

УДК 656.26

В.К. Мироненко<sup>1</sup>, М.Д. Кацман<sup>2</sup>, В.І. Мацюк<sup>1</sup><sup>1</sup> Державний економіко-технологічний університет транспорту, Київ,<sup>2</sup> Південно-Західна залізниця, Київ

## ЛОГІКО-МАТЕМАТИЧНА КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ ПРИ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ

Розглянута математична модель процесів ліквідації надзвичайної ситуації з небезпечними вантажами, що перевозяться залізничним транспортом. Модель доведена до рівня можливості її використання у безпосередніх розрахунках необхідних сил та засобів для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, тривалості ліквідаційних заходів та оцінювання їх ефективності.

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

### Вступ

Залізничний транспорт перевозить значну кількість небезпечних вантажів з різноманітними пожежо-вибухонебезпечними властивостями. Транспортні події у таких випадках є дуже складними з огляду на ліквідацію їх наслідків. Аналіз свідчить, що, на жаль, останнім часом, особливо в деяких регіонах України, зростає частка транспортних подій, пов'язаних з різного роду несанкціонованими втручаннями в діяльність залізничного транспорту. Тому проблема прогнозування розвитку надзвичайних ситуацій, які сталися в результаті транспортних подій, набуває особливої актуальності.

У разі, коли в натурних умовах залізничних перевезень немає можливості здійснювати моніторинг обстановки, що сталася внаслідок транспортної події і може призвести до надзвичайної ситуації (НС), доводиться якимось чином прогнозувати її розвиток, оцінювати ймовірність різних її наслідків, з метою своєчасного прийняття обґрунтованих управлінських рішень. При цьому не завжди достатньо буває попереднього досвіду, адже НС трапляються нечасто та, як правило, не мають аналогій в минулому.

Прогнозування розвитку та можливих наслідків НС може здійснюватися, у тому числі, і на основі певних математичних моделей, що відображають динаміку процесів втрати вантажу (внаслідок природних чи техногенних причин) і припинення цих втрат, збереження вантажу (внаслідок робіт з локалізації НС та ліквідації її наслідків), і подібні моделі обговорювалися раніше [10 – 15]. Мета статті – розробка ще однієї з таких математичних моделей, що враховує попередній досвід.

### Основний розділ

Графоаналітична модель наведена на рис. 1. Відповідну математичну модель можна визначити як графоаналітичну, і вона ґрунтується на введеному нижче понятті «критичний час» ( $\tau_{кр}$ ).

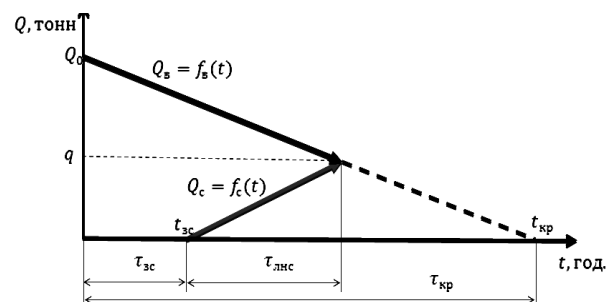


Рис. 1. Графоаналітична модель розвитку надзвичайної ситуації, при якій відбувається втрата вантажу та вживаються заходи щодо її ліквідації

«Критичний час» у даній моделі – це 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 [1 – 9] або результатів досліджень [10 – 15].

Цей час залежить від дуже великої кількості чинників, серед яких фізико-хімічні та пожежо-вибухонебезпечні властивості вантажу (небезпечної речовини), умов оточуючого природного середовища, характер та швидкість процесів, які відбуваються при пошкодженні транспортного засобу, що зумовило взаємодію небезпечної речовини з оточуючим середовищем. Оскільки ці чинники та умови вже розглядалися [10 – 15], тут ми лише констатуємо, що критичний час значною мірою є величиною випадковою і може коливатися від майже миттєвого вибуху, пожежі, до поступового витікання рідини на ґрунт чи у водойми або повільного випаровування речовини в атмосферу.

