

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

*Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису*

**Кацман Михайло Давидович**

УДК 504.05662.66-5.62-7

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Методологічні засади організації управління екологічною безпекою під час  
ліквідування наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті**

21.06.01 – екологічна безпека

21 – Національна безпека

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ М.Д.Кацман

Науковий консультант Запорожець Олександр Іванович, доктор технічних  
наук, професор

Київ – 2018

## АНОТАЦІЯ

*Кацман М.Д.* Методологічні засади організації управління екологічною безпекою під час ліквідування наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 - екологічна безпека. Національний авіаційний університет. Київ, 2018.

За результатами узагальнення світового досвіду та власних теоретичних і експериментальних досліджень вирішено актуальну науково-практичну проблему зменшення шкідливого впливу на довкілля і життєдіяльність людини негативних чинників аварійних ситуацій під час транспортування небезпечних вантажів залізничним транспортом внаслідок удосконалення управління реагуванням на такі аварійні ситуації.

У дисертації розв'язується важлива проблема зменшення шкідливого впливу на довкілля і життєдіяльність людини негативних чинників аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом внаслідок удосконалення управління реагуванням на такі аварійні ситуації.

Наукову новизну визначають такі теоретичні та експериментальні результати досліджень:

***вперше:***

-проаналізовано функціонування системи залізничного транспорту як мегасистеми взаємодії з довкіллям та сучасний стан перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом. Виявлено, що існує антагоністична суперечність між природними і техногенними чинниками аварійної ситуації, які створюють екологічну небезпеку розв'язування суперечності, та цілеспрямованими діями ліквідаційних підрозділів, на зосередження та організацію функціонування яких ще необхідні певні зусилля і час з боку органу управління.

-запропоновано метод оцінювання часової залежності інтенсивності викиду легкозаймистих речовин з аварійного рухомого складу, яка інтегрована у сучасну модель атмосферного перенесення таких речовин задля врахування часової

мінливості джерела викиду і розрахування часової залежності концентрації цієї речовини в атмосфері на різних відстанях від аварійного рухомого складу.

- запропонована математична модель визначення ймовірності станів і рівня екологічної безпеки системи залізничних перевезень небезпечних вантажів під час аварійних ситуацій з такими вантажами залежно від ефективності реагування на ці аварійні ситуації.

- на основі принципу мережецентричного управління різнохарактерними силами і засобами створенні методологічні засади управління екологічною безпекою під час ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами;

***удосконалено:***

- математичну модель у вигляді програмного комплексу прогнозування параметрів небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій при транспортуванні легкозаймистих і горючих речовин введенням у неї відповідних комп'ютерних процедур на основі розробленого методу визначення параметрів зон забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливі нафтопродуктів, а також комп'ютерні процедури оцінювання ймовірності ураження людини, будівель і споруд від вибуху паливо-повітряної суміші та теплового випромінювання;

- математичні моделі оцінювання ефективності дій ліквідаційних підрозділів та їхніх з'єднань, які ґрунтуються на використанні методу псевдостанів теорії систем масового обслуговування щодо опису їхнього функціонування при ліквідуванні наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами з урахуванням часових характеристик зосередження та продуктивності роботи, а також параметрів небезпечних чинників таких аварійних ситуацій;

- методи прогнозування параметрів небезпечних чинників аварійних ситуацій з небезпечними речовинами на різних промислових об'єктах, які адаптовано до умов перебігу залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, а також порядок визначення ситуативних критеріїв ефективності і послідовності дій оперативних штабів пунктів управління ліквідуванням наслідків таких ситуацій з

метою створення інформаційної технології вироблення управлінських рішень для бази знань системи підтримки прийняття рішень (СППР).

***набуло подальшого розвитку:***

-визначення та обґрунтування, з урахуванням негативних властивостей небезпечних вантажів, основних ймовірних процесів типових сценаріїв розвитку залізничних аварійних ситуацій і виявлення причинно-наслідкових зв'язків цих процесів з характеристиками їхніх наслідків для створення теоретичної основи побудови бази знань системи підтримки прийняття рішень керівників оперативних штабів ліквідації наслідків таких аварійних ситуацій;

-застосування методу продукції штучного інтелекту для формування бази знань системи підтримки прийняття рішень керівників оперативних штабів пунктів управління ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, яка відрізняється від існуючих використанням продукційних моделей знання, що дає змогу формального опису аварійної ситуації та опрацювання у середовищі системи підтримки прийняття рішень варіантів управлінських рішень задля зменшення шкідливого впливу на довкілля та життєдіяльність людини наслідків таких аварійних ситуацій.

Практична цінність результатів досліджень полягає в тому, що для системи підтримки прийняття рішень керівника оперативного штабу ліквідування наслідків аварійних ситуацій при транспортуванні небезпечних вантажів використовуються математичні моделі прогнозування розвитку небезпечних для довкілля чинників типових аварійних ситуацій, математичні моделі визначення ефективності дії ліквідаційних підрозділів, аналізу обстановки і вироблення варіантів рішень. Запропонований принцип мережецентричного управління ліквідаційними підрозділами із ситуаційних центрів залізничних пунктів керування з використанням СППР у складі єдиної автоматизованої системи управління вантажними перевезеннями залізничного транспорту дає змогу скоротити час на підготовку і прийняття обґрунтованого рішення на 10–15 % у порівнянні з існуючою системою підготовки та прийняття рішень. Застосування СППР у системі навчально-бойової та спеціальної підготовки начальницького складу воєнізованої

охорони дало можливість покращити навички під час навчання в оцінці обстановки і виробленні рішення щодо ліквідації аварійних ситуацій при перевезенні небезпечних вантажів залізничним транспортом, а також розвинути базу знань СППР.

Отримані результати роботи були використані при виконанні Державним економіко-технологічним університетом транспорту науково-дослідної роботи «Дослідження стану і тенденцій розвитку транспортних перевезень та розроблення пропозицій щодо освоєння перспективних транзитних вантажопотоків через територію України» та науково-дослідної роботи (шифр «Ситуація») науково-дослідного, проектно-конструкторського та технологічного інституту мікрографії МНС України, розроблена концепція «Безпечна залізниця». Результати роботи використовуються у навчальному процесі в інституті залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій під час викладання дисциплін «Нормативні документи з безпеки руху поїздів» та «Транспортна екологія».

Результати роботи впроваджені у Головному управлінні воєнізованої охорони ПАТ «Укрзалізниця» та у Департаменті з питань екології, енергоменеджменту, охорони праці та цивільної безпеки Маріупольської міської ради.

**Ключові слова:** екологічна небезпека, залізнична аварійна ситуація, навколишнє середовище, прийняття рішення, інформаційна технологія, система підтримки прийняття рішення, мережецентричне управління.

Список публікацій здобувача

### *Монографії*

1. Юхимчук С. В. Моделі автоматизації вироблення рекомендацій керівнику гасіння пожежі на залізничному транспорті: монографія / С. В. Юхимчук, М. Д. Кацман. //Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2008. – 144 с.
2. Наукові основи техногенно-екологічної безпеки : монографія [Електроний ресурс]. Д. В. Зеркалов, М. Д. Кацман, М. Д. Адаменко, О. Г. Родкевич, Т. В. Пічкур/ За ред. Д. В. Зеркалова. – К.: «Основа», 2014 – 372с.

### *Публікації у фахових виданнях*

3. Великодний В. В. Розширення функціональних можливостей АСК ВП Укрзалізниці / В. В. Великодний, М. Д. Кацман, О. І. Коліков, С. В. Юхимчук // Залізничний транспорт України. – 2009. – № 1. – С. 21–23.

4. Юхимчук С. В. Використання інтелектуальних технологій для аналізу надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті/ С. В. Юхимчук, Т. О. Савчук, М. Д. Кацман // Системні дослідження та інформаційні технології. НТУУ «КПІ», м. Київ, 2009. – № 4. – С. 53–61.

5. Юхимчук С. В. Продукційні моделі оцінювання можливого розвитку аварії на залізничному транспорті при перевезенні радіоактивних речовин / С. В. Юхимчук, М. Д. Кацман, А. В. Вознюк // Весник Херсонського НТУ. – 2009. – № 1(34). – С. 438–440.

6. Кацман М. Д. Інформаційно-комп'ютерні технології автоматизації роботи керівників ліквідації аварій за участю небезпечних вантажів / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, О. Г. Родкевич // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 6. – С. 50–53.

7. Кацман М. Д. Підвищення ефективності бойового застосування пожежних поїздів / М. Д. Кацман, В. П. Лапін, В. К. Мироненко, О. Г. Родкевич, О. Г. Стрелко // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 1. – С. 39–41.

8. Мироненко В. К. Фактори оптимізації системи перевезень небезпечних вантажів / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, О. Г. Родкевич // Вагонний парк. – 2011. – № 8. – С. 39-41.

9. Ю. В. Гержод Ю. В. Модернізація пожежних поїздів на залізницях країни / Ю. В. Гержод, М. М. Горбаха, В. М. Дидківський, М. Д. Кацман. // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 3/4. – С. 14 – 16.

10. Кацман М. Д. Застосування пожежних поїздів для ліквідації транспортних подій з небезпечними вантажами // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техніч. праць. – Л.: РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.12 – С. 96 – 101.

11. Кацман М. Д. Аналіз рекомендованих дій підрозділів залізниці у разі витоків, розливів та розсіпів небезпечних вантажів при їх перевезенні залізничним транспортом / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, М. І. Адаменко, М. М. Горбаха // Зб.

наук. праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства інфраструктури України: Серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2012. – Вип.21. – С. 152–159.

12. Кацман М. Д. Використання залізничних формувань у медичному забезпеченні військ та населення в історичному та сучасному аспектах / М. Д. Кацман, П. В. Лапін, О. Г. Родкевич, О. А. Горецкий : зб. наук. праць ДЕТУТ Серія «Транспортні системи і технології». – Київ, 2014. – Вип. 24. – С. 208 – 213.

13. Мироненко В. К. Перспективи використання безпілотних літальних апаратів у ліквідації наслідків залізничних транспортних подій / В. К. Мироненко, П. В. Лапін, М. Д. Кацман // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 4. – С. 43–48.

14. Кацман М.Д. Застосування інноваційних методик для забезпечення безпеки залізничного транспорту/ М. Д. Кацман, В. А. Жуков // Українська залізниця. – 2017. – №7 – 8 (49–50). – С. 47– 51.

15. Запорожець О.І. Оцінювання наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами / О. І. Запорожець, І. В. Ковалець, М. Д. Кацман // Система управління, навігації та зв'язку. Зб. наук. праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Полтава, 2017. – № 6 (46). – С. 224-232.

#### ***Публікація у фаховому іноземному виданні***

16. Кацман М. Д. Экологически негативное влияние железнодорожных аварий с опасными грузами / М. Д. Кацман, Н. И. Адаменко, Ю. А. Кулиш, А. С. Испулатова // Вестник Кокшетауского технического института Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. – № 1(13). – Кокшетау.: КТИ МЧС РК. – 2014. – С. 10–18.

#### ***Публікації у наукометричних виданнях***

17. 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. – Харків. – 2012. – Вип. 5(103). – С. 158–164.

18. Кацман М. Д. Математична модель визначення ймовірностей можливих екологічних наслідків залізничних аварій/ М. Д. Кацман . // Зб. наук. праць ХУПС. Харків. – 2013. – Вип. 1(34). – С. 182–185.

19. Кацман М. Д. Інформаційна модель ідентифікації екологічно небезпечних надзвичайних ситуацій / М. Д. Кацман, О. Г. Родкевич // Зб. наук. праць ХУПС. Харків. – 2015. – Вип. 1(42). – С. 126–131.

20. Кацман М. Д. Математичні моделі екологічно небезпечних транспортних подій / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Системи обробки інформації. Харків. – 2015. – Вип. 3(128). – С. 125–131.

21. 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. Харків. – 2015. – Вип. 1(41). – С. 168–172.

22. Мироненко В. К. Підвищення ефективності бойового застосування підрозділів ліквідації наслідків надзвичайної ситуації при залізничних перевезеннях небезпечних вантажів з урахуванням екологічного аспекту / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, В. І. Мацюк // Системи озброєння і військова техніка. Харків. – 2015. – Вип.2(42). – С. 168–172.

23. Мироненко В. К. Математична модель станів та надійності залізничної транспортної системи при перевезенні небезпечних вантажів / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, М. М. Горбаха, В. І. Мацюк // Системи обробки інформації. Харків. – 2015. – Вип. 9(134). – С. 161–167.

24. Мироненко В. К. Передумови створення СППР щодо ліквідації наслідків залізничних надзвичайних ситуацій на основі мережецентричних методів управління / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, В. І. Мацюк // Системи обробки інформації. Харків. – № 5(142). – 2016. – С. 163–171.

25. Кацман М. Д. Практичне застосування мережецентричних методів для управління реагування на залізничні надзвичайні ситуації / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних сил. – Вип.2(47). – 2016. – С. 130–136.



26. Кацман М. Д. Система підтримки прийняття рішень мережецентричного управління реагуванням на надзвичайні ситуації / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Системи озброєння і військова техніка. – № 2(46). – 2016. – С. 89–93.

27. Кацман М. Д. Математичні моделі інформаційних процесів при ліквідуванні залізничних надзвичайних ситуацій / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – № 2(23). – 2016. – С. 126–134.

28. Адаменко М.І. Аналіз існуючих математичних моделей і комп'ютерних програм для прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері/ М.І. Адаменко, М.Д. Кацман, Є.С. Білецька// Системи обробки інформації. Харків. – 2018. – Вип. 1(151). – С. 155–162.

***Публікації у наукометричних іноземних виданнях:***

29. Katsman M., Mathematical models of decision support system for the head of the fire-fighting department on railways/M. Katsman, O. Kryvopishyn, V. Lapin. – San Diego, USA. – Reliability: theory & applications. – Vol. 2.№ 03(22). –2011. – P. 86–93.

30. Katsman M. D. Problematic 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.

31. Katsman M. D., Mathematical 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. 28–39.

32. Lapin. V. I.S. Blioh (1836 – 1901) Railway magnate and peacemaker, prominent scientist-railroader: economist, statistician and financier / V. Lapin, O. Kryvopishyn, M. Katsman. – San Diego, USA. – Reliability: theory & applications. – Vol. 2.№ 04(23). –2011. – P. 149–155.

