

УДК 504.05

М.Д. Кацман

Південно-Західна залізниця, Київ

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТЕЙ МОЖЛИВИХ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ АВАРІЙ

*У статті розглядається проблема прогнозування наслідків аварій і катастроф залізничного транспорту за участю небезпечних вантажів на основі моделей теорії масового обслуговування. З аналізу процесів розвитку аварій за участю таких вантажів встановлено, що навколишнє природне середовище має певну інертність реагування на зовнішню дію небезпечних факторів аварії, протидіє ним щодо зміни свого стану і поведінки, тобто має властивості інертності та самовідновлення. На основі математичного апарату теорії масового обслуговування здійснено формальний опис процесів розвитку небезпечних явищ у транспортних подіях та на конкретному числовому прикладі розглянуто функціонування двофазної системи масового обслуговування й встановлені умови настання катастрофічного наслідку у залежності від інтенсивності дії небезпечних факторів аварії, інертності та самовідновлення системи «аварійний рухомий склад – навколишнє природне середовище».*

**Ключові слова:** екологічна безпека, небезпечні вантажі, залізничний транспорт, імовірнісна модель.

### Вступ

**Актуальність теми.** Залізничним транспортом перевозиться велика кількість різноманітних вантажів з різними пожежовибухонебезпечними властивостями, які при аваріях за їх участю негативно впливають на навколишнє середовище. Тому зрозуміло, що на всіх рівнях організації перевезень небезпечних вантажів повинна приділятися належна увага здійсненню заходів, спрямованих на охорону навколишнього середовища, раціональне використання природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки життєдіяльності людини.

Реалізація відповідних заходів має забезпечувати рівновагу, сталість і гнучкість природних систем, порушення яких може призвести до важких негативних наслідків і екологічних катастроф.

**Проблема** дослідження причин виникнення залізничних аварій і катастроф, їх впливу на людей,

рухомий склад, інфраструктуру залізничного транспорту спонукала до дослідження процесів горіння небезпечних вантажів різних агрегатних станів, бо досвід ліквідування цих транспортних подій показує, що найбільшу загрозу становлять ті з них, які супроводжуються пожежами цих вантажів [1, 2].

З аналізу процесів розвитку аварій з такими небезпечними вантажами можна зробити висновок про те, що навколишнє природне середовище має деяку інерційність реагування на зовнішню дію небезпечних факторів аварії, протидіє ним щодо зміни свого стану і поведінки, тобто має властивості самопідтримання і саморегуляції, що, при деяких умовах, може призвести до гальмування катастрофічних процесів, аж до їх припинення [3 – 9].

З метою прогнозування стану довкілля зараз застосовується велика кількість математичних та імітаційних моделей. Для побудови таких моделей застосовують диференційні рівняння, що описують

різноманітні фізико-хімічні процеси розповсюдження забруднення атмосфери, ґрунту, річок і водоймищ при різних граничних умовах, що враховують поширення таких забруднень, при заданих метеорологічних умовах, потужність джерел забруднень і фізичних властивостей підстилаючої поверхні (її рельєф, забудови, лісопаркові зони та ін.). Широко також застосовуються методи лінійного регресійного аналізу, розпізнавання образів, послідовної графічної регресії та інші [10, 11].

### Основний матеріал

Розглянемо екологічну систему «аварійний рухомий склад – навколишнє природне середовище» як марківську систему масового обслуговування (СМО). У марківській СМО усі потоки подій, які переводять її із стану у стан є простішими (стаціонарними, пуассонівськими).

Це означає, що інтервали часу між подіями у потоках мають показниковий розподіл з параметром  $\lambda$ , який дорівнює інтенсивності відповідного потоку. На таку СМО діє вхідний потік заявок – порцій небезпечних факторів аварії (НФА) з інтенсивністю  $\lambda$ .

В якості таких «порцій» можуть розглядатися, наприклад, небезпечна рідина, газ, що вириваються під великим тиском з пробоїни в цистерні, утворюючи (або не утворюючи) вибухонебезпечну газоповітряну суміш тощо.

Тоді інтенсивність потоку  $\lambda$  можна визначити як математичне сподівання часу досягнення вибухонебезпечної концентрації суміші.

Час інерційної дії системи «аварійний рухомий склад – навколишнє природне середовище» – показниковий з інтенсивністю  $\nu$ , як і час самовідновлення системи (відновлення здатності системи повертатися у вихідний безпечний стан), який має параметр інтенсивності  $\mu$ .