Суттю моделі є те, що в ній розглядаються два протилежні процеси, які розвиваються у часі лінійно. З них перший – це процес фізичної втрати (зменшення кількості) вантажу внаслідок НС, що описується певною функцією  $Q_b = f_b(t)$ , а другий – це «протидіючий» йому процес припинення цих втрат

$Q_c = f_c(t)$  завдяки заходам з ліквідації НС, який приводить до того, що втрати вресі-ресіт припиняються в момент часу  $t_{zc} + \tau_{лнс}$ .

Причому це відбувається раніше, ніж було би втрачено увесь вантаж, за умови, якщо б ніяких заходів з ліквідації НС не вживалося (ця «умовність» відображена на рис. 1 штрих-пунктирною лінією). Якщо ж припинення втрат вантажу відбувається одночасно або після настання «критичного часу», тоді немає сенсу витратити сили та засоби на ліквідації НС, адже вантаж усе одно буде втрачено. Такі ситуації в наведеній моделі не розглядаються, адже вони потребують інших моделей – не ліквідації самої НС, а ліквідації наслідків НС.

Лінійний характер розвитку в часі зазначених вище двох процесів приймається як апроксимація, що є однак не менш адекватною, ніж будь-яка інша (наприклад, експоненціальний чи логарифмічний характер залежності), а також для спрощення подальшого аналізу. Таке спрощення є необхідним та виправданим тому, що процес протидії втратам вантажу може відбуватися в часі у багато різних способів, наприклад, стрибкоподібно, коли пробойну в цистерні, крізь яку витікає вантаж, вдалося нарешті надійно закрити, або пожежу вдалося загасити, але не з першої спроби. Проте для моделі важливі лише моменти часу початку та завершення процесу протидії втратам вантажу, тобто його тривалість, а також інтенсивність цього процесу, яка в подальшому позначається як  $\mu$ . А ще більш важливо для адекватності моделі – це щоб вона, незалежно від прийнятого характеру зміни тої чи іншої змінної, давала результати, що є теоретично обґрунтованими та підтверджуються практикою.

«Вектори» цих описаних вище різноспрямованих процесів, зображені на рис. 1, закінчуються стрілками у точці, що відповідає моменту припинення втрат вантажу, який настає по певному часі  $\tau_{лнс}$  після початку ліквідації НС.

Отже, в моделі прийнято, що втрата (зменшення кількості) вантажу у часі носить характер лінійної залежності, графік якої відображений низхідною лінією, що поєднує точки «вихідної кількості вантажу»  $Q_0$  та «критичного часу»  $t_{кр}$  на рис. 1. Висхідна лінія, що відображає інтенсивність процесу ліквідації та припинення втрат вантажу, починається у точці  $t_{zc}$  і йде вгору вправо до перетину з описаною вище низхідною лінією.

Координати точки перетину висхідної та низхідної ліній відповідають моменту часу закінчення втрат вантажу завдяки вжитим заходам щодо ліквідації НС (абсциса точки дорівнює  $t_{zc} + \tau_{лнс}$ ) та кількості вантажу, що збережена (ордината точки дорівнює  $q$ ).

В моделі використовуються наступні перемінні, що віднесено тут до двох груп – моменти або тривалості часу (вимірюються в годинах) і кількість вантажів, що піддаються впливу небезпечних факторів НС (вимірюються в тоннах):

$\tau_{лнс}$  – тривалість ліквідації НС;

$t_{zc}$  – момент часу закінчення зосередження сил та засобів на місці ліквідації НС (тривалість зосередження залежить від відстані між місцем постійної дислокації цих сил та засобів і місцем, де відбулася НС, швидкості руху до цього місця, тривалості розвідки обстановки та організації сил та засобів на місці НС тощо);