***Матеріали і тези доповідей на науково-практичних конференціях:***

33. Юхимчук С. В. Система підтримки прийняття рішень керівників ліквідації аварії і пожежі небезпечних вантажів/ С. В. Юхимчук, М. Д. Кацман //Автоматизация: проблемы, идеи, решения: международная научно-техническая

конференція, 10-15 сентября 2007г. : тези доп.– Севастополь, 2007 г. – С. 241–243.

34. Кацман М. Д. Напрямок автоматизації оцінки обстановки і рішень керівників ліквідації надзвичайних ситуацій та гасіння пожеж небезпечних вантажів/ М. Д. Кацман, С. В. Юхимчук // Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті: I міжнародна науково-практична конференція, 15-18 вересня 2009 р.: тези доп. – Львів, 2009. – С. 73–75.

35. Кацман М. Д. Розробка моделі управління гасінням пожеж та реагуванням на аварійну ситуацію на залізничному транспорті / М. Д. Кацман // Проблеми інформатики і моделювання: IX міжнародна науково-технічна конференція, 26–28 листопада 2009 р. : тези доп. – Харків, 2009. – С. 68.

36. Мироненко В. К. Науково-методичні підходи до оцінки безпечності системи залізничних перевезень пасажирів і вантажів / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, О. Г. Родкевич // Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті: II міжнародна науково-практична конференція, 20–22 вересня 2011р.: тези доп. – Київ, 2011. – С. 120–122.

37. Кацман М.Д. Підхід до створення математичних моделей оцінювання ризиків при перевезенні залізницями небезпечних вантажів/ М. Д. Кацман, В. В. Маліцький //Інформаційні технології в навігації і управлінні: стан та перспективи розвитку: II міжнародна науково-технічна конференція», 16–17 липня 2011 р. тези доп. – Київ, 2011. – С. 33.

38. Кацман М.Д. Оцінювання і прогнозування надзвичайних ситуацій на транспорті / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, О. Г. Родкевич, О. Г. Стрелко // Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства : IV міжнародна науково-практична конференція, 8–9 червня 2011р. тези доп. – Київ, 2011. – С. 300–302.

39. Кацман М.Д. Проблеми ліквідації аварій за участю небезпечних вантажів при їх перевезенні залізницями/ М. Д. Кацман, В. В. Маліцький // Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: II

міжнародна науково-технічна конференція, 15–16 грудня 2011 р.: тези доп. – Київ, 2011. – С. 60.

40. Кацман М. Д. Раціоналізація застосування пожежних поїздів для підвищення транспортної безпеки на залізницях / М. Д. Кацман, В. П. Лапін, О. Г. Родкевич // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: V міжнародна науково-практична конференція. – Сер. «Техніка, технологія», 15–16 березня 2011 р.: тези доп. – Київ, 2011. – С. 178–179.

41. Кацман М. Д. Використання математичних моделей для оптимізації чисельності пожежних поїздів/ М. Д. Кацман// Маркетинг і логістика в системах менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті: III міжнародна науково-практична конференція, 18-20 вересня 2012 р. : тези доп. – Харків, 2012. – С. 122–127.

42. Кацман М. Д. Математичні моделі розвитку та ліквідації залізничних аварій з небезпечними вантажами / М. Д. Кацман // Безопасность жизнедеятельности. Экологические и здоровье сохраняющие технологии: I українська наукова конференція, 15, 16 березня 2013 р.: тези доп. – Харків, 2013. – С. 10–11.

43. Кацман М. Вероятностная модель определения эффективности действий по локализации экологических последствий транспортных событий / М. Кацман, С. Мирощниченко // RIADENIE BEZPEČNOSTI ZLOŽITÝCH SYSTÉMOV: Zborník vedeckých a odborných prác Medzinárodná vedecko-odborná konferencia, 24–28.02. 2014 r. : abstrakty, Liptovský Mikuláš, Slovakia 2014. – С. 265–272.

44. М. Д. Кацман. Деякі питання організації ліквідації надзвичайних ситуацій з небезпечними вантажами/ М. Д. Кацман //Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті: IV міжнародна науково-практична конференція, 23–25 вересня 2014 р. тези доп. – Одеса, 2014. – С. 124–129.

45. Кацман М. Д. Необхідність застосування новітніх інформаційних технологій для організації ліквідації екологічних наслідків залізничних

надзвичайних ситуацій/ М. Д. Кацман // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: IV міжнародна науково-технічна конференція, 4–5 грудня 2014 р. тези доп. – Полтава, 2014. – С. 69.

46. Кацман М. Д. Деякі проблеми створення СППР керівника оперативної групи з ліквідації екологічно небезпечних залізничних транспортних подій / М. Д. Кацман // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління : V міжнародна науково-технічна конференція, 23, 24 квітня 2015 р. тези доп. – Полтава, 2015. – С. 52.

47. Мироненко В. К. Моделювання впливу часу локалізації та ліквідації аварійного розливу нафтопродукту на характеристики зони забруднення верхньої будови залізничної колії / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, О. А. Горецький // Стратегия качества в промышленности и образовании: XI международная конференция, 1–5 июня 2015 г. тези доп. – Варна, 2015. – С. 113–117.

48. Кацман М. Д. Інформаційна підтримка організації цивільного захисту на об'єктах Укрзалізниці / М. Д. Кацман // Проблеми автоматизації: V міжнародна науково-технічна конференція, 12–13 листопада 2015 р. тези доп. – Полтава, 2015. – С. 63.

49. Кацман М. Д. Методологічні основи створення новітньої системи управління реагуванням на залізничні надзвичайні ситуації/ М. Д. Кацман // Маркетинг і логістика в системі менеджменту на залізничному транспорті: VI міжнародна науково-практична конференція, 27-29 вересня 2016 р. тези доп. – Запоріжжя, 2016. – С. 129–141.

50. Кацман М.Д. Деякі шляхи забезпечення транспортної безпеки об'єктів залізничної інфраструктури і рухомого складу публічного акціонерного товариства «Українська залізниця»/ М.Д. Кацман, В.А. Жуков // Проблеми і перспективи інноваційного розвитку економіки у контексті інтеграції України в Європейській науково-інноваційний простір: XXII міжнародна науково-практична конференція, 11-13 вересня 2017 р. : тези доп. – Одеса, 2017р. – С. 102 – 112.

## ANNOTATION

M.D. Katsman Development of the scientific foundations of the environmental safety management during the liquidation consequences of emergency situations in railway transport. – Qualification scientific work as a manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 21.06.01 – ecological safety. – National Aviation University, Kyiv, 2018.

The thesis presents overview of world experience and authors own theoretical and experimental researches, the actual scientific and practical problem of reducing the harmful effects on the environment and human life of negative factors of emergency situations during transportation of dangerous goods by railway. To manage such emergency situations improved decision making system it is proposed.

The thesis presents the results of research and modeling of the impact of the consequences of ecologically dangerous railway emergency situations on the environment and human activity, as well as processes of managing the actions of liquidation units on the basis of information technology of network center management.

The scientific novelty is determined by the following theoretical and experimental results of research.

***for the first time:***

- the main probable processes of typical scenarios for the development of railway emergency situations are identified and grounded, taking into account the most important ecologically dangerous properties of the goods being transported, and the causal relationships of these processes with the characteristics of their consequences have been identified to create the theoretical basis for building the knowledge base of the decision support system Heads of the management of the liquidation of the consequences of such situations;

- the model for assessing the reliability of a railway transportation system in the event of emergencies with dangerous goods depending on the effectiveness of the response to such emergencies;

- based on the principle of network center management of diverse forces and means, established situational criteria and method of production, the methodology of

departmental management in the elimination of the consequences of railway emergency situations is proposed, which enables to use the capabilities of the situational center of the control point of a certain level in order to reduce the time and resources losses for carrying out liquidation measures/

***improved:***

- relevant methods of forecasting the parameters of dangerous factors of emergency situations with hazardous substances at various industrial facilities, which are adapted to the conditions typical of railway emergency situations with dangerous goods, as well as the procedure for determining the situational criteria of efficiency and sequence of actions of the operational headquarters of the control points for the elimination of the consequences of such situations in order to create information technology for the development of managerial decisions for the knowledge base of decision-making system;

- mathematical models for assessing the effectiveness of the actions of the emergency units, which are based on the use of the method of pseudo systems of the theory of mass service systems to describe the functioning of these units and their compounds in the elimination of the consequences of railway emergency situations with dangerous goods, taking into account the time characteristics of the concentration of such units, the productivity of their work and parameters of dangerous factors of such situations;

- method for determining the values of dangerous for the environment factors of railway emergency situations during the transport of flammable substances in relation to the assessment of the time dependence of the intensity of release of such substances from the emergency rolling stock, which was integrated into the modern model of atmospheric transport of pollutants, which made it possible to take into account the temporal variability of the source of emissions and to calculate the time dependence of the concentration of dangerous substance in the atmosphere at different distances from the emergency rolling stock.

**got further development:**

- application of the artificial intelligence production method for forming the knowledge base of the decision support system of the situational centers of the response

the railway emergency situations with dangerous goods, which differs from the existing use of production models of knowledge, enabling the formal description of the emergency situation and processing in the environment of variants of managerial decisions for the purpose of reduction of harmful influence on the environment and human activity of consequences of such emergencies;

- mathematical models for information processes for responding to railway emergency situations during transportation of dangerous goods that reflect the dynamics of information exchange in the control circuit "situational center of the control point - liquidation units" in any number of services and units involved in the liquidation work and the stages of these works.

The practical value of the thesis is that for the decision-support system of the head of the operational headquarters for the elimination of the consequences of emergencies in the transport of dangerous goods, mathematical models for forecasting the development of hazardous for environmental factors of typical emergency situations, mathematical models for determining the effectiveness of the liquidation units, the analysis of the situation and development solution options. The proposed principle of network-centered management of liquidation units from situational centers of railway control points using the decision-making system as part of a unified automated system for managing freight transport of railway transport makes it possible to shorten the time for preparation and adoption of a grounded decision by 10-15% compared to the existing system of preparation and adoption solutions. The application of the decision-making system in the system of training and combat training and special training of the military paramilitary personnel provided an opportunity to improve skills during training in assessing the situation and elaborating solutions for the elimination of emergencies in the transport of dangerous goods by rail, as well as developing the knowledge base of decision-making.

The results of the work are used at the State Economic-Technological University of Transport carried out the research work "Investigation of the state and trends of transport transportation development and development of proposals for the development of perspective transit freight flows through the territory of Ukraine" and research work (the code "Situation") of the Scientific Research, Design and Development Institute of

Micrography of the Ministry of Emergencies of Ukraine, developed the concept "Safe Railways". The results of the work are used by the State University of Economics and Technology of Transport in the educational process during the teaching of disciplines "Normative documents on the trains' safety" and "Transport Ecology".

The results of the work are implemented at the Department of Militarized Guard of Joint Stock Company "Ukrainian Railway" and at the Department of Ecology, Energy Management, Labor Protection and Civil Safety of the Mariupol City Council.

**Key words:** ecological danger, railway emergency situation, environment, decision making, information technology, decision support system, network center management.

### **List of publisher publications**

#### **Monographs**

1. Yuhimchuk S. V. Modeli avtomatizatsiyi viroblennya rekomendatsiy kerivniku gasinnya pozhezhi na zaliznichnomu transporti: monografiya / S. V. Yuhimchuk, M. D. Katsman. //Vinnitsya : UNIVERSUM, 2008. – 144 s.

2. Naukovi osnovi tehnogenno-ekologichnoyi bezpeki : monografiya [Elektroniyy resurs]. D. V. Zerkalov, M. D. Katsman, M. D. Adamenko, O. G. Rodkevich, T. V. Pichkur/ Za red. D. V. Zerkalova. – K.: «Osnova», 2014.

#### **Publications in professional editions**

3. Velikodniy V. V. Rozshirennya funktsionalnih mozhlivostey ASK VP UkrzalIznitsi / V. V. Velikodniy, M. D. Katsman, O. I. Kolikov, S. V. Yuhimchuk// Zaliznichniy transport Ukrayini. – 2009. – № 1. – S. 21–23.

4. Yuhimchuk S. V. Viktoristannya Intelektuainih tehnologiy dlya analizu nadzvichaynih situatsiy na zaliznichnomu transporti/ S. V. Yuhimchuk, T. O. Savchuk, M. D. Katsman // Sistemni doslidzhennya ta informatsiyi tehnologiyi. NTUU «KPI», m. Kiyiv, 2009. – № 4. – S. 53–61.

5. Yuhimchuk S. V. Produktsiyi modeli otsinyuvannya mozhiivogo rozvitku avariyyi na zaliznichnomu transporti pri perevezenni radioaktivnih rechovin / S. V. Yuhimchuk, M. D. Katsman, A. V. Voznyuk // Vesnik Hersonskogo NTU. – 2009. – № 1(34). – S. 438–440.



6. Katsman M. D. Informatsiyno-komp'yuterni tehnologiyi avtomatizatsiyi roboti kerivnikiv likvidatsiyi avariiv za uchastyu nebezpechnih vantazhiv / M. D. Katsman, V. K. Mironenko, O. G. Rodkevich // Zaliznichniy transport Ukrayini. – 2010. – № 6. – S. 50–53.

7. Katsman M. D. PIDvischennya effektivnosti boyovogo zastosuvannya pozhezhnih poyizdiv / M. D. Katsman, V. P. Lapin, V. K. Mironenko, O. G. Rodkevich, O. G. Strelko // Zaliznichniy transport Ukrayini. – 2011. – № 1. – S. 39–41.

8. Mironenko V. K. Faktori optimizatsiyi sistemi perevezen nebezpechnih vantazhiv / V. K. Mironenko, M. D. Katsman, O. G. Rodkevich // Vagonniy park. – 2011. – № 8. – S. 39 – 41.

9. Yu. V. Gerzhod Yu. V. Modernizatsiya pozhezhnih poyizdiv na zaliznitsyah krayini / Yu. V. Gerzhod, M. M. Gorbaha, V. M. Didkivskiy, M. D. Katsman.// Zaliznichniy transport Ukrayini. – 2012. – № 3/4. – S. 14 – 16.

10. Katsman M. D. Zastosuvannya pozhezhnih poyizdiv dlya likvidatsiyi transportnih podiy z nebezpechnimi vantazhami // Naukoviy visnik NLTU Ukrayini: zb. nauk.-tehnIch. prats. – L.: RVV NLTU Ukrayini. – 2012. 12. – Vip. 22. – S. 96 – 101.