При такому розумінні  $\mu$  – це величина, обернена середньому часу самовідновлення системи ..., тоді як  $\nu$  – це величина, обернена середньому часу інерційності (затримка реакції системи на НФА).

Обслуговування заявки-порції у такій СМО складається з двох фаз.

Суть обслуговування заявок-порцій у першій фазі полягає в тому, що концентрація НФА після надходження чергової заявки-порції досягла критичного значення, а наступна за нею заявка-порція отримала відмову і перейшла у другу фазу обслуговування (СМО-2).

Перша фаза обслуговування порції НФА являє собою простішу одноканальну СМО-1 з чергою та «розігріванням» каналу обслуговування, функціонування якої розглянуто у [12]. «Розігріванням» каналу обслуговування в даному випадку є реалізація інерційної властивості системи.

Граф такої СМО-1 поданий на рис. 1.

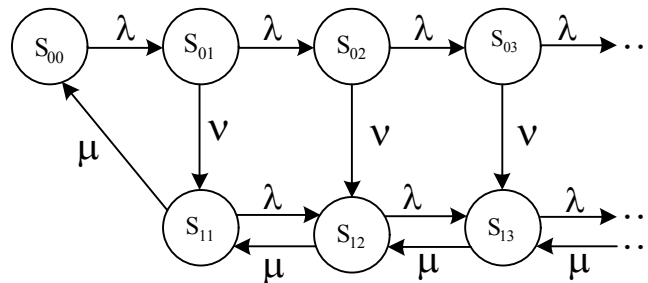


Рис. 1. Граф станів СМО-1 з чергою і розігріванням каналу обслуговування

- Стани СМО-1 (рис. 1) наступні:
- $S_{00}$  – канал вільний, не розігрітий;
- $S_{01}$  – прийнята одна порція НФА й очікує, канал розігрівається, діє інерційність системи;
- $S_{11}$  – канал розігрітий, одна порція НФА обслуговується, черги немає;
- $S_{02}$  – канал розігрівається, у черзі дві порції НФА;
- $S_{0k}$  – канал розігрівається, у черзі  $k$  порцій НФА;
- $S_{1k}$  – канал обслуговує одну порцію НФА,  $(k-1)$  порцій стоять у черзі; і т.д.

Система рівнянь для фінальних імовірностей:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda P_{00} &= \mu P_{11} \\ (\lambda + \nu) P_{01} &= \lambda P_{00} \\ (\lambda + \mu) P_{11} &= \nu P_{01} + \mu P_{12} \\ (\lambda + \mu) P_{02} &= \lambda P_{01} \\ (\lambda + \mu) P_{12} &= \nu P_{02} + \lambda P_{11} + \mu P_{13} \\ &\dots \\ (\lambda + \nu) P_{1,k} &= \lambda P_{0,(k-1)} \\ (\lambda + \mu) P_{1,k} &= \nu P_{0,k} + \lambda P_{1,(k-1)} + \mu P_{1,(k+1)}; \dots \end{aligned} \right. \quad (1)$$

На другій фазі обслуговування, коли чергова  $(1+1)$ -ша порція НФА отримує відмову, бо кількість таких порцій у СМО-1 перевищує граничну

кількість (одна порція), вона потрапляє на обслуговування у СМО-2.

СМО-2 являє собою одноканальну систему масового обслуговування з відмовою (рис. 2).

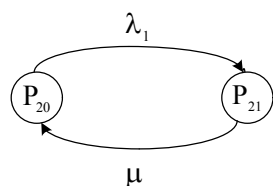


Рис. 2. Граф станів СМО-2

Рівняння для фінальних ймовірностей будуть такі:

$$\begin{cases} \mu P_{21} = \lambda_1 P_{20}; \\ P_{20} + P_{21} = 1; \\ \lambda_1 = \lambda P_{12}. \end{cases} \quad (2)$$