$t_{кр}$  – розрахунковий момент закінчення «критичного часу»  $t_{кр}$ , коли вантаж може бути повністю втрачено (у прийнятій в моделі системі координат  $t_{кр} = \tau_{кр}$ );

$Q_0$  – вихідна кількість вантажу в момент настання НС, яка піддається дії небезпечних факторів НС (розсипання, розливання, дія пожежі, вибухова хвиля, випаровування, втрати вантажу внаслідок фізичної та хімічної взаємодії з повітрям, водою, ґрунтом, лугами, кислотами, металами тощо);

$q$  – кількість вантажу, що залишилася в момент закінчення ліквідації НС ( $t_{zc} + \tau_{лнс}$ ).

За допомогою наведеної на рис. 1 графоаналітичної моделі можна геометрично визначити потрібну інтенсивність робіт з ліквідації втрат вантажу  $\mu$  при заданій тривалості ліквідаційних заходів  $\tau_{лнс}$ , а саме як тангенс кута нахилу висхідної прямої  $Q_c = f_c(t)$  до осі часу  $t$ :

$$\mu = q/\tau_{лнс} \quad (1)$$

Після здійснення необхідних геометричних побудов та алгебраїчних перетворень, які тут не наводимо, отримуємо просту розрахункову формулу:

$$\mu = \frac{Q_0}{\tau_{лнс}} \left( 1 - (t_{zc} + \tau_{лнс})/t_{кр} \right) \quad (2)$$

При цьому забезпечується коректність результату розрахунку, адже відповідно до прийнятої моделі формально завжди виконується умова, яка на практиці полягає в тому, що сили та засоби варто зосереджувати на місці НС лише тоді, коли є можливість ліквідувати наслідки НС раніше, ніж сплине «критичний час»:

$$t_{zc} + \tau_{лнс} < t_{кр} \quad (3)$$

Практична цінність отриманої формули (2) полягає в тому, що на підставі встановленої та обґрунтованої за її допомогою величини  $\mu$  можна підібрати відповідні характеру НС сили та засоби її ліквідації потрібної продуктивності (у тоннах на годину або інших величинах).

При відомій чи заданій інтенсивності ліквідаційних робіт  $\mu$ , а також відомих чи прогнозованих  $t_{зс}$  та  $t_{кр}$  можна встановити розрахункову тривалість надзвичайної ситуації:

$$t_{лнс} = Q_0 \left(1 - t_{зс}/t_{кр}\right) / \mu + Q_0/t_{кр}. \quad (4)$$

Практично формула (4) дає можливість прогнозувати час завершення ліквідації НС і, якщо немає потреби у додаткових відбудовних чи інших роботах – час відновлення руху поїздів, що був перерваний ліквідацією наслідків НС.

Дослідимо за допомогою математичного аналізу величину  $\gamma = \mu t_{лнс}/Q_0$ , яка може являти собою технологічну оцінку ефективності організації робіт та використання сил та засобів при ліквідації надзвичайної ситуації. З формул (2) та (4) витікає:

$$\gamma = \frac{\mu t_{лнс}}{Q_0} = \frac{Q_0}{\tau_{лнс}} \left(1 - \frac{t_{зс} + \tau_{лнс}}{t_{кр}}\right) \cdot \frac{1 - t_{зс}/t_{кр}}{\mu + Q_0/t_{кр}}. \quad (5)$$

Очевидно, чим меншою є величина  $\mu t_{лнс}$  відносно  $Q_0$ , тобто чим менше витрачено сил та засобів на ліквідацію НС та чим швидше її ліквідовано, тим краща ефективність організації робіт та використання сил та засобів при ліквідації НС. Тобто критерієм оптимізації та цільовою функцією є  $\gamma \rightarrow \min$ . Однак, як показує математичний аналіз, ця функція не має мінімумів в області допустимих значень ні по  $\mu$ , ні по  $t_{лнс}$ . Тим не менше, критерій  $\gamma$  можна використовувати як достатньо об'єктивну організаційно-тех-

нологічну оцінку для порівняльного аналізу ефективності організації робіт та використання сил та засобів при ліквідації подібних за характером НС.