11. Katsman M. D. Analiz rekomendovanih diy pidrozdiliv zaliznitsi u razi vitokiv, rozliviv ta rozsipiv nebezpechnih vantazhiv pri yih perevezenni zaliznichnim transportom / M. D. Katsman, V. K. Mironenko, M. I. Adamenko, M. M. Gorbaha // Zb. nauk. prats Derzhavnogo ekonomiko-tehnologichnogo universitetu transportu Ministerstva Infrastrukturi Ukrayini: Seriya «Transportni sistemi i tehnologiyi». – K.: DETUT, 2012. – Vip.21. – S. 152–159.

12. Katsman M. D. Viktoristannya zaliznichnih formuvan u medichnomu zabezpechenniI viysk ta naseleennya v istorichnomu ta suchasnomu aspektah / M. D. Katsman, P. V. Lapin, O. G. Rodkevich, O. A Goretskiy : zb. nauk. prats DETUT Seriya «Transportni sistemi i tehnologiyi». – Kiyiv, 2014. – Vip. 24. – S. 208 – 213.

13. Mironenko V. K. Perspektivi vikoristannya bezpilotnih litalnih aparativ u likvidatsiyi naslidkiv zaliznichnih transportnih podiy / V. K. Mironenko, P. V. Lapin, M. D. Katsman // Zaliznichniy transport Ukrayini. – 2015. – № 4. – S. 43–48.

14. Katsman M.D. Zastosuvannya innovatsiy nih metodik dlya zabezpechennya bezpeki zaliznichnogo transportu/ M. D. Katsman, V. A. Zhukov // Ukrayinska zaliznitsya. – 2017. – №7 – 8 (49–50). – S. 47– 51.

15. Zaporozhets O.I. Otsinyuvannya naslidkiv zaliznichnih avariynih situatsiy z nebezpechnimi vantazhami / O. I. Zaporozhets, I. V. Kovalets, M. D. Katsman // Sistema upravlinnya, navigatsiyi ta zv'yazku. Zb. nauk. prats Poltavskogo natsionalnogo tehničnogo universitetu im. Yu. Kondratyuka. Poltava, 2017. – № 6 (46). – S. 224-232.

#### **Publication in a professional foreign publication**

16. Katsman M. D. Ekologicheski negativnoe vliyanie zheleznodorozhnyih avariyy s opasnyimi gruzami / M. D. Katsman, N. I. Adamenko, Yu. A. Kulish, A. S. Ispulatoва //Vestnik Kokshetauskogo tehničeskogo instituta Ministerstva po chrezvyichaynyim situatsiyam Respubliki Kazahstan. – № 1(13). – Kokshetau.: KTI MChS RK. – 2014. – S. 10–18.

#### **Publications in science-editions**

17. Katsman M. D. Analiz vplivu na ekologičnii stan dovkillya osnovnih vlastivostey nebezpechnih vantazhiv, scho perevozyatsya zaliznichnim transportom/ M. D. Katsman, M. I. Adamenko // Sistemi obrobki Informatsiyi. Harkiv. – 2012. – Vip. 5(103). – S. 158–164.

18. Katsman M. D. Matematichna model viznachennya ymovirnostey mozhlivih ekologičnih naslidkiv zaliznichnih avariyy/ M. D Katsman // Zb. nauk. prats HUPS. Harkiv. – 2013. – Vip. 1(34). – S. 182–185.

19. Katsman M. D. Informatsiy na model identifikatsiyi ekologično nebezpechnih nadzvichaynih situatsiy / M. D. Katsman, O. G. Rodkevich // Zb. nauk. prats HUPS. Harkiv. – 2015. – Vip. 1(42). – S. 126–131.

20. Katsman M. D. Matematichni modeli ekologično nebezpechnih transportnih podiy / M. D. Katsman, V. K. Mironenko, V. I. Matsyuk // Sistemi obrobki informatsiyi. Harkiv. – 2015. – Vip. 3(128). – S. 125–131.

21. Mironenko V. K. Logiko-matematichna kontseptualna model likvidatsiyi naslidkiv nadzvichaynoyi situatsiyi pri zaliznichnih perevezennyah nebezpechnih

vantazhiv / V. K. Mironenko, M. D. Katsman, V. I. Matsyuk // Sistemi ozbroennya i viyskova tehnika. Harkiv. – 2015. – Vip. 1(41). – S. 168–172.

22. Mironenko V. K. Pidvischennya efektyvnosti boyovogo zastosuvannya pidrozdiliv likvidatsiyi naslidkiv nadzvichaynoyi situatsiyi pri zaliznichnih perevezennyah nebezpechnih vantazhiv z urahuvannyam ekologichnogo aspektu / V. K. Mironenko, M. D. Katsman, V. I. Matsyuk // Sistemi ozbroennya i viyskova tehnika. Harkiv. – 2015. – Vip.2(42). – S. 168–172.

23. Mironenko V. K. Matematichna model staniv ta nadlynosti zaliznichnoyi transportnoyi sistemi pri perevezenni nebezpechnih vantazhiv / V. K. Mironenko, M. D. Katsman, M. M. Gorbaha, V. I. Matsyuk // Sistemi obrobki Informatsiyi. Harkiv. – 2015. – Vip. 9(134). – S. 161–167.

24. Mironenko V. K. Peredumovi stvorennya SPPR schodo likvidatsiyi naslidkiv zaliznichnih nadzvichaynih situatsiy na osnovi merezhetsentrichnih metodiv upravlinnya / V. K. Mironenko, M. D. Katsman, V. I. Matsyuk // Sistemi obrobki Informatsiyi. Harkiv. – № 5(142). – 2016. – S. 163–171.

25. Katsman M. D. Praktichne zastosuvannya merezhetsentrichnih metodiv dlya upravlinnya reaguvannya na zaliznichni nadzvichayni situatsiyi / M. D. Katsman, V. K. Mironenko, V. I. Matsyuk // Zb. nauk. prats Harkivskogo unIversitetu Povitryanih sil. – Vip.2(47). – 2016. – S. 130–136.

26. Katsman M. D. Sistema pidtrimki priynyattya rishen merezhetsentrichnogo upravlinnya reaguvannyam na nadzvichayni situatsiyi / M. D. Katsman, V. K. Mironenko, V. I. Matsyuk // Sistemi ozbroEnnya i viyskova tehnika. – № 2(46). – 2016. – S. 89–93.

27. Katsman M. D. Matematichni modeli informatsiynih protsesiv pri likviduvanni zalznychnih nadzvichaynih situatsiy / M. D. Katsman, V. K. Mironenko, V. I. Matsyuk // Nauka i tehnika Povitryanih Sil Zbroynih Sil Ukrayini. – № 2(23). – 2016. – S. 126–134.

28. Adamenko M.I. Analiz isnuyuchih matematichnih modeley i komp'yuternih program dlya prognozuvannya rozpovsyudzhennya zabrudnyuyuchih rechovin v atmosferi/ M.I.Adamenko, M.D.Katsman, E.S. Biletska// Sistemi obrobki Informatsiyi. Harkiv. – 2018. – Vip. 1(151). – S. 155–162.

### **Publications in foreign science publications:**

29. Katsman M., Mathematical models of decision support system for the head of the fire-fighting department on railways/M. Katsman, O. Kryvopishyn, V. Lapin. – San Diego, USA. – Reliability: theory & applications. – Vol. 2.№ 03(22). –2011. – P. 86–93.

30. Katsman M. D. Problematic 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.

31. Katsman M. D., Mathematical 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. 28–39.

32. Lapin. V. I.S. Blioh (1836 – 1901) Railway magnate and peacemaker, prominent scientist-railroader: economist, statistician and financier / V. Lapin, O. Kryvopishyn, M. Katsman. – San Diego, USA. – Reliability: theory & applications. – Vol. 2.№ 04(23). –2011. – P. 149–155.

### **Materials and abstracts of reports at scientific and practical conferences:**

33. Yuhimchuk S. V. Sistema pidtrimki priynyattya rishen kerivnikiv likvidatsiyi avariyi i pozhezhi nebezpechnih vantazhiv/ S. V. Yuhimchuk, M. D. Katsman //Avtomatizatsiya: problemyi, idei, resheniya: mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya, 10-15 sentyabrya 2007g. : tezi dop.– Sevastopol, 2007 g. – S. 241–243.

34. Katsman M. D. Napryamok avtomatizatsii otsInki obstanovki i rishen kerivnikiv likvidatsiyi nadzvichaynih situatsiy ta gasinnya pozhezh nebezpechnih vantazhiv/ M. D. Katsman, S. V. Yuhimchuk // Marketing i logIstika v sistemI menedzhmentu pasazhirskih perevezen na zaliznichnomu transportI: i mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya, 15-18 veresnya 2009 r.: tezi dop. – Lviv, 2009. – S. 73–75.

35. Katsman M. D. Rozrobka modeli upravlinnya gasinnyam pozhezh ta reaguvannyam na avariynu situatsiyu na zaliznichnomu transporti / M. D. Katsman // Problemi informatiki i modelyuvannya: IX mizhnarodna naukovo-tehnichna konferentsiya, 26–28 listopada 2009 r. : tezi dop. – Harkiv, 2009. – S. 68.

36. Mironenko V. K. Naukovo-metodichni pidhodi do otsInki bezpechnosti sistemi zaliznichnih perevezen pasazhiriv i vantazhiv / V. K. Mironenko, M. D. Katsman, O. G. Rodkevich // Marketing i logistika v sistemI menedzhmentu pasazhirskih perevezen na zaliznichnomu transporti: II mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya, 20–22 veresnya 2011r.: tezi dop. – Kiyiv, 2011. – S. 120–122.

37. Katsman M.D. Pidhid do stvorenniya matematichnih modeley otsinyuvannya rizikiv pri perevezenni zaliznitsyami nebezpechnih vantazhiv/ M. D. Katsman, V. V. Malitskiy //InformatsIyni tehnologiyi v navigatsiyi i upravlinni: stan ta perspektivi rozvitku: II mizhnarodna naukovo-tehnichna konferentsiya», 16–17 lipnya 2011 r. tezi dop. – Kiyiv, 2011. – S. 33.

38. Katsman M.D. Otsinyuvannya i prognozuvannya nadzvichaynih situatsiy na transporti/ M. D. Katsman, V. K. Mironenko, O. G. Rodkevich, O. G. Strelko // Bezpeka zhittediyalnosti lyudini yak umova stalogo rozvitku suchasnogo suspilstva : IV mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya, 8–9 chervnya 2011r. tezi dop. – Kiyiv, 2011. – S. 300–302.

39. Katsman M.D. Problemi likvidatsiyi avarIy za uchastyu nebezpechnih vantazhiv pri yih perevezenni zaliznitsyami/ M. D. Katsman, V. V Malitskiy // Suchasni napryamki rozvitku InformatsIyno-komunikatsiy nih tehnologiy ta zasobIv upravlinnya: II mizhnarodna naukovo-tehnichna konferentsiya, 15–16 grudnya 2011 r.: tezi dop. – Kiyiv, 2011. – S. 60.

40. Katsman M. D. Ratsionalizatsiya zastosuvannya pozhezhnih poyizdiv dlya pidvischennya transportnoyi bezpeki na zaliznitsyah / M. D. Katsman, V. P. Lapin, O. G. Rodkevich // Problemi ta perspektivi rozvitku transportnih sistem v umovah reformuvannya zaliznichnogo transportu: upravlinnya, ekonomika i tehnologiyi: V mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya. – Ser. «Tehnika, tehnologiya», 15–16 bereznya 2011 r.: tezi dop. – Kiyiv, 2011. – S. 178–179.

41. Katsman M. D. Viktoristannya matematichnih modeley dlya optimizatsiyi chiselnosti pozhezhnih poyizdiv/ M. D. Katsman// Marketing i logistika v sistemah menedzhmentu pasazhirskih perevezen na zaliznichnomu transporti: III mizhnarodna

naukovo-praktichna konferentsiya, 18-20 veresnya 2012 r. : tezi dop. – Harkiv, 2012. – S. 122–127.

42. Katsman M. D. Matematichni modeli rozvitku ta likvidatsiyi zaliznichnih avariy z nebezpechnimi vantazhami / M. D. Katsman // Bezopasnost zhiznedeyatelnosti. Ekologicheskie i zdorove sohranyayuschie tehnologii: I ukrayinska naukova konferentsiya, 15, 16 bereznya 2013 r.: tezi dop. – Harkiv, 2013. – S. 10–11.

43. Katsman M. Veroyatnostnaya model opredeleniya effektivnosti deystviy po lokalizatsii ekologicheskikh posledstviy transportnykh sobyitiy / M. Katsman, S. Miroshnichenko // RIADENIE BEZPEČNOSTI ZLOŽITÝCH SYSTÉMOV: Zbornik vedecrých a odborných prác Medzinárodná vedecko-odborná konferencia, 24–28.02. 2014 r. : abstrakty, Liptovský Mikulaš, Slovakia 2014. – S. 265–272.

44. M. D. Katsman. Deyaki pitannya organizatsiyi likvidatsiyi nadzvichaynih situatsiy z nebezpechnimi vantazhami/ M. D. Katsman //Marketing i logistika v sisteml menedzhmentu pasazhirskih perevezen na zaliznichnomu transporti: IV mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya, 23–25 veresnya 2014 r. tezi dop. – Odesa, 2014. – S. 124–129.

45. Katsman M. D. NeobhIdnist zastosuvannya novitnih informatsiynih tehnologiy dlya organizatsiyi likvidatsiyi ekologichnih naslidkiv zaliznichnih nadzvichaynih situatsiy/ M. D. Katsman // Suchasni napryami rozvitku informatsiyno-komunikatsiynih tehnologiy ta zasobiv upravlinnya: IV mizhnarodna naukovo-tehnlchna konferentsiya, 4–5 grudnya 2014 r. tezi dop. – Poltava, 2014. – S. 69.

46. Katsman M. D. Deyaki problemi stvorenniya SPPR kerivnika operativnoyi grupi z likvidatsiyi ekologichno nebezpechnih zaliznichnih transportnih podiy / M. D. Katsman // Suchasni napryami rozvitku informatsiyno-komunikatsiynih tehnologiy ta zasobiv upravlinnya : V mizhnarodna naukovo-tehnlchna konferentsiya, 23,24 2015 r. tezi dop. – Poltava, 2015. – S. 52.