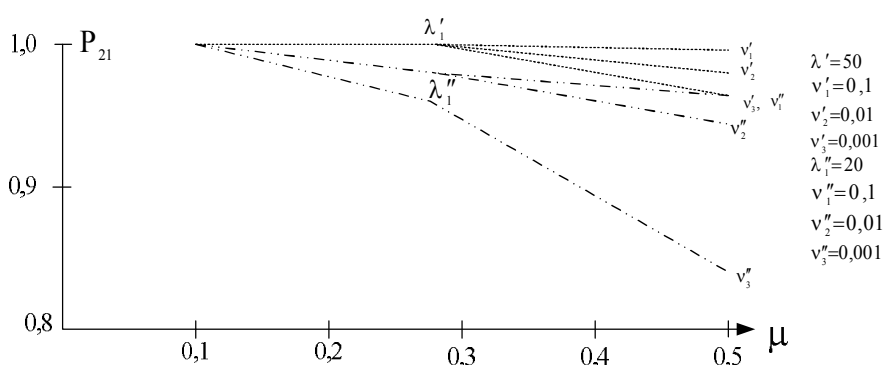


Рис. 3. Графік залежності ймовірності катастрофічного наслідку аварії  $P_{21}$  від інтенсивності самовідновлення системи  $\mu$  при великих значеннях інтенсивності потоку НФА  $\lambda_1$  та малих значеннях інерційності системи  $v$

При помірних значеннях вхідного потоку  $\lambda_1$ , низьких інтенсивності інерційності системи  $v$  та збільшенні інтенсивності відновлення системи  $\mu$ , ймовірність  $P_{21}$  має тенденцію до зниження своєї величини. Найбільше зниження значення ймовірності катастрофічного наслідку відбувається при зменшенні інтенсивності надходження порцій НФА на вхід СМО-2.

Наприклад, за умов  $\lambda_1^{IV}=1$ ,  $v_3^{IV}=0,001$  та при  $\mu=0,5$  величина  $P_{21}=0,545$ . Між тим ймовірність катастрофічного наслідку аварій для прикладу, що розглядається, ще залишається значною.

При збільшенні величин  $v$  (зменшенні середнього часу інерції системи) та зменшенні середнього часу відновлення системи (збільшення  $\mu$ ), ймовірність  $P_{21}$  значно знижується й при зменшенні  $\lambda_1$  стає незначною.

Проведені розрахунки показують, що при  $\lambda_1^{VII}=20$ ,  $\lambda_1^{VIII}=50$  та  $v=1; 2; 3$  при збільшенні  $\mu$ , значення ймовірності  $P_{21}$  становить від 0,005 при  $\mu=0,1$  до 0,004 при  $\mu=0,5$ , тобто катастрофічний

Звідки ймовірність катастрофічного наслідку аварії буде:

$$P_{21} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu} = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{\lambda_1}} = \frac{1}{1 + \frac{\mu}{\lambda P_{12}}} \quad (3)$$

З рис. 3 видно, що при великих значеннях інтенсивності надходження порцій НФА, які отримали відмову у СМО-1, на вхід СМО-2, значно менших за інтенсивності протидії системи щодо порушення стану її рівноваги  $v$  (при великому значенні середнього часу інерції системи) та при збільшенні інтенсивності відновлювальних процесів  $\mu$  (зменшення значення математичного сподівання часу відновлення), ймовірність катастрофічного наслідку аварії  $P_{21}$  для прикладу, що розглядається, дещо знижується, але залишається досить високою.

наслідок практично не можливий. Аналогічні висновки можна зробити й при

$$\lambda_1^{IX}=20, \lambda_1^X=50 \text{ та } v=10; 20; 30,$$

коли при визначених змінах  $\mu$  найбільше значення  $P_{21}$  не перевищує 0,4, а найменше дорівнює 0,01.

Слід звернути увагу, що у наведених прикладах (графіки рис. 3) використовувалися певною мірою «абстрактні», безрозмірні (відносні) значення інтенсивностей потоків та обслуговування заявок-порцій НФА в даній математичній моделі. Це дало можливість сфокусуватися на демонстрації можливостей нового теоретичного підходу, що пропонується авторами для даного класу задач.

В конкретних практичних застосуваннях цього теоретичного підходу і математичної моделі повинні застосовуватися відповідні величини та їх параметри.

Особливості практичного застосування моделі на залізничному та інших видах транспорту, для різних умов, що трапляються при перевезеннях небезпечних вантажів, очевидно, потребують окремих досліджень та наукового аналізу.

## Висновки

В даному дослідженні на основі загальних положень теорій екосистем, горіння і вибуху, теорії ймовірностей розглянуті природні процеси і техногенні фактори розвитку небезпечних явищ при аваріях рухомого складу залізничного транспорту як такі, що мають аналогічні природним екосистемам властивості протидії небезпечним факторам аварій, а саме інертність і самовідновлення.