Продовжуючи аналіз отриманих залежностей, відзначимо, що перемінні, які входять до формул (2) та (4), відображають різні явища та процеси. Так, критичний час  $t_{кр}$  залежить від фізико-хімічних властивостей вантажу, характеру та розвитку НС, природних умов у місці, де вона сталася, і вплинути на величину  $t_{кр}$  досить важко, якщо взагалі можливо – тобто можна стверджувати, що ця величина є наслідком передусім «природних» чинників.

У той же час очевидно, що величини  $t_{зс}$  та  $t_{лнс}$  є наслідком передусім «техногенних», «антропогенних» чинників. Ними можуть бути місце розташування пожежно-рятувального поїзда відносно місця НС, швидкість його руху та розгортання сил та засобів, професійність дій персоналу, необхідність якнайшвидшого відновлення руху поїздів тощо.

На ці «техногенні» величини можна (і необхідно!) впливати у потрібному напрямку шляхом прийняття своєчасних, обґрунтованих управлінських рішень та ефективної організації технологічних заходів щодо їх виконання. Саме для оцінки ефективності цієї організації слід використовувати отримані залежності (2) та (4).

Проаналізуємо ці залежності та покажемо на прикладі можливості такого оцінювання. Прийmemo  $Q_0 = 50$  тонн,  $t_{кр} = 7$  год., а інші величини ( $t_{зс}$  та  $t_{лнс}$ ) змінюватимемо, як наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Розрахункова необхідна інтенсивність ліквідаційних робіт (продуктивність сил та засобів ліквідації НС)  $\mu$ , тонн/год., залежно від часу зосередження сил та засобів на місці НС  $t_{зс}$ , при необхідній тривалості ліквідації НС,  $t_{лнс}$ .

Значення «техногенних» чинників		Тривалість ліквідації НС, $t_{лнс}$ , год.				
		1	1,5	2	2,5	3
Тривалість зосередження сил та засобів ліквідації НС, $t_{зс}$ , год.	1	35,71	21,43	14,29	10,00	7,14
	1,5	32,14	19,05	12,50	8,57	5,95
	2	28,57	16,67	10,71	7,14	4,76
	2,5	25,00	14,29	8,93	5,71	3,57
	3	21,43	11,90	7,14	4,29	2,38

З розрахунків, наведених у табл. 1, витікають цілком логічні висновки, що добре узгоджуються з практичним досвідом. А саме – при мінімально можливій тривалості зосередження сил та засобів і мінімально потрібній тривалості ліквідації НС продуктивність сил та засобів ліквідації НС повинна бути максимальною, і навпаки. Цей висновок виразно підтверджується графіком на рис. 2, який має виразний нелінійний характер.

В табл. 2 наведені результати розрахунків тривалості ліквідації НС, виконаних за формулою (4), а на рис. 3 наведений графік, побудований за результатами розрахунків табл. 2.

Наведені у табл. 2 та на рис. 3 результати є цілком зрозумілими з усіх точок зору – чим більшою є продуктивність сил та засобів ліквідації НС,  $\mu$ , тим швидше буде ліквідована НС, але при певній незмінній продуктивності  $\mu$  тривалість ліквідації НС є тим меншою, чим більший час зосередження сил та засобів ліквідації НС,  $t_{зс}$ , адже тоді більша частка вантажу за цей час буде витраченою, а збереження тої частки вантажу, що залишилася, потребуватиме менше часу. Доречно буде зауважити, що до таких самих висновків автори дійшли за допомогою інших методів дослідження [10 – 15], що підтверджує адекватність отриманих результатів.