47. Mironenko V. K. Modelyuvannya vplivu chasu lokalizatsiyi ta likvidatsiyi avariynogo rozlivu naftoproduktu na harakteristiki zoni zabrudnennya verhnoyi budovi zaliznichnoyi kolyi / V. K. Mironenko, M. D. Katsman, O. A. Goretskiy // Strategiya

kachestva v promyshlennosti i obrazovanii: XI mezhdunarodnaya konferentsiya, 1–5 iyunya 2015 g. tezi dop. – Varna, 2015. – S. 113–117.

48. Katsman M. D. Informatsiyna pidtrimka organizatsiyi tsivlnogo zahistu na ob'ektah Ukrzaliznitsi / M. D. Katsman // Problemi avtomatizatsiyi: V mizhnarodna naukovo-tehnichna konferentsiya, 12–13 listopada 2015 r. tezi dop. – Poltava, 2015. – S. 63.

49. Katsman M. D. Metodologichni osnovi stvorenniya novitnoyi sistemi upravlinnya reaguvannyam na zaliznichni nadzvichayni situatsiyi/ M. D. Katsman // Marketing i logistika v sistemi menedzhmentu na zaliznichnomu transporti: VI mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya, 27-29 veresnya 2016 r. tezi dop. – Zaporizhzhya, 2016. – S. 129–141.

50. Katsman M.D. Deyaki shlyahi zabezpechennya transportnoyi bezpeki ob'ektiv zaliznichnoyi Infrastrukturi i ruhomogo skladu publchnogo aktsionernogo tovaristva «Ukrayinska zaliznitsya»/ M.D. Katsman, V.A. Zhukov // Problemi i perspektivi innovatsiyynogo rozvitku ekonomiki u konteksti integratsiyi Ukrayini v Evropeyskiy naukovo-innovatsiyyniy prostir: HHII mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya, 11-13 veresnya 2017 r. : tezi.dop. – Odesa, 2017r. – S. 102 – 112.

## ЗМІСТ

	Стор.
АНОТАЦІЯ .....	2
ЗМІСТ .....	24
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	27
ВСТУП.....	29
<b>РОЗДІЛ 1 ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ВІД БЕЗПЕКИ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА СТАНІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ.....</b>	<b>51</b>
1.1. Залізничний транспорт як складова мегасистеми навколишнього середовища.....	51
1.2. Причини виникнення та особливості залізничних аварійних ситуацій.....	61
1.3. Огляд та аналіз основних аспектів управління екологічною безпекою при ліквідуванні залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами.....	80
1.4. Вибір напрямку та завдань досліджень .....	90
<b>РОЗДІЛ 2 ВПЛИВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ НАСЛІДКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ З НЕБЕЗПЕЧНИМИ ВАНТАЖАМИ .....</b>	<b>93</b>
2.1. Основні властивості небезпечних вантажів, що впливають на довкілля.....	93
2.2. Кількісні та якісні характеристики негативного впливу небезпечних вантажів на довкілля.....	106
2.3. Прогнозування процесів розвитку ймовірних залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами та їхнього впливу на довкілля.....	113
2.4. Прогнозування значень параметрів небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами .....	127
2.4.1. Визначення значень параметрів небезпечних чинників аварійних ситуацій зі стисненими, зрідженими, скрапленими, розчиненими під тиском газами.....	129
2.4.2. Визначення небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій, пов'язаних з розлиттям небезпечних рідин.....	133
2.4.3. Визначення параметрів зони забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливі нафтопродуктів.....	138
2.5. Математичні моделі для прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері.....	140
2.6. Визначення еквівалентної кількості сильнодіючих отруйних речовин у первинній та вторинній хмарах.....	163
2.7. Оцінювання наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами.....	170
Висновки до розділу 2.....	180
<b>РОЗДІЛ 3 НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ</b>	<b>182</b>



	РЕАГУВАННЯМ НА ЗАЛІЗНИЧНІ АВАРІЙНІ СИТУАЦІЇ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ.....	
	3.1 Особливості реагування на залізничні аварійні ситуації .....	182
	3.2 Математична модель реагування на аварійну ситуацію під час транспортування небезпечних вантажів .....	197
	3.3 Особливості процесу прийняття рішень щодо ліквідації наслідків залізничної аварійної ситуації .....	212
	3.4 Раціональні способи реагування на аварійні ситуації з небезпечними вантажами та організації ліквідаційних робіт.....	220
	3.5 Ситуативні критерії ефективності дій оперативного штабу при ліквідуванні наслідків залізничних аварійних ситуацій.....	224
	3.5.1 Типові ситуації дій оперативного штабу пункту управління при ліквідуванні наслідків залізничних аварійних ситуацій .....	225
	3.5.2 Ситуації, спричинені актами незаконного втручання в діяльність залізничного транспорту.....	234
	3.5.3 Розрахунок величин відвернених збитків від забруднення атмосферного повітря.....	235
	3.6 Напрями підвищення ефективності застосування пожежних та відновних поїздів для ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами .....	237
	3.7 Основні завдання з підвищення ефективності функціональної підсистеми залізничного транспорту щодо запобігання і реагування на аварійні ситуації.....	244
	Висновки до розділу 3.....	245
РОЗДІЛ 4	НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ БЕЗПЕЧНОГО СТАНУ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ «НАВКОЛИНЄ СЕРЕДОВИЩЕ-АВАРІЙНИЙ ОБ'ЄКТ- ЛІКВІДАЦІЙНІ ПІДРОЗДІЛИ» .....	247
	4.1 Формальний опис дій аварійних підрозділів як процесів функціонування системи масового обслуговування без часових обмежень.....	249
	4.2 Формальний опис дій аварійних підрозділів як процесів функціонування системи масового обслуговування при часових обмеженнях.....	261
	4.3 Формальний опис дії оперативних з'єднань аварійних підрозділів.....	268
	4.4 Комплексне оцінювання впливу екологічно небезпечних аварійних залізничних ситуацій на довкілля.....	279
	Висновки до розділу 4 .....	280
РОЗДІЛ 5	ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИНЦИПУ МЕРЕЖЕЦЕНТРИЧНОГО УПРАВЛІННЯ РЕАГУВАННЯМ НА ЗАЛІЗНИЧНІ АВАРІЙНІ СИТУАЦІЇ.....	282
	5.1 Передумови реагування на залізничні аварійні ситуації з використанням принципу мережецентричного управління.....	284

5.2 Підвищення ефективності локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків на основі теорії мережецентричного управління.....	288
5.3 Науково-прикладні аспекти застосування принципу мережецентричного управління реагуванням на залізничні аварійної ситуації .....	309
5.4 Інформаційні процеси як фактор ефективності ліквідування наслідків аварійних ситуацій.....	325
Висновки до розділу 5 .....	340
ВИСНОВКИ.....	342
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	346
Додаток А Класифікація небезпечних вантажів та їх властивості.....	381
Додаток Б Дослідження впливу наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті на стан екологічної безпеки навколишнього середовища.....	391
Додаток В Особливості ліквідування та рекомендовані дії щодо локалізації екологічно небезпечних аварійних ситуацій з різними класами небезпечних вантажів, а також можливі склади пожежних аварійно-рятувальних і відновних поїздів.....	397
Додаток Г Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.....	411

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПАТ «Укрзалізниця» - Публічне акціонерне товариство «Українська залізниця»

УЗ – Укрзалізниця

СППР – система підтримки прийняття рішень

АСУ – автоматизована система управління

АСК СП УЗ-Є – єдина автоматизована система керування вантажними перевезеннями Укрзалізниці

ДАК МОНУ – Державна атестаційна комісія Міністерства освіти і науки України

ПТЕ – правила технічної експлуатації залізниць України

БПЛА – безпілотний літальний апарат

ЛЗР – легкозаймисті речовини

ЛЗГ – легкозаймисті тверді речовини

ТАС – типова аварійна ситуація

СР – самореактивна речовина

ТДВР – тверда десенсибілізована вибухова речовина

СДОР – сильнодіюча отруйна речовина

СЦБ – система централізованого блокування

АПК – аварійно-польова команда

ППС паливо-повітряна суміш

ВНЗ – вибухонебезпечна зона

НЧАС – небезпечні чинники аварійної ситуації

СЕС санітарно-епідеміологічна служба

СМО – система масового обслуговування

ОПР – особа, яка приймає рішення

СПУ – сіткове планування і управління

СЦ – ситуаційний центр

ІТСУК – інформаційно-телекомунікаційні системи управління

АРМ – автоматизоване робоче місце

КГП – керівник гасіння пожежі

ІТ – інформаційна технологія

ІСУ – інформаційна система оперативного управління

СОД – система обробки даних

ЕС – експертна система

БД – база даних

БЗ – база знань

СД – сховище даних

КОШ – керівник оперативного штабу

## ВСТУП

Залізничний транспорт, що є однією з базових галузей економіки України, забезпечує перевезення значного обсягу різноманітних за своїми властивостями небезпечних вантажів, які при недотриманні заходів безпеки та застороги при їх транспортуванні можуть створювати загрозу для працівників транспорту, населення та навколишнього природного середовища.

Безпека перевезень є найвищим пріоритетом різних ланок залізничного транспорту, яка залежить від синергетичної взаємодії багатьох складових транспортного процесу – властивостей вантажу, технічного стану рухомого складу, колії та об'єктів інфраструктури залізниць, кваліфікації працівників, стану навколишнього середовища тощо.

Запобігання виникненню залізничних аварійних ситуацій по суті є підготовкою та реалізацією комплексу правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання техногенної та природної безпеки, оцінювання рівнів ризику, завчасне реагування на загрозу виникнення такої аварійної ситуації на основі даних моніторингу, експертизи, досліджень і прогнозів щодо можливого перебігу подій з метою недопущення подальшого розвитку такої ситуації або пом'якшення її можливих наслідків. Іншим пріоритетним завданням є удосконалення функціональної підсистеми «Сили і засоби реагування на аварійні ситуації на залізничному транспорті», яка є складовою частиною Державної системи реагування на аварійні ситуації [1-3].

Безпека залізничних перевезень та її забезпечення є комплексною науково-практичною проблемою, яка охоплює різні аспекти та напрямки.

*Організаційно-технологічний аспект* охоплює такі напрямки проблеми:

– ефективне управління локалізацією залізничних аварійних ситуацій та ліквідацією їхніх наслідків, особливо з небезпечними вантажами, а також внаслідок несанкціонованого втручання в діяльність залізничного транспорту;

– переоснащення існуючих пожежних поїздів у пожежно-рятувальні з більш ефективними засобами пожежогасіння та наданням необхідного обсягу медичної допомоги потерпілим, а також оснащення існуючих відновних поїздів потужним обладнанням для постановки на рейки аварійного рухомого складу;

- організація безперервного екологічного моніторингу місця виникнення і розвитку залізничної аварійної ситуації та ходу робіт з локалізації та ліквідації її наслідків за допомогою новітніх засобів відеоспостереження, зокрема, із використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА);

- впровадження інноваційних засобів і технологій охорони вантажів і об'єктів залізничного транспорту, зокрема запровадження моніторингу рухомого складу з небезпечними вантажами на шляху прямування та належне матеріально-технічне забезпечення структурних підрозділів функціональної підсистеми «Сили і засоби реагування на аварійні ситуації на залізничному транспорті» необхідними технікою, матеріалами і засобами.

Вирішення наведених вище проблем потребує врахування й інших аспектів, до кола яких відносяться науково-методологічний аспект і аспект підготовки кадрів.

*Науково-методологічний аспект* охоплює такі проблеми:

- проведення досліджень причин виникнення і розвитку залізничних аварійних ситуацій, розроблення та впровадження методів і математичних моделей прогнозування змін величин їхніх небезпечних чинників для вироблення своєчасних заходів щодо евакуації людей, рухомого складу і техніки, а також запровадження заходів з локалізації та ліквідації таких ситуацій;

- проведення наукових досліджень і створення інформаційних моделей та баз даних, що стосуються характеристик небезпечних вантажів, умов їх перевезення та наслідків порушення цих умов для побудови відповідних математичних моделей як основи майбутніх систем підтримки прийняття рішень (СППР);

- створення математичних моделей різноманітних, взаємопов'язаних організаційно-технологічних процесів перевезень пасажирів та вантажів для СППР, що забезпечує ефективність функціональної підсистеми реагування на аварійні ситуації;

- створення ієрархії систем підтримки прийняття рішення керівниками оперативних штабів ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій з урахуванням їхньої природи та прогнозу розвитку на основі розроблених математичних моделей;

- наукове обґрунтування та розроблення техніко-експлуатаційних вимог щодо підвищення ефективності системи організації руху поїздів та внутрішніх

залізничних коридорів з перевезення небезпечних вантажів під час залізничних аварійних ситуаціях та ліквідуванні їх наслідків.

*Аспект кадрового забезпечення* функціональної підсистеми реагування на залізничні аварійні ситуації на залізничному транспорті потребує розв'язання таких завдань:

– підготовка кваліфікованих та проблемно-орієнтованих керівних кадрів залізниць, здатних адекватно оцінювати обстановку та приймати найбільш прийнятні рішення;

– підготовка кваліфікованих працівників воєнізованої охорони залізничного транспорту, здатних виконувати свої завдання в екстремальних ситуаціях;

– перепідготовка та підвищення кваліфікації рядового та начальницького складу воєнізованої охорони в галузі протидії залізничним аварійним ситуаціям та схоронності вантажів, здатних уміло використовувати інноваційні технічні засоби та озброєння.

Вочевидь, ці взаємопов'язані аспекти вдосконалення функціональної підсистеми «Сили і засоби реагування на надзвичайні ситуації на залізничному транспорті» потребують комплексного підходу для їх розв'язання, причому тільки спільними зусиллями залізниць та науково-педагогічних працівників в галузі залізничного транспорту.

**Актуальність теми.** Перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом за певних умов може створювати ситуації, що загрожують екологічному стану довкілля та життєдіяльності людини. При цьому залізничний транспорт не може вплинути ані на обсяг, ані на номенклатуру та властивості вантажів, що надаються відправником до перевезення згідно зі встановленими правилами.

Отже, перевезення небезпечних вантажів і надалі зберігатиме масовий характер, оскільки безпечність перевезень перевізнику доводиться підтримувати в умовах катастрофічного старіння технічних засобів та рухомого складу залізничного транспорту. Відповідно до цього різко зростають ризики виникнення транспортних подій.

У зв'язку з цим виникає **наукове протиріччя**: з одного боку, через соціально обґрунтоване зростання матеріальних потреб суспільства існує

необхідність у перевезенні залізничним транспортом великої кількості вантажів, зокрема небезпечних. З іншого боку, збереження екологічної рівноваги потребує зменшення екологічної небезпеки, яка може бути наслідком техногенних аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів.

