотирьох годин. Зважаючи на те, що кожна година затримки з початком виконання ліквідаційних робіт пов'язана із значною втратою вантажу та прямими й непрямими економічними втратами [2], то очевидно є необхідність якнайскорішого оцінювання обстановки, що склалася, та прийняття своєчасного обгрунтованого рішення з ліквідації надзвичайної ситуації. Це можливо за рахунок застосування новітніх технічних засобів моніторингу розвитку надзвичайної ситуації, наприклад, використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), а також застосування інформаційних технологій, інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Враховуючи те, що перебування системи перевезень небезпечних вантажів у кожному із станів (див. рис. 2), очевидно, характеризується різним рівнем економічних показників, то доцільно, а з використанням запропонованих математичних моделей – практично можливо оцінити економічні ефекти підтримання належного рівня надійності цієї системи.

## Висновки

1. Авторами вперше формалізовано систему залізничних перевезень небезпечних вантажів у вигляді орієнтованого графу станів: безпечного функціонування системи, настання надзвичайної ситуації, її оцінювання, локалізації та ліквідації її наслідків, а також повернення системи у вихідний стан.

2. Побудовані математичні моделі, які доведені до рівня практичних розрахунків ймовірностей перебування системи залізничних перевезень небезпечних вантажів у стані безпечного функціонування

в залежності від застосування тих чи інших технологічних та організаційних заходів підтримання системи у стані надійності.

3. Визначена доцільність та сфера застосування новітніх технічних засобів моніторингу розвитку надзвичайної ситуації, наприклад, використання БПЛА, а також застосування інформаційних технологій, інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

4. Доведено, що оперативність прийняття своєчасного обгрунтованого рішення з ліквідації надзвичайної ситуації дає очевидний синергетичний ефект у вигляді значного скорочення не лише часу ліквідаційних робіт, а й більш ніж пропорційного йому зменшення негативних економічних та екологічних наслідків надзвичайної ситуації.

## Список літератури

1. Katsman M.D. *Mathematical Models Of Ecologically Hazardous Rail Traffic Accidents* / M.D. Katsman, V.K. Myronenko, V.I. Matsiuk // *RT&A* # 01(36), Vol.10, 2015, March. – P. 28 – 39.
2. Кацман М.Д. *Математичні моделі екологічно небезпечних залізничних транспортних подій* / М.Д. Кацман, В.К. Мироненко, В.І.Мацюк // *Системи обробки інформації*. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 3 (128). – С.125-131.
3. Кацман М.Д. *Інформаційна модель ідентифікації екологічно небезпечних надзвичайних ситуацій* / М.Д. Кацман, О.Г. Родкевич // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – Вип. 1 (42). – Х.: ХУПС, 2015. – С. 126-131.
4. Мироненко В.К. *Логіко-математична концептуальна модель ліквідації наслідків надзвичайної ситуації при залізничних перевезеннях небезпечних вантажів* / В.К. Мироненко, М.Д. Кацман, В.І. Мацюк // *Системи озброєння і військова техніка*. – № 1(41). – 2015. – С. 168-172.

Надійшла до редколегії 14.05.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЙ И НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПЕРЕВОЗКАХ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ

В.К. Мироненко, М.Д. Кацман, М.М. Горбаха, В.И. Мацюк

*Впервые формализована система железнодорожных перевозок опасных грузов в виде ориентированного графа состояний: безопасного функционирования системы, наступления чрезвычайной ситуации, ее оценивания, локализации и ликвидации ее последствий, а также возвращение системы в исходное состояние; предложены математические модели вероятности нахождения системы в состоянии безопасного функционирования в зависимости от применения различных технологических и организационных мероприятий поддержания системы в состоянии надежности.*

**Ключевые слова:** математическая модель, ликвидация чрезвычайной ситуации, опасные грузы, железнодорожные перевозки, ликвидационные мероприятия.

## MATHEMATICAL MODEL STATES AND RELIABILITY RAILWAY TRANSPORT SYSTEM OF DANGEROUS GOODS TRANSPORTATION

V.K. Mironenko, M.D. Katzman, H.M. Horbaha, V.I. Matsyuk

*First formalized is a system of dangerous goods railway transportation in the form of an oriented graph of states, namely: safe operation of the system, the onset of an emergency, its evaluation, localization and liquidation of its consequences, as well as the return of the system to its original state; the mathematical models of the probability of the system stay in a state of safe operation, depending on the application of various technological and organizational measures to support the system in a reliable state.*

**Keywords:** mathematical model, emergency response, dangerous goods, rail, liquidation activities.