Таблиця 2

Розрахункова тривалість ліквідації НС,  $t_{\text{ЛНС}}$ , год., залежно від тривалості зосередження сил та засобів ліквідації НС,  $t_{\text{ЗС}}$ , год. і продуктивності сил та засобів ліквідації НС,  $\mu$ , тонн/год.

Значення «техногенних» чинників		Продуктивність сил та засобів ліквідації НС, $\mu$ , тонн/год.									
		2	6	10	14	18	22	26	30	34	38
Тривалість зосередження сил та засобів ліквідації НС, $t_{\text{ЗС}}$ , год.	1	4,69	3,26	2,50	2,03	1,70	1,47	1,29	1,15	1,04	0,95
	1,5	4,30	2,99	2,29	1,86	1,56	1,35	1,19	1,06	0,95	0,87
	2	3,91	2,72	2,08	1,69	1,42	1,23	1,08	0,96	0,87	0,79
	2,5	3,52	2,45	1,88	1,52	1,28	1,10	0,97	0,87	0,78	0,71
	3	3,13	2,17	1,67	1,35	1,14	0,98	0,86	0,77	0,69	0,63

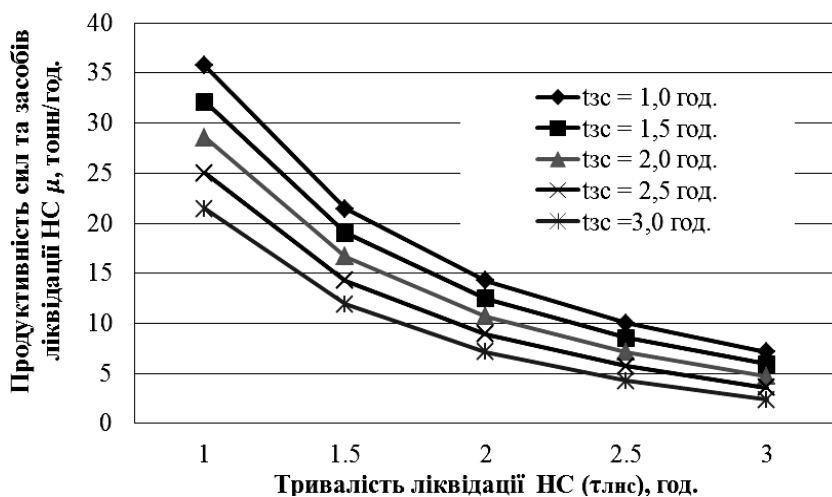


Рис. 2. Розрахункова потрібна інтенсивність ліквідаційних робіт (продуктивність сил та засобів ліквідації НС)  $\mu$ , тонн/год., залежно від часу зосередження сил та засобів на місці НС  $t_{\text{ЗС}}$ , при необхідній тривалості ліквідації НС,  $t_{\text{ЛНС}}$