Це, своєю чергою, зумовлює наукову проблему зменшення негативного впливу на довкілля та життєдіяльність людини небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами.

Проблемам обґрунтування теоретичних основ оцінювання техногенного ризику, розробленню за їх допомогою раціональних форм управління екологічною безпекою при аваріях і катастрофах на різноманітних промислових об'єктах, у тому числі й з небезпечними речовинами, матеріалами та виробами, нині приділяється значна увага.

Основою управління силами під час ліквідування наслідків залізничних аварійних ситуацій є рішення керівника оперативного штабу – керівника робіт з ліквідування аварійної ситуації. Управління такими силами здійснюється в умовах ризику та невизначеності, які обумовлені неповнотою інформації про стан аварійного рухомого складу і об'єктів залізничної інфраструктури, розвиток небезпечних чинників аварійної ситуації, їхнього негативного впливу на довкілля і людей, дефіциту часу, необхідного для зменшення такого впливу та відновлення руху поїздів у можливо короткий термін.

Таким чином, це створює **наукове протиріччя**: з одного боку, для прийняття своєчасного обґрунтованого раціонального рішення щодо реагування на аварійну ситуацію керівником оперативного штабу необхідно у найкоротший час проаналізувати та усвідомити великий обсяг інформації про обстановку, що склалася, виробити та оцінити варіанти рішень і вибрати найприйнятніший з них. З іншого боку, для зменшення сумарного часу на прийняття ним рішення щодо реагування на таку ситуацію, необхідно мати ефективну систему управління з функціями автоматизованої обробки інформації і вироблення варіантів рішення.

Отже, постає науково-прикладна проблема створення і використання інформаційних технологій для автоматизованої переробки інформації, розроблення та впровадження систем комп'ютерної підтримки рішень під час ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій при перевезення небезпечних вантажів з



використанням мережецентричного принципу управління складаними ієрархічними системами.

Вагомий внесок у вирішення теоретичних та практичних проблем управління екологічною безпекою при ліквідуванні наслідків аварійних ситуацій з небезпечними речовинами та формування наукових основ створення систем підтримки прийняття рішень зробили такі науковці та фахівці як С. В. Бойченко, В. М. Плахотнік, Ю. В. Зеленько, В. Г. Попов, Ф. І. Сухов, С. І. Музикіна, І. Я. Переста, Л. О. Яришкіна, В. А. Акимов, Е. О. Макарова, В. І. Медведєв, І. В. Мартинюк, Д. А. Моїсеєнко, А. М. Цуріков, О. І. Ларичев, Д. А. Поспелов, В. М. Глушков, В. О. Геловані, М. А. Башликов, О. В. Петровський, Е. О. Трахтенгерц, І. З. Баширін, В. А. Рижов, М. Ріхтер, J. L. Kolodner, P. Бергман, А. Аамонд та ін.

Проте доводиться визначити, що наявний науковий доробок у проблемах залізничних аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів стосується здебільшого аналізу їх статистичних даних, тяжкості наслідків тощо та надання певних рекомендацій щодо їх профілактики для недопущення в майбутньому.

Водночас аналіз наукових досліджень показує, що дотепер не було жодної наукової праці з проблеми розвитку наукових основ управління екологічною безпекою при ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами.

Методологічні засади організації управління екологічною безпекою під час ліквідування залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами дозволять:

- створити новітні системи і технології відеоспостереження за еволюцією небезпечних чинників аварійної ситуації, а також діями ліквідаційних підрозділів та їхніх з'єднань з метою отримання вірогідної інформації про поточний стан аварійної ситуації і результати реагування на таку ситуацію;

- розробити метод прогнозування розвитку небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами щодо їхнього шкідливого впливу на довкілля та життєдіяльність людини, а також методи прогнозування результатів дій ліквідаційних підрозділів та їхніх з'єднань;

– сформувати єдиний інформаційно-комунікаційний простір з об'єднанням усіх джерел і споживачів інформації на основі новітніх мережевих та інформаційних технологій, систем супутникового та цифрового зв'язку;

– створити СППР для комп'ютерної підтримки рішення керівника оперативного штабу ліквідації наслідків аварії. За допомогою такої СППР здійснювати збирання, оброблення, структурування, зберігання і оперативне використання інформації, підготовку варіантів рішення, ефективне і своєчасне планування заходів реагування, своєчасне доведення планів до виконавців, аналізування інформації про виконання запланованих заходів, вироблення (при необхідності) координуючих заходів;

– розробити метод визначення ефективності функціонування технічних засобів ліквідаційних підрозділів під час ліквідування наслідків залізничних аварійних ситуацій. Створити на основі цих методів комп'ютерні програмні комплекси управління цими технічними засобами за допомогою відповідних механізмів, приладів і систем. Обмін між інформацією між такими програмними комплексами і СППР дозволить здійснювати прийняття рішення на технологічному рівні реагування на аварійні ситуації;

– організувати професійну підготовку працівників оперативних штабів, ліквідаційних підрозділів та їхніх з'єднань діям в аварійних ситуаціях під час перевезення небезпечних вантажів.

Запланований науковий підхід суттєво відрізняється від існуючих тим, що він є орієнтованим на актуальні практичні питання безпеки залізничних перевезень і підтримання встановленого рівня екологічної безпеки та дозволяє вирішувати у комплексі нагальні завдання щодо найбільш раціонального використання різномірних сил і засобів для локалізації аварійних ситуацій та ліквідації їхніх наслідків за допомогою принципів мережецентричного управління у можливо короткий термін на оперативному, тактичному та технологічному рівнях управління.

Мережецентричний принцип організації систем управління дозволяє реалізувати режим ситуаційної поінформованості (усвідомлення керівниками усіх рівнів управління єдиної інформаційної картини обстановки), має вагому прогностичну складову та єдине інформаційне середовище, що дозволяє

зосередити зусилля на виконанні завдань реагування і зменшення шкідливого впливу небезпечних чинників аварійних ситуацій з небезпечними вантажами на довкілля та життєдіяльність людини з максимальним використанням усієї інформації для формування рішень керівника оперативного штабу.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційне дослідження виконувалось відповідно до Стратегії екологічної безпеки соціально-економічного розвитку України та Транспортної стратегії України на період до 2020 року в рамках наукової тематики Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України «Дослідження стану і тенденції розвитку транзитних перевезень та розроблення пропозицій щодо освоєння перспективних транзитних вантажопотоків через територію України» (державний реєстраційний номер 0112U006664), Академії внутрішніх військ МВС України: «Розроблення механізму взаємодії між підрозділами внутрішніх військ МВС України та спеціальними формуваннями сил цивільного захисту МНС України при виникненні надзвичайних ситуацій» (шифр «Ситуація»), 2010р., на замовлення начальника Головного управління – командувача внутрішніх військ МВС України, Концепції «Безпечна залізниця» Публічного акціонерного товариства «Українська залізниця». У даних науково-дослідних роботах автор брав участь як виконавець.

**Ідея роботи** полягає у зменшенні шкідливого впливу на довкілля та життєдіяльність людини негативних чинників аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом внаслідок удосконалення управління реагуванням на такі аварійні ситуації.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи – створення методологічних засад організації управління екологічною безпекою у процесах ліквідування наслідків залізничних аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів з використанням інформаційних технологій на основі мережецентричного управління.

Для досягнення мети роботи визначені наступні завдання:

-проаналізувати сучасний стан перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом та функціонування системи залізничного транспорту як мегасистеми взаємодії з довкіллям;

-виявити причини виникнення залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами і розробити типові сценарії розвитку таких ситуацій на основі статистичних даних про їх виникнення та аналізу небезпечних властивостей їхнього впливу на довкілля та життєдіяльність людини;

-вдосконалити існуючі моделі та комп'ютерні програми визначення величин небезпечних для довкілля та життєдіяльності людини чинників залізничних аварійних ситуацій при транспортування газів і легкозаймистих речовин;

-розробити метод проведення розрахунків величин атмосферного забруднення внаслідок залізничної аварійної ситуації, пов'язаної з викидом хімічно небезпечної легкозаймистої речовини;

-провести дослідження функціонування залізничної транспортної системи при реагуванні на аварійні ситуації під час перевезення небезпечних речовин;

-дослідити можливість застосування класичних методів теорії масового обслуговування та адаптувати ці методи для обґрунтування і моделювання різних схем організації проведення аварійно-відновних робіт, прогнозування та оцінювання результативності дій ліквідаційних підрозділів та їхніх оперативних з'єднань щодо відновлення безпечного стану і належного рівня екологічної безпеки залізничної транспортної системи;

-розробити для застосування в базі знань системи підтримки прийняття рішень структурно-логічні схеми дій оперативного штабу щодо ліквідування наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами та опрацювати метод продукцій для створення бази знань системи підтримки прийняття рішень з метою вироблення ефективних рішень, створення нових механізмів і технологій інформаційного забезпечення при ліквідуванні наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами;

-дослідити функціонування залізничної системи реагування на небезпечні для довкілля та життєдіяльність людини аварійні ситуації під час перевезення небезпечних вантажів;

-на основі наведених методів, моделей і технологій створити методологічні засади організації управління екологічною безпекою під час ліквідування наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами на залізничному транспорті.

*Об'єкт дослідження* – процеси ліквідування наслідків залізничних аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів як джерел екологічно-шкідливого впливу на довкілля і життєдіяльність людини.

*Предмет дослідження* – методи, моделі та технології управління екологічною безпекою під час ліквідування наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами.

*Методи дослідження* – в роботі використано комплексний системний підхід, який включає аналіз та узагальнення світового досвіду та власних досліджень з питань розвитку наукових основ управління екологічною безпекою під час ліквідування наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті; здійснено аналізування статистичних даних щодо залізничних перевезень небезпечних вантажів, аварійних ситуацій за участю таких вантажів, їхнього шкідливого впливу на довкілля та життєдіяльність людини. На основі охоронно-відновлювальних функцій механізму реагування на аварійні ситуації та теорії систем розроблено структурно-логічні схеми ймовірних процесів розвитку типових аварійних ситуацій з небезпечними вантажами. На підставі методів дослідження операцій і математичного моделювання, розроблено математичну модель функціонування системи залізничних перевезень у разі виникнення аварійних ситуацій під час транспортування небезпечних вантажів, структурно-аналітичні моделі визначення величин небезпечних для довкілля і життєдіяльності людини чинників аварійних ситуацій під час транспортування газів і легкозаймистих речовин та структурно-логічні схеми дій оперативного штабу з ліквідації аварійних ситуацій. На основі теорії турбулентної дифузії за допомогою моделей комплексу CALPUFF, системи Mathcad та пакету аналізу Excel проведено числове моделювання розвитку аварійної ситуації із стандартною залізничною цистерною під час транспортування бензину. На підставі методів теорії систем масового обслуговування здійснено формальний опис функціонування системи «навколишнє середовище – аварійний об'єкт – ліквідаційні підрозділи». За допомогою програмного комплексу Mathcad здійснено математичне моделювання функціонування ліквідаційних підрозділів та їхніх з'єднань в аварійних ситуаціях з небезпечними вантажами. На основі методів штучного інтелекту, теорії інформації та принципу мережецентричного управління складними динамічними ергатичними ієрархічними системами розроблений

алгоритм формування бази знань СППР керівника оперативного штабу, обґрунтовано критерії доцільності передачі функцій прийняття рішень на відповідний рівень управління.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Розв'язується актуальна науково-прикладна проблема зменшення шкідливого впливу на довкілля і життєдіяльність людини негативних чинників аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом за рахунок удосконалення управління реагуванням на такі аварійні ситуації.

Наукову новизну визначають такі теоретичні та експериментальні результати досліджень:

***вперше:***

-проаналізовано функціонування системи залізничного транспорту як мегасистеми взаємодії з довкіллям та сучасний стан перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом. Виявлено, що існує антагоністична суперечність між природними і техногенними чинниками аварійної ситуації, які створюють екологічну небезпеку розв'язування суперечності, та цілеспрямованими діями ліквідаційних підрозділів, на зосередження та організацію функціонування яких ще необхідні певні зусилля і час з боку органу управління.

-запропоновано метод оцінювання часової залежності інтенсивності викиду легкозаймистих речовин з аварійного рухомого складу, яка інтегрована у сучасну модель атмосферного перенесення таких речовин задля врахування часової мінливості джерела викиду і розрахування часової залежності концентрації цієї речовини в атмосфері на різних відстанях від аварійного рухомого складу.

-запропонована математична модель визначення ймовірності станів і рівня екологічної безпеки системи залізничних перевезень небезпечних вантажів під час аварійних ситуацій з такими вантажами залежно від ефективності реагування на ці аварійні ситуації.

-на основі принципу мережецентричного управління різнохарактерними силами і засобами створенні методологічні засади управління екологічною безпекою під час ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами;

***удосконалено:***

-математичну модель у вигляді програмного комплексу прогнозування параметрів небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій при транспортуванні легкозаймистих і горючих речовин введенням в неї відповідних комп'ютерних процедур на основі розробленого методу визначення параметрів зон забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливі нафтопродуктів, а також комп'ютерні процедури оцінювання ймовірності ураження людини, будівель і споруд від вибуху паливо-повітряної суміші та теплового випромінювання;

-математичні моделі оцінювання ефективності дій ліквідаційних підрозділів та їхніх з'єднань, які ґрунтуються на використанні методу псевдостанів теорії систем масового обслуговування щодо опису їхнього функціонування при ліквідуванні наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами з урахуванням часових характеристик зосередження та продуктивності роботи, а також параметрів небезпечних чинників таких аварійних ситуацій;

-методи прогнозування параметрів небезпечних чинників аварійних ситуацій з небезпечними речовинами на різних промислових об'єктах, які адаптовано до умов перебігу залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, а також порядок визначення ситуативних критеріїв ефективності і послідовності дій оперативних штабів пунктів управління ліквідуванням наслідків таких ситуацій з метою створення інформаційної технології вироблення управлінських рішень для бази знань системи підтримки прийняття рішень (СППР).