Здійснено формальний опис згаданих процесів розвитку небезпечних явищ при аваріях на основі математичного апарату теорії масового обслуговування, який застосовується в інших класах прикладних задач (зв'язок, транспорт та ін.), для моделювання умов та кількісної оцінки дії факторів, що характерні для аварій за участю небезпечних вантажів на залізничному транспорті.

Запропоновано та розглянуто на конкретних числових прикладах математичну модель функціонування двофазної системи масового обслуговування й встановлені умови настання катастрофічного наслідку у залежності від інтенсивності дії небезпечних факторів аварії, інертності та самовідновлення системи «аварійний рухомий склад – навколишнє природне середовище».

## Список літератури

1. Ліквідація пожеж на залізничному транспорті: Посібник / М.Д. Кацман, Г.Б. Кононов, І.В. Діденко, Н.В. Огороднійчук. За ред. Д.В. Зеркалова. – К.: Основа, 2006. – 216 с.

2. 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, вип. 5(103). – Х.: ХУПС, 2012. – С.158-164.

3. Баратов А.М. Пожарная безопасность / А.М. Баратов, В.А. Пчелинцев. – М.: АСВ, 1997. – 176 с.

4. Вильямс Ф.А. Теория горения / Ф.А. Вильямс. Пер. с англ. С.С.Новикова, Ю.С. Рязанцева – М.: Наука, 1974. – 615 с.

5. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения / Д.Б. Сполдинг Пер. с англ. – М.: Гос. энергетич. изд-во, 1959. – 320 с.

6. Щетинков Е.С. Физика горения газов / Е.С. Щетинков. – М.: Наука, 1965. – 739 с.

7. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. 2-е изд., доп. и перераб. / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1967. – 491 с.

8. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.Н. Баренблат, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

9. Блинов В.И. Диффузное горение жидкостей / В.И. Блинов, Г.Н. Худяков. – М.: АН СССР, 1961. – 208 с.

10. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов / В.Ф. Крапивин, Ю.М. Свиричев, А.М. Тарко. – М.: Наука, 1982. – 272 с.

11. Акимов В.А. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев. – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.

12. Вентцель Е.С. Прикладные задачи теории вероятностей / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Радио и связь, 1983. – 418 с.

Надійшла до редколегії 10.01.2013

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

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ВОЗМОЖНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ АВАРИЙ

М.Д. Кацман

В статье, на основе моделей теории массового обслуживания, рассматривается проблема прогнозирования последствий аварий и катастроф на железнодорожном транспорте с участием опасных грузов. Анализ процессов развития аварий с такими грузами показал, что окружающая природная среда имеет некоторую инерционность реагирования на внешнее воздействие опасных факторов аварий, противодействует им в изменении своих состояния и поведения, то есть, обладает свойствами инертности и самовосстановления. На основе математического аппарата теории массового обслуживания осуществлено формальное описание процессов развития опасных явлений транспортных аварий и на конкретном числовом примере рассмотрено функционирование двухфазной системы массового обслуживания и установлены условия возникновения катастрофических последствий в зависимости от интенсивности воздействия опасных факторов аварии, инертности и самовосстановления системы «аварийный подвижной состав – окружающая природная среда».

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, опасные грузы, железнодорожный транспорт, вероятностная модель.

## MATHEMATICAL MODEL OF DETERMINATION OF PROBABILITIES OF POSSIBLE ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF RAILWAY FAILURES

M.D. Kacman

The article considers the problem of forecasting of consequences of accidents and catastrophes of railway transport with participation of dangerous goods on the basis of models of the theory of mass service. The analysis of the processes of the development of accidents involving such cargoes showed that the natural environment has a certain degree of inertia of the response to the external impact of the dangerous factors of the accident, opposes it in relation to the change of their status and behavior, in other words, has the properties of inertia and self-healing. On the basis of the mathematical apparatus of the theory of mass service carried out a formal description of processes of development of dangerous phenomena of transport accidents. On a specific numerical example is considered the functioning of the two-phase system of mass service and established the conditions of catastrophic consequences depending on the intensity of impact of hazardous factors of the accident, inertia, and self-healing system «emergency mobile composition - the natural environment».

**Key words:** ecological safety, dangerous goods, railway transport, the probability model.