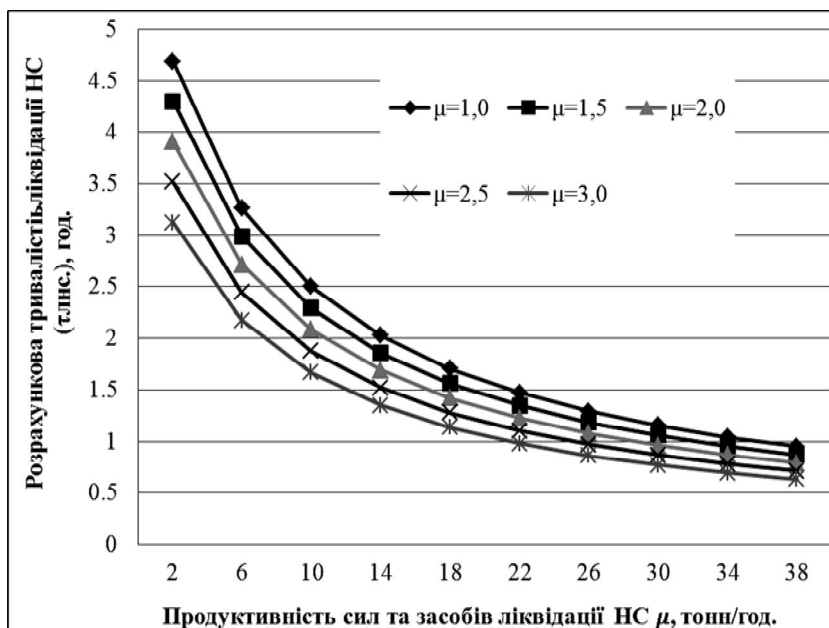


Рис. 3. Розрахункова тривалість ліквідації НС,  $t_{\text{ЛНС}}$ , год., залежно від тривалості зосередження сил та засобів ліквідації НС,  $t_{\text{ЗС}}$ , год. і продуктивності сил та засобів ліквідації НС,  $\mu$ , тонн/год.

## Висновки

Запропонована логіко-математична концептуальна модель є достатньо загальною, простою і у той же час адекватною реальним процесам ліквідації наслідків НС за участю небезпечних вантажів, що перевозяться залізничним транспортом, та може бути застосована на інших видах транспорту, а також в інших галузях.

Отримані результати застосування розглянутої моделі не містять ніяких парадоксів чи протиріч і повністю узгоджуються з практикою та здоровим глуздом – адже чим швидше будуть розгорнуті сили та засоби на місці НС, тим менше вантажу буде втрачено до цього моменту внаслідок «природних» чинників – отже, тим більшу кількість вантажу доведеться врятувати, для чого потрібно більше сил та засобів (це підтверджується також іншими методами дослідження).

В протилежному випадку, якщо зосередження сил та засобів на місці НС буде повільним (великі значення  $t_{\text{ЗС}}$ ), не буде встановлено жорсткого часу її ліквідації (великі значення  $t_{\text{ЛНС}}$ ), то багато вантажу буде втрачено природним шляхом ще до початку ліквідаційних робіт, а отже, невеликою буде їх інтенсивність, що фактично потребуватиметься для ліквідації НС. В такому випадку витрати на зосередження сил та засобів та їх використання будуть запізненими, даремними, непродуктивними.

З метою зменшення непродуктивних витрат запропоновано критерій  $\gamma$ , який можна використовувати як достатньо об'єктивну організаційно-технологічну оцінку при порівняльному аналізі ефективності організації робіт і використання сил та засобів для ліквідації подібних за характером НС.

У зв'язку з тим, що організаційно-технологічна оцінка ефективності організації робіт і використання сил та засобів при ліквідації НС не завжди є достатньою, виникає необхідність комплексної – не тільки технологічної, але й економічної та екологічної оцінки ефективності організації робіт з ліквідації НС, що потребує додаткового аналізу на основі відповідних економіко-математичних моделей.

### Список літератури

1. Положення про функціональну підсистему «Сили і засоби реагування на надзвичайні ситуації на залізничному транспорті Міністерства транспорту та зв'язку України щодо запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру». – Наказ МТЗУ від 08.12.2008, № 1486. – К., 2008. – 36 с.
2. Інструкція з організації відбудовних робіт при ліквідації наслідків транспортних подій на залізницях України. – Наказ МТЗУ від 27.04.2001, №258. – К., 2001. – 21 с.
3. Положення про відновний поїзд залізниць України. – Наказ Укрзалізниці від 07.12.2011, № 641-Ц, ЦРБ-0035. – К., 2011. – 107 с.
4. Інструкція про порядок відбудови пошкодженої контактної мережі електрифікованих залізниць. – Наказ Укрзалізниці від 20.12.2006, № 587Ц. – К., 2012. – 10 с.
5. Положення про пожежні поїзди на залізницях України. НАПБ 02.13-2006. – Наказ Укрзалізниці від 01.01.2006, № 039-Ц. – К., 2006. – 27 с.
6. Положення про систему управління безпекою руху поїздів в Державній адміністрації залізничного транспорту України. – Наказ МТЗУ від 14.09.2004, № 818. – К., 2004. – 38 с.
7. Положення про ремонтно-будівельні летючки зв'язку на залізничному транспорті України. – Наказ Укрзалізниці від 09.08.1997, № 23-ЦЗ. – К., 1997. – 12 с.
8. Правила безпеки та порядок ліквідації наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами при пере-