***набуло подальшого розвитку:***

-визначення та обґрунтування, з урахуванням негативних властивостей небезпечних вантажів, основних ймовірних процесів типових сценаріїв розвитку залізничних аварійних ситуацій і виявлення причинно-наслідкових зв'язків цих процесів з характеристиками їхніх наслідків для створення теоретичної основи побудови бази знань системи підтримки прийняття рішень керівників оперативних штабів ліквідації наслідків таких аварійних ситуацій;

-застосування методу продукцій штучного інтелекту для формування бази знань системи підтримки прийняття рішень керівників оперативних штабів пунктів управління ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, яка відрізняється від існуючих використанням продукційних моделей

знання, що дає змогу формального опису аварійної ситуації та опрацювання у середовищі системи підтримки прийняття рішень варіантів управлінських рішень задля зменшення шкідливого впливу на довкілля та життєдіяльність людини наслідків таких аварійних ситуацій.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність результатів досліджень полягає в тому, що для системи підтримки прийняття рішень керівника оперативного штабу ліквідування наслідків аварійних ситуацій при транспортуванні небезпечних вантажів використовуються математичні моделі прогнозування розвитку небезпечних для довкілля чинників типових аварійних ситуацій, математичні моделі визначення ефективності дії ліквідаційних підрозділів, аналізу обстановки і вироблення варіантів рішень. Запропонований принцип мережецентричного управління ліквідаційними підрозділами із ситуаційних центрів залізничних пунктів керування з використанням СППР у складі єдиної автоматизованої системи управління вантажними перевезеннями залізничного транспорту, що дає змогу скоротити час на підготовку та прийняття обґрунтованого рішення та інтенсифікувати проведення комплексу ліквідаційних заходів на 10–15 % у порівнянні з існуючою системою підготовки та прийняття рішень. Застосування СППР у системі навчально-бойової та професійної підготовки начальницького складу воєнізованої охорони дало можливість покращити навички під час навчання в оцінці обстановки і виробленні рішення щодо ліквідації аварійних ситуацій при перевезенні небезпечних вантажів залізничним транспортом, а також розвинути базу знань СППР.

Отримані результати роботи були використані Міністерством інфраструктури України при розробленні проекту Закону України «Про критичну інфраструктуру та її захист», при виконанні Державним економіко-технологічним університетом транспорту науково-дослідної роботи «Дослідження стану і тенденцій розвитку транспортних перевезень та розроблення пропозицій щодо освоєння перспективних транзитних вантажопотоків через територію України» і науково-дослідної роботи (шифр «Ситуація») науково-дослідного, проектно-конструкторського та технологічного інституту мікрографії МНС України. Результати роботи використовуються у навчальному процесі в інституті залізничного транспорту



Державного університету інфраструктури та технологій під час викладання дисциплін «Нормативні документи з безпеки руху поїздів» та «Транспортна екологія».

Результати роботи впроваджені у Головному управлінні воєнізованої охорони Публічного акціонерного товариства «Укрзалізниця» та у Департаменті з питань екології, енергоменеджменту, охорони праці та цивільної безпеки Маріупольської міської ради.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення, що містяться в дисертації, отримані автором самостійно. Теоретичне та експериментальне дослідження виконане особисто, а впровадження розробок у практику – при безпосередній участі автора. Наукові праці [8, 56, 66, 105, 110, 154, 155, 178, 179, 221,] виконані самостійно. У публікаціях у співавторстві здобувачу належать: [55] – аналіз впливу на довкілля аварійних ситуацій з небезпечними вантажами; математичні моделі оцінювання обстановки і прийняття рішень на ліквідування наслідків аварійних ситуацій з пожежами небезпечних вантажів; структура СППР для керівника гасіння пожежі; [61] – математичні моделі формалізації процесу залізничних перевезень, транспортних подій і ризиків при перевезенні небезпечних вантажів, ліквідації аварійних ситуацій з такими вантажами та оцінювання дій пожежних підрозділів; [106, 153, 189] – структура СППР керівника гасіння пожежі та ліквідації наслідків аварій з небезпечними вантажами; [101, 104, 108, 152] – продукційні моделі автоматизованого вироблення в СППР варіантів рішення керівника гасіння пожежі небезпечних вантажів та ліквідації шкідливих для довкілля та людини наслідків аварійних ситуацій з такими вантажами; структура бази знань СППР; [50, 65, 176, 177, 184,] – впровадження на залізничному транспорті України модульних автоматизованих пожежно-рятувальних поїздів; [24, 25, 68, 102, 103, 306,] – аналіз шкідливих для довкілля та людини впливів властивостей небезпечних вантажів внаслідок залізничних аварійних ситуацій та рекомендованих дій щодо ліквідації таких впливів; [16, 173] – пропозиції щодо використання безпілотних авіаційних комплексів для вдосконалення функціональної підсистеми реагування на залізничні транспортні події; [11, 62, 70, 109, 156, 157, 158, 159,] – математичні моделі ліквідування екологічно небезпечних наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами; аналіз і узагальнення

отриманих результатів; [4, 6, 49] – структура бази знань СППР керівника ліквідації наслідків залізничних аварій; застосування мережецентричних методів управління реагування на залізничні аварійні ситуації; [5] – метод визначення раціональності передачі функцій прийняття рішень на відповідний рівень управління, структура та функцій ситуаційного центру управління ліквідацією наслідків залізничних аварійних ситуацій; [7] – математичні моделі та обчислювальний експеримент динаміки обміну інформацією в контурі керування «пункт управління – ліквідаційні підрозділи»; [209] – статистичний аналіз перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом, аналіз і узагальнення результатів комп'ютерного моделювання забруднення атмосфери під час аварійної ситуації з легкозаймистою речовиною; [193] – математична модель визначення параметрів забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливанні нафтопродуктів; [336] – завдання і критерії забезпечення транспортної безпеки; [323] – аналіз існуючих математичних моделей і комп'ютерних програм для прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи й основних її положень доповідались і обговорювались на таких симпозіумах, науково-технічних конференціях, нарадах і семінарах: міжнародній науково-практичній конференції «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (м. Севастополь, 2007 р.); I міжнародній науково-практичній конференції «Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті» (м. Львів, 2009 р.); IX міжнародній науково-технічній конференції. «Проблеми інформатики і моделювання» (м. Харків, 2009 р.); II міжнародній науково-практичній конференції «Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті». (м. Київ, 2011); II міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в навігації і управлінні: стан та перспективи розвитку» (м. Київ, 2011 р.); IV міжнародній науково-практичній конференції «Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства» (м. Київ, 2011 р.); II міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (м. Київ, 2011 р.); V Міжнародна науково-практична конференція. «Проблеми та перспективи розвитку транспортних

систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології».(м. Київ, 2011 р.); III міжнародній науково-практичній конференції «Маркетинг і логістика в системах менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті» (м. Харків, 2012 р.); I Української наукової конференції «Безопасность жизнедеятельности. «Экологические и здоровьесохраняющие технологии, 2013» (м. Харків, 2013 р.); Medzinárodná vedecko-odborná konferencia «RIADENIE BEZPEČNOSTI ZLOŽITÝCH SYSTÉMOV» (м. Liptovský Mikuláš, 2014 г.); IV міжнародній науково-практичній конференції «Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті» (м. Одеса, 2014 р.); IV міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (м. Полтава, м. Баку, м. Белгород, м. Кіровоград, м. Харків, 2014 р.); V міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (м. Полтава, м. Баку, м. Белгород, м. Кіровоград, м. Харків, 2015 р.); XI международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании» (м. Варна, 2015 р.); III міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації» (м. Черкаси –Баку–Бельсько-Бяла–Полтава, 2015 р.); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Маркетинг і логістика в системі менеджменту на залізничному транспорті» (м. Запоріжжя, 2016 р.); XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми і перспективи інноваційного розвитку економіки у контексті інтеграції України в Європейській науково-інноваційний простір» (м. Одеса, 2017р.).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано дві монографії [55, 61], 30 наукових статей [4 – 7, 11, 16, 24, 25, 65, 70, 101, 103 –106, 108, 109, 152, 153, 156 – 159, 173, 176 – 178, 184, 209], з яких: 5 наукових статей [11, 103, 108, 109, 157] у закордонних наукових виданнях, 12 наукових статей [4 –7, 25, 70, 105, 152, 156, 158, 159, 323] у виданнях, які індексуються науково-метричними базами даних. Додатково дисертаційних досліджень викладено у 18 публікаціях матеріалів наукових конференцій [8, 49, 50, 56, 62, 66, 68, 102, 110, 154, 155, 179, 189, 193, 221, 305, 306, 336].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації 420 сторінки з них 316 основного тексту. Дисертація містить 73 рисунки, 16 таблиць, 338 найменувань використаних джерел та 4 додатки.

У **вступі** розкриті суть та стан проблеми, обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету, основні завдання дослідження, наукову новизну отриманих результатів. Розглянуто практичне значення та впровадження результатів дисертації. Наведено відомості про публікації та апробацію роботи.

У **першому розділі** дисертаційної роботи досліджено взаємозалежність станів залізничної транспортної системи з безпекою перевезень та екологічною безпекою довкілля і життєдіяльності людини. Встановлено, що залізничний транспорт є складною розосередженою, ергатичною, динамічною, самоорганізаційною системою з механізмом біфуркації, якій притаманна властивість збереження безпечності свого функціонування, що не виключає застосування цілеспрямованих дій для виходу з точок біфуркації. Під час залізничних аварійних ситуацій (знаходженні системи у точці біфуркації) поведінка системи стає нестійкою, виникає суперечність між природними механізмами утворення і розвитку такої ситуації, відбувається залучення у неї об'єктів, рухомого складу залізниці та навколишнього середовища, які діють несвідомо за своїми різнохарактерними законами, та персоналом оперативного штабу із своїм керівником, який свідомо і цілеспрямовано керує діями ліквідаційних підрозділів. Суперечність між сторонами ситуації (природні, техногенні чинники та цілеспрямовані дії ліквідаційних підрозділів) є антагоністичною, її особливістю є «знаходження» природних механізмів на місці розв'язування суперечності, тоді як зосередження ліквідаційних підрозділів та організація їхніх дій оперативним штабом ще потребує певних зусиль і часу.

Розглянуті причини виникнення, розвитку і наслідків залізничних аварійних ситуацій під впливом внутрішніх і зовнішніх ініціюючих подій, визначені заходи, спрямовані на забезпечення безпеки залізничних перевезень у сталому режимі функціонування та при регламентованих впливах, а також заходи щодо локалізації та ліквідації таких ситуацій. Проаналізовані існуючі математичні моделі

прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері щодо створення програмного комплексу прогнозування розвитку небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій для СППР.

Проведений аналіз джерел, присвячених проблемам управління екологічною безпекою під час ліквідування аварійних ситуацій з небезпечними речовинами на промислових об'єктах і транспорті, який дозволив окреслити основні напрями наукових досліджень з цих проблем. Сформульовано напрям й визначено завдання досліджень, які розглянуто у наступних розділах.

**У другому розділі** дисертаційної роботи досліджено вплив на довкілля і життєдіяльність людини залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами.

На основі статистичних даних результатів вантажних перевезень небезпечних вантажів залізничним транспортом проаналізована динаміка перевезення таких вантажів за період з 2006 р. по 2017 р.

На основі основних і вибухопожежних властивостей визначена відносна кількість небезпечних вантажів різних класів безпеки, яким притаманні певні види небезпек для рухомого складу, об'єктів залізничної інфраструктури і людей, що утворюються у аварійних ситуаціях при взаємодії таких вантажів з повітрям, водою, кислотами, лугами, нафтопродуктами, а також при їх нагріванні, горінні та вибуху, що дає змогу визначити негативні наслідки аварійних ситуацій, а відтак найбільш ефективно забезпечити пожежні та відбудовні підрозділи залізниць засобами реагування на такі ситуації.

Визначені основні ймовірні процеси розвитку типових аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, що дало можливість виявити причинно-наслідкові зв'язки розвитку процесів у цих ситуаціях з характеристиками їх наслідків, розробити структурно-аналітичні схеми ймовірних процесів розвитку типових аварійних ситуацій з вантажами різних класів безпеки та створити теоретичну основу для бази знань СППР керівників оперативних штабів з ліквідації наслідків аварійних ситуацій усіх рівнів управління.

Для удосконалення комп'ютерних програм прогнозування розвитку небезпечних чинників аварійних ситуацій при транспортуванні газів і легкозаймистих речовин, які створені за участю автора і тривалий час

використовуються, запропоновано введення в них процедур визначення параметрів забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливі нафтопродуктів та оцінювання ймовірності ураження людей, будівель і споруд від вибуху паливо-повітряної суміші.

Розглянуто основні фізико-хімічні процеси горіння і вибуху небезпечних вантажів різних агрегатних станів. З розглянутих процесів розвитку таких аварійних ситуацій можна дійти до висновку, що навколишнє природне середовище має деяку інерційність реагування на зовнішню дію небезпечних чинників аварії, протидіє ним щодо зміни свого стану тобто має властивості самопідтримання і саморегуляції, що, за певних умов, може призвести до гальмування катастрофічних процесів аж до їх припинення.

Для прогнозування наслідків залізничних аварійних ситуацій за участю небезпечних вантажів у роботі розглянуто екологічну систему «аварійний рухомий склад – навколишнє середовище» як марківську систему масового обслуговування, що дало змогу виявити співвідношення між параметрами цієї системи, які призводять до катастрофічного наслідку.

Для визначення величин забруднення зон уражень, врахування часової мінливості джерела викиду, розрахунку нестационарної часової залежності концентрацій небезпечних речовин в атмосфері на різних відстанях від джерела викиду розроблена та інтегрована у сучасну математичну модель перенесення забруднюючих речовин метод визначення часової залежності викиду небезпечних для довкілля та життєдіяльності людини хімічно небезпечних легкозаймистих речовин. Цей метод значно розширює прогностичні можливості існуючого методу визначення небезпечних чинників аварійних ситуацій з небезпечними вантажами третього класу безпеки.

Проведено комп'ютерний модельний експеримент щодо визначення величин небезпечних для довкілля та життєдіяльності людини чинників залізничної аварійної ситуації під час транспортуванні автомобільного бензину АІ-95.

**Третій розділ** дисертаційної роботи присвячений науково-методичним основам управління реагуванням на залізничні аварійні ситуації з небезпечними вантажами. Встановлено, що при настанні такої аварійної ситуації керівнику

оперативного штабу в складних умовах відсутності повної та вірогідної інформації про причинно-наслідкові зв'язки між компонентами аварійної ситуації необхідно приймати певну кількість індивідуальних, колегіальних, інформаційних організаційних та оперативних рішень, спрямованих на узгодження, координацію та управління підлеглими пунктами управління і ліквідаційними підрозділами, яка може перевищувати його можливості щодо прийняття таких рішень та/або впливати на їх обґрунтованість. Прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо локалізації залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами та ліквідуванні їх наслідків повинно здійснюватися за допомогою систем підтримки прийняття рішень, для створення яких слід використовувати запропоновані математичні моделі прогнозування розвитку таких ситуацій та структурно-логічні схеми дій керівників оперативного штабу.

Формалізовано систему залізничних перевезень небезпечних вантажів у вигляді орієнтованого графу станів безпечного функціонування системи, настання залізничної аварійної ситуації, її оцінювання, локалізації та ліквідації її наслідків. Розроблені математичні моделі, які доведені до рівня практичних розрахунків ймовірностей перебування системи залізничних перевезень небезпечних вантажів у стані безпечного функціонування у залежності від тих чи інших технологічних та організаційних заходів підтримання системи у стані надійності. Доведено, що оперативність прийняття своєчасного обґрунтованого рішення з локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків дає очевидний синергетичний ефект у вигляді значного скорочення не лише часу ліквідаційних робіт, а й більш ніж пропорційного йому зменшення негативних наслідків аварійної ситуації.

Розроблені структурно-логічні схеми дій оперативного штабу у типових ситуаціях ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій, які ґрунтуються на ситуативних критеріях прийняття рішень – збалансованих термінів відновлення руху поїздів (сталого функціонування транспортної системи) і необхідних для цього ресурсів для використання у базі знань СППР керівника оперативного штабу. Обґрунтовані параметри майбутнього покоління пожежних аварійно-рятувальних поїздів та їх забезпечення засобами локалізації та ліквідації наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті.

**У четвертому розділі** дисертаційної роботи здійснено наукове обґрунтування ефективності процесів відновлення безпечного стану функціонування системи «навколишнє середовище-аварійний об'єкт-ліквідаційні підрозділи». З'ясовано, що в процесі організації ліквідаційних робіт необхідно забезпечувати певні ситуативні критерії їхньої ефективності, досягнути яких можна лише на підставі науково обґрунтованого прогнозування успішності завершення цих робіт у визначені терміни та при наявних ресурсах.

Доведена можливість застосування класичних методів теорії масового обслуговування та адаптовано ці методи для обґрунтування та моделювання різних схем організації проведення аварійно-відновних робіт структурними підрозділами функціональної підсистеми залізничного транспорту, формування мережесистем (з'єднань) таких підрозділів, забезпечення їх необхідними ресурсами та прогнозування і оцінювання результативності дій таких підрозділів. Встановлені кількісні співвідношення між інтенсивністю впливу небезпечних чинників залізничної аварійної ситуації, часом прибуття, розгортання і продуктивністю дій ліквідаційних підрозділів та ефективністю виконання ліквідаційних робіт.

Доведено, що суттєве зменшення негативного впливу наслідків залізничної аварійної ситуації на довкілля і людину можливе при скороченні терміну проведення ліквідаційних робіт, а також при зменшенні часу зосередження підрозділів та застосуванні сил і засобів необхідної для успішного проведення робіт продуктивності, а збільшення часу зосередження потребує збільшення у рази продуктивності таких сил та засобів. Встановлено, що якщо засоби ліквідації наслідків залізничної аварійної ситуації не відповідають її характеру та/або вкрай малопродуктивні, то навіть при їх вчасному зосередженні на місці ліквідації, вони не будуть ефективними, а з іншого боку, навіть якщо засоби ліквідації достатньо ефективні, але зосередження їх на місці транспортної події відбулося із запізненням, то вони також не дадуть ефекту.

**У п'ятому розділі** дисертаційної роботи досліджені теоретичні основи оптимальних форм управління реагуванням на залізничні аварійні ситуації з небезпечними вантажами. Запропоновано формальний опис такої ситуації за допомогою системи продукційних правил для створення бази знань та опрацювання в середовищі СППР керівника оперативного штабу рекомендацій щодо ліквідації її



наслідків. Розроблений алгоритм формування бази знань експертної системи, що є складовою СППР, яка може використовуватися як для опрацювання рішень у аварійних ситуаціях, що дозволить скоротити час на прийняття обґрунтованого управлінського рішення, так й для навчання персоналу пунктів управління процедурам прийняття рішень з використанням СППР.

Доведено, що застосування в умовах невизначеності часових параметрів ліквідаційних процесів комплексу методів мережецентричного управління та мережевого планування дозволяє обґрунтувати терміни успішного виконання заходів реагування та створити методологічну основу СППР.

Обґрунтовано критерії доцільності передачі функцій прийняття рішень на відповідний рівень управління, запропоновано структуру та функції ситуаційного центру управління ліквідацією залізничної аварійної ситуації з небезпечними вантажами.

Встановлено, що для зменшення інформаційних потоків у контурі управління «пункт управління – ліквідаційні підрозділи» доцільним є вироблення рішення керівника оперативного штабу не на один, а одразу на декілька етапів проведення ліквідаційних робіт, для чого необхідні відповідні математичні моделі прогнозування розвитку небезпечних чинників залізничної аварійної ситуації та результатів дій цих підрозділів. Запропоновано для опису інформаційних процесів та перевірено обчислювальними експериментами математичні моделі, які адекватно відображають динаміку обміну інформацією в контурі керування «пункт управління – ліквідаційні підрозділи» при будь-якій кількості служб та підрозділів, зайнятих ліквідаційними роботами, та етапів цих робіт.

Встановлено, що в умовах дефіциту часу процес надходження різноманітних даних до керівника оперативного штабу набуває лавиноподібного характеру, що ускладнює сприйняття та аналіз ним цієї інформації, у зв'язку з чим для ефективного вироблення рішення з ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій є критично необхідним застосування системи підтримки прийняття рішення, яка повинна базуватися на розгалуженій високопродуктивній мережі зв'язку та сучасних засобах спостереження, наприклад, безпілотних літальних апаратів.

Доведено, що швидкої стабілізації інформаційного потоку на мінімальному рівні можна домогтися із збільшенням числа ліквідаційних робіт, які знаходяться в межах горизонту планування, тобто при збільшенні граничного часу ефективної дії рішення особи, яка приймає рішення на проведення більш одного етапу робіт. Це спонукає до розгляду необхідності прийняття ним рішення на проведення якомога більшого числа послідовних етапів ліквідаційних робіт.

**Додатки** містять класифікацію небезпечних вантажів різних класів безпеки та особливості ліквідування аварійних ситуацій з різними класами безпеки, дослідження впливу наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті на стан екологічної безпеки довкілля, а також прогнозування значень параметрів небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами. Представлені можливі склади вітчизняних та закордонних пожежних і аварійно-рятувальних поїздів, а також відновного поїзда. Надані акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

# РОЗДІЛ 1

## ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ВІД БЕЗПЕКИ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА СТАНІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ

### 1.1. Залізничний транспорт як складова мегасистеми навколишнього середовища

Залізничний транспорт є виробничо-технологічним комплексом організацій і підприємств залізничного транспорту загального користування, призначений для забезпечення потреб суспільного виробництва і населення країни в перевезеннях у внутрішньому і міжнародному сполученнях та надання інших транспортних послуг усім споживачам без обмежень за ознаками форм власності та видів діяльності тощо [1]. Очевидно, що таке визначення залізничного транспорту потребує розширення, з урахуванням його впливу на навколишнє середовище, яке щодо нього є «мегасистемою».

Комплекс організацій і підприємств залізничного транспорту утворюється сукупністю його функціонально-технічних систем (господарств), що взаємодіють між собою та довіллям. Такі господарства містять у собі досить відносно однорідні за функціональним призначенням технічні засоби і пов'язані з їхнім функціонуванням технологічні процеси.

Функціонально-технічні системи залізничного транспорту є складними динамічними ієрархічними системами пристроїв, споруд, підрозділів, відділень, відповідних служб залізниць, департаментів Публічного акціонерного товариства «Українська залізниця» (ПАТ «Укрзалізниця»).

Технологічні процеси господарств, які здійснюють перевізний процес, складаються з певних операцій щодо перетворення, за допомогою відповідних технічних засобів і устаткування, матеріальних об'єктів, енергії та інформації (операндів технологічного процесу) для вироблення визначених їм функцій з метою відтворення усього комплексу перевізного процесу.

Управління технологічними процесами, виконання окремих операцій та їхнє регулювання здійснюється відповідними працівниками господарств. Такі працівники, у межах своєї компетенції, беруть участь у здійсненні комплексу організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безаварійної роботи та утримання в постійній справності залізничних споруд, колій, рухомого складу, різноманітного обладнання, механізмів і пристроїв щодо забезпечення безпеки перевезень з метою запобігання появі неприпустимого ризику, пов'язаного з травмуванням або загибеллю людей, заподіянням збитків майну та навколишньому природному середовищу.

З метою виявлення суттєвих обставин, які впливають на стан безпеки перевезень, на залізницях здійснюються обстеження технічних засобів, пристроїв і споруд, аналізується рівень дотримання органами управління вимог нормативних актів з питань безпеки перевезень і проводяться службові розслідування аварійних ситуацій [2, 9,10,12].

Все це спрямоване на попередження виникнення небезпечних подій, підвищення рівня професійної підготовки персоналу з питань аналізу обставин, які призвели до виникнення аварійної ситуації, прийняття та реалізації управлінських рішень щодо здійснення організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки перевезень, збереження здоров'я людей, матеріальних цінностей та навколишнього середовища.

Іншими словами, залізничний транспорт є ергатичною системою, функціонування якої пов'язане з так званим «людським фактором», якій притаманні властивість еволюціонування та функція прийняття рішень у аварійних ситуаціях [8, 13 – 16].

При нормальному функціонуванні системи, у результаті здійснення усього комплексу перевізного процесу, матеріальні та біологічні об'єкти переміщуються у просторі без погіршення здоров'я пасажирів і товарних якостей вантажів з вини транспортної системи.

На технологічні процеси функціонування господарств залізниці впливають результати технологічних процесів взаємодіючих господарств, навколишнє середовище та діяльність працівників господарств у вигляді потоків операндів.

Результатами здійснення таких технологічних процесів є функції господарств, на досягнення яких й призначений відповідний технологічний процес, або побічні функції, які негативно впливають на саме господарство, перевізний процес в цілому та навколишнє середовище у вигляді скидань відходів та викидів в атмосферу забруднюючих речовин вихлопних газів рухомого складу і колійних машин, шуму та електромагнітного випромінювання, вивільнення небезпечних речовин в результаті аварій і катастроф тощо.

Варто зазначити, що залізничний транспорт впливає на навколишнє середовище й як споживач паливно-мастильних матеріалів, лісових, водних і земельних ресурсів.

Структура негативного впливу залізничного транспорту на довкілля включає також порушення стійкості природного ландшафту через розвиток ерозії і зсувів, забруднення землі нафтопродуктами, лугами, кислотами, оксидами вуглецю і азоту, сажею тощо, тобто побічними продуктами різних технологічних процесів технічного обслуговування рухомого складу і виробництв залізничних підприємств, а також через попадання в атмосферу та на поверхню землі сипучих вантажів при перевезенні їх на відкритому рухомому складі [13, 15, 24, 25].

Функціональні особливості залізничного транспорту обумовлені наявністю загальної мети, якій підпорядковані цілі його функціонально-технічних систем і підприємств (компоненти системи), складним характером виробничих процесів та випадковим характером зовнішніх впливів.

Все це істотним чином впливає на його структурні та експлуатаційні характеристики, які, у свою чергу, пов'язані з великою територіальною розосередженістю господарств і підприємств залізниць із різноманітними технологічними процесами, що взаємодіють між собою та природним середовищем, а також наявністю множини зворотних внутрішніх зв'язків між такими компонентами.

Це обумовлює значну увагу, яка приділяється забезпеченню належного технічного рівня рухомого складу і технічних засобів об'єктів інфраструктури залізниць, впровадженню нової техніки і технологій, організації професійної підготовки працівників, удосконалення системи управління безпекою перевезень, охорони праці і навколишнього середовища [8–10].

Розглядаючи вищенаведене у межах парадигм системного аналізу та синергетичного підходу, можна дійти до висновку, що залізничний транспорт є складною системою із змістовними ознаками розчленованості, цілісності, сполученості та неадитивності [16, 19 – 21, 23, 26 – 28].

Ознаку розчленованості залізнична транспортна система має тому, що існує можливість виділити у неї фіксоване число складових частин (компонент) різних рівнів, нижчий з яких складається з надалі нероздільних частин (елементів).

Ознака цілісності притаманна цій багатокomпонентній системі, в тому, що в результаті взаємодії компонент утворюється нова якість (загальносистемна властивість), яка відсутня у окремих компонентах, і в тому, що кожна компонента системи дістає інші якості (системні властивості компонент) у порівнянні з властивостями, які притаманні цим компонентам поза системою.

З цілісністю залізничної транспортної системи тісно пов'язане поняття емерджентності – виникнення нових зв'язків і властивостей при об'єднанні елементів у підсистеми, а підсистем – у систему. Суть цього явища полягає у накопиченні та підсиленні одних властивостей компонент одночасно з нівелюванням, ослабленням інших властивостей за рахунок їхньої взаємодії.

Ознака сполученості системи полягає в тому, що цілісні властивості системи та особливі властивості її компонент формуються за рахунок (внутрішньорівневих та міжрівневих) співвідношень, зв'язків та взаємодій за допомогою речовини, енергії та інформації.

За формальною ознакою, поняття «співвідношення» і «зв'язки» є різними, але вони є взаємоутворюючими і взаємообумовлюючими поняттями, загальною основою яких є взаємодія. З одного боку, співвідношення ініціюють утворення

зв'язків і взаємодії, а з іншого – є результатом виникнення чи руйнування зв'язків у процесі розвитку взаємодій.

Для того, щоб дія мала певний ефект (результат) потрібно, щоб її величина перевищувала деякий поріг.

Наявність порогів впливів як зовнішніх, так й внутрішніх чинників, дозволяє встановити області констативного (сталого) функціонування будь-якої системи.

За наявності впливу на систему з перевищенням певного порогу, відбувається порушення її функціонування, у результаті чого вона з вихідної констативної області переходить у іншу констативну область. Причому нова констативна область може характеризувати властивостями, які не притаманні такій системі [28 – 34].