везенні їх залізничним транспортом. – Наказ МТЗУ від 25.11.2008, № 1431. – К., 2008. – 753 с.

9. Методичні рекомендації щодо визначення нормативів часу на проведення аварійно-відновлюваних робіт із використання основних технічних засобів відбудовних поїздів залізниць України.

10. Оцінювання і прогнозування надзвичайних ситуацій на транспорті / М.Д. Кацман, В.К. Мироненко, О.Г. Родкевич, О.Г. Стрелко // Мат-ли IV Міжнар. наук.-пр. конф. «Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства». – МАБЖД, Академія муніципального управління. – К., 2011. – С. 300-302.

11. Родкевич О.Г. Застосування стохастичних мережних моделей ситуацій, пов'язаних з перевезенням небезпечних вантажів / О.Г. Родкевич, В.К. Мироненко, М.Д. Кацман // Мат-ли III Міжнар. наук.-пр. конф. «Маркетинг і логістика в системах менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті». – Х., 2012. – С. 132-134.

12. Кацман М.Д. Аналіз впливу на екологічний стан довкілля основних властивостей небезпечних вантажів, що перевозяться залізничним транспортом / М.Д. Кацман, М.І. Адаменко // Системи обробки інформації. – Х., 2012. – Вип. 5(103). – С. 158-164.

13. Аналіз рекомендованих дій підрозділів залізниці у разі витоків, розливів та розсипів небезпечних вантажів при їх перевезенні залізничним транспортом / М. Кацман, В. Мироненко, М. Адаменко, М. Горбах // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства інфраструктури України: Серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2012. – Вип. 21. – С. 152-159.

14. Katsman M.D. Probabilistic model of ecological consequences of railroad accidents / M.D. Katsman, V.K. Myronenko, M.I. Adamenko // Reliability: theory & applications. – Vol. 8, №. 1(28). – San Diego, USA, 2013. – P. 72-85.

15. Katsman M.D. Mathematic models of ecologically hazardous rail traffic accidents / M.D. Katsman, V.K. Myronenko, V.I. Matsiuk // Reliability: theory & applications. – Vol. 10, № 1(36). – San Diego, USA, 2015. – P. 72-82.

Надійшла до редколегії 17.02.2015

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

### ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ ПРИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗКАХ ОПАСНЫХ ГРУЗОВ

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

Рассмотрена математическая модель процессов ликвидации чрезвычайной ситуации с опасными грузами, перевозимыми железнодорожным транспортом. Модель доведена до уровня возможности ее использования в непосредственных расчетах необходимых сил и средств для ликвидации последствий чрезвычайной ситуации, продолжительности ликвидационных мероприятий и оценки их эффективности.

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

### LOGICAL-MATHEMATICAL CONCEPTUAL MODEL OF LIQUIDATION OF CONSEQUENCES OF EXTRAORDINARY SITUATION AT RAILWAY TRANSPORTATIONS OF DANGEROUS LOADS

V.K. Mironenko, M.D. Kacman, V.I. Masyuk

A mathematical model of emergency response processes with dangerous goods transported by rail. Model is adjusted to the level of possibility of its use for direct calculation of the necessary forces and means for emergency response, duration of liquidation activities and evaluation of their effectiveness.

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