Значний вплив на функціонування системи справляє оточуюче середовище. Оточуюче середовище, у свою чергу, може складатися з інших систем та природного середовища, які взаємодіють з системою. Відомі чотири ситуативні класи такої взаємодії: сприяючі, нейтральні, протидіючі та змішані [34].

Сприяючим є середовище, яке позитивно впливає на функціонування і розвиток системи, допомагаючи досягненню її цілей і підвищенню ефективності. Протидіюче середовище, навпаки, пригнічує функціонування й знижує ефективність, перешкоджає досягненню цілей. У випадку нейтральності, середовище безпосередньо не впливає на систему, але цей вплив теж треба враховувати, бо нейтральний стан є нестійким, при якому можуть формуватися умови переходу до сприяння чи протидії. Для змішаного середовища притаманні усі перераховані вище варіанти його впливу на систему.

Ознака неадитивності залізничної транспортної системи проявляється в тому, що при розділенні системи на компоненти, неможливо виявити її цілісні властивості. Ця ознака є наслідком так званого синергетичного ефекту, зміст якого полягає в тому, що у процесі взаємодії компонентів системи відбувається їх самосинхронізація, тобто під дією зовнішніх або внутрішніх факторів вони починають вести себе таким чином, що поведінка кожного компонента набуває

узгоджену спрямованість, наслідком якої є результат, що перевищує суму ефектів дій кожного окремого компонента окремо.

Залізничний транспорт є прогресуючою системою, розвиток якої йде у напрямку досягнення нею своєї потенційної ефективності за рахунок зміни її складу і структури. Доказом цього є заходи, що нині здійснюються в Укрзалізниці й пов'язані з реформуванням залізничного транспорту, відповідно до Державної цільової програми [35].

Розподілена (гетерогенна) система залізничного транспорту є дисипативною, бо має постійні матеріальні, енергетичні та інформаційні взаємодіяння між своїми компонентами (господарствами), а також з компонентами інших систем і навколишнім природним середовищем.

Важливою особливістю залізничного транспорту є його здатність функціонувати у заданих межах параметрів, які забезпечують виконання транспортної роботи й унеможливають (мінімізують рівень) порушення, що є потенційною, або наявною загрозою для життя й здоров'я людей, збереженості (схоронності) залізничного транспорту, вантажів та екологічного стану довкілля, а також змінювати свої параметри у разі потенційної загрози, щоб унеможливити її подальший розвиток, тобто має властивість безпечності свого функціонування [9].

Іншими словами залізничний транспорт є самоорганізаційною системою, якій притаманні функції адаптивності, цілеспрямованості та цілепокладання, об'єднаних у особливому синергетичному з'єднанні, що дозволяє вийти на високий рівень самозбереженості. Така система має механізми забезпечення форми і структури в умовах зовнішніх впливів, діє відповідно до плану, параметри якого визначені поза системою, має здатність самостійно формувати цілі та планувати свою поведінку залежно від зовнішніх обставин [36 – 43].

Залізничний транспорт, як самоорганізаційна система, має певну особливість свого функціонування, яка характерна тим, що в одних умовах вона веде себе детерміновано, а у інших – імовірносно, тобто має здатність «самостійно вибирати» поведінку у процесі свого функціонування.



Вибір поведінки здійснюється не постійно, а в особливих областях, названих біфуркаціями [16, 32, 39 – 41]. У вузькому математичному розумінні біфуркаціями є виникнення, при певному критичному значенні параметра, нового (іншого) рішення системи диференціальних рівнянь, які описують рух системи. На рис.1.1 приведений приклад траєкторії руху системи з послідовними біфуркаціями. Під дією низки факторів у визначеній точці ( $D_1$ ) відбувається розгалуження траєкторії руху системи. У цій точці система ніби самостійно вибирає новий напрям свого подальшого руху. Після вибору, рух системи детермінується до наступної точки біфуркації ( $D_2$ ).

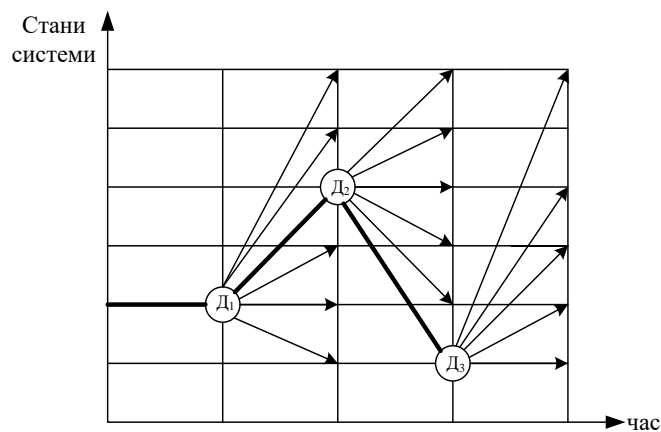


Рис.1.1. Послідовні біфуркації системи

У точці  $D_2$  знову відбувається вибір і процес повторюється. У загальному випадку точно напроорокувати моменти виникнення біфуркацій й, особливо, результати вибору неможливо, бо ані точки біфуркацій, ані варіанти вибору траєкторії завчасно невідомі й самій системі.

Механізм біфуркації належить до одного з найважливіших механізмів самоорганізації складних систем. Біфуркаційний процес має універсальний характер, механізм якого є джерелом виникнення і розвитку різних форм організації матерії [32].

У точці біфуркації, тобто у критичних порогових точках, поведінка системи стає нестійкою, й система може еволюціонувати в одному з декількох альтернативних напрямів, таким чином виникає суперечність між існуючим станом

системи, внутрішніми процесами та процесами взаємодії системи з оточуючим середовищем.

Під суперечністю мають на увазі становище, при якому що-небудь одне виключає інше, несумісне з ним або протилежне йому [44, 45].

Суперечність є причиною самоорганізації систем, що передбачає самостійне формування їх складу, структури та властивостей, а також руху без зовнішнього примусового впливу.

Суперечність має слабку передбачуваність, бо неможливо точно, як це вже підкреслювалося вище, завчасно пророкувати розвиток процесу суперечності.

Застосування системних методів дозволяє всебічно проаналізувати суперечність. Слушно проаналізувати проблему, розробити модель процесу, провести її дослідження та указати на те, де може виникнути у системі дещо непередбачуване та загрозове, а також дати обґрунтовані рекомендації щодо заходів, які не треба вживати й чого треба застерігатися.

Під дією суперечностей структура системи змінюється у двох напрямках – диференціації та інтеграції. У результаті інтеграції суперечливий процес набуває властивості цілісності та інерційності, а під дією диференціації він подрібнюється на підпроцеси, спричинює перехідні внутрішньосистемні процеси, які пов'язані з утворенням нових позитивних та негативних зворотних зв'язків. Позитивні зворотні зв'язки порушують локальну стійкість, виводять систему з рівноваги, а негативні зворотні зв'язки – поновлюють локальну стійкість та повертають систему у стан рівноваги.

Причини виникнення та розвитку суперечностей не лежать на поверхні, вони, як правило, глибоко приховані, інформація про них, особливо на перших етапах виникнення, має неоднозначний характер.

Суперечності проявляються у їхній здатності знаходити слабкі, найменше стійкі місця у структурі системи, де вони проходять, і зосереджено впливати на них. Тому залізничні аварії і катастрофи, природні та техногенні катаклізми є тільки прикметами протікання якихось суперечливих процесів, під дією яких, рано чи пізно, відбувається розкриття системи, й вона стає здатною обмінюватися

речовиною, енергією та інформацією з оточуючими її системами і довкіллям. Тобто суперечності грають роль регуляторів, які розкривають та закривають системи, й тим самим порушують їх рух до термодинамічної рівноваги.

Дослідження природних і техногенних катаклізмів свідчать, що з одного боку, їх виникнення носить псевдоперіодичний характер у результаті дій внутрішніх протилежно спрямованих сил (соціальних, фізичних, хімічних, механічних тощо), що виводять систему із рівноваги, й вони ж повертають її у дотеперішню чи нову область рівноваги або частково чи повністю руйнують систему.

З іншого боку, такі катаклізми втягують у свою орбіту інші об'єкти, між якими раніше були відсутні будь-які протиріччя. Це можна пояснити тим, що у відкритих системах відбуваються як процеси дисипації (розсіювання) суперечностей, так й процеси адсорбції (всмоктування) зовнішніх суперечностей, що призводить до утворення ланцюгів суперечностей, які за певних умов можуть трансформуватися у лавиноподібний слабо керований процес, що охоплює все більше об'єктів техносфери і довкілля.

У термінах системного аналізу та синергетичного підходу у аварійні ситуації, *сторонами суперечності*, з одного боку, виступають *природні механізми* утворення і розвитку цієї ситуації, природні механізми залучення у таку ситуацію об'єктів, рухомого складу залізниці та довкілля, які діють несвідомо за своїми механічними, фізичними, біологічними, хімічними та іншими законами. З другого боку виступає відповідний *оперативний штаб* на чолі із своїм керівником, який свідомо керує структурними підрозділами сил і засобів постійної готовності оперативного реагування на аварійні ситуації, що свідомо і цілеспрямовано здійснюють локалізацію цієї ситуації та ліквідацію її наслідків [16].

Суперечність між цими сторонами є антагоністичною, бо є несумісними цілі протидіючих сторін. «Перемогу» може отримати тільки один з учасників: або аварійна ситуація буде локалізована і ліквідована у встановлений термін з мінімальними матеріальними втратами і шкодою природному середовищу, або шкода довкіллю, матеріальні та людські втрати будуть максимальні при тривалій відсутності нормального функціонування залізниці.

Іншими словами, така суперечність має риси ергодичності, тобто деякої визначеності у можливих варіантах її кінцевих станів. Суперечність розвивається за багатоетапною схемою «дія – протидія», коли на дію однієї сторони впливає дія іншої. Причому кожна із сторін має свої «способи дії», на які інша сторона повинна відповісти адекватно, тобто виконується деяких баланс сил. У протилежному випадку одна із сторін буде мати перевагу й кінцевий результат буде очевидним.

Треба відмітити, що природні сили механізму розвитку аварійної ситуації вже «знаходяться» на місці розв'язування суперечності, а ліквідаційні підрозділи потребують певних зусиль та часу щодо зосередження на місці транспортної події, тому що знаходяться на місцях постійної дислокації (так би мовити, природа має «фору»).

Дії оперативного штабу з локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків носять свідомий характер в умовах нестачі інформації про обстановку, що склалася, та природні механізми розвитку аварійної ситуації. Це викликає необхідність постійного здобування інформації про обстановку в зоні аварії та прогнозування параметрів розвитку аварійної ситуації з метою визначення можливих ризиків її впливу на рухомий склад, об'єкти та довкілля, необхідної кількості сил і засобів та вироблення тактики своїх дій, тобто такий процес має ітеративний характер.

Спираючись на ствердження синергетики про те, що для виведення техногенного об'єкта із катастрофічного стану потрібно витратити енергії набагато більше, ніж її виділяється при катастрофічному стрибку (так зване явище гістерезису у поведінці складних систем), на місці аварії необхідно зосередити не менше ніж розрахункову кількість сил і засобів достатньої продуктивності для локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків [16, 34, 40, 46 – 48].

На процес прийняття рішення впливає також інформація про обставини аварійної ситуації, характеристики вантажу, можливість пожежі чи вибуху, наявність у зоні аварії потенційно небезпечних об'єктів, об'єктів з людьми, рельєф місцевості, метеорологічні умови та інші чинники, властиві залізничному транспорту.

Тому, на наш погляд, для дослідження механізмів взаємодії конкуруючих у системах сил та процесів розширення дій суперечностей, є доцільним створення відповідних математичних моделей.

Нині для моделювання процесів функціонування складних систем застосовуються імітаційне моделювання, математичні моделі теорій інформації, ігор, статистичних рішень, масового обслуговування, а також лінійного, чисельного, динамічного, нелінійного, дискретного програмування тощо.

Функціонування детерміновано-імовірносних систем часто моделюють за допомогою марковських процесів, математичний апарат яких є добре розвинутим та зручним для практичних розрахунків й може служити конструктивним інструментом аналізу таких систем, бо у цьому випадку легше зрозуміти, яка інформація про хід процесу є суттєвою для вироблення оптимального рішення.

## **1.2. Причини виникнення та особливості залізничних аварійних ситуацій**

Важливою складовою забезпечення безпечності залізничної транспортної системи є своєчасне й ефективне реагування на аварійні ситуації техногенного та природного характеру з метою ліквідації їх наслідків.

Ліквідація наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті є комплексом організаційно-технічних заходів, спрямованих на запобігання загрози людям, захист навколишнього природного середовища, збереження рухомого складу, вантажу, об'єктів інфраструктури залізниці, відновлення руху поїздів і маневрової роботи у як найкоротший короткий термін [1, 9, 49 – 51, 56, 57].

Аварійною ситуацією на залізничному транспорті вважаються умови, які відмінні від умов нормального перевезення вантажів, пов'язані із загорянням, витіканням, розсипанням небезпечного вантажу, пошкодженням тари або рухомого складу з небезпечним вантажем і які можуть призвести чи призвели до вибуху, пожежі, отруєння, опромінення, захворювань, опіків, обморожень, загибелі людей і тварин, небезпечних для природного середовища наслідків [57].

Аварійними ситуаціями на залізничному транспорті вважаються ситуації, які призвели до порушення нормальних умов життя і діяльності людей на об'єкті чи території, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом або іншими чинниками, що призвели (можуть призвести) до загибелі людей, тварин і рослин, значних матеріальних збитків та (або) завдати шкоди довкіллю [57].

За прийнятою на залізничному транспорті класифікацією, до залізничних транспортних подій належать події, що призвели до загибелі або травмування людей, пошкодження технічних засобів, вантажу, об'єктів залізничної інфраструктури, дезорганізації руху чи завдали шкоди довкіллю. До таких подій, які розрізняються тяжкістю наслідків, належать катастрофи, аварії, серйозні інциденти та інциденти [51, 56].

Так, катастрофою є подія з тяжкими наслідками, що призвела до зіткнення пасажирських або вантажних поїздів з іншими поїздами або рухомим складом залізничного транспорту, сходження рухомого складу в пасажирських або вантажних поїздах на перегонах і станціях унаслідок яких одна або більше осіб загинули чи шість або більше осіб травмовано і (або) пошкоджено рухомий склад залізничного транспорту до ступеня виключення його з інвентарного парку в обсязі від трьох одиниць.

До аварії на залізничному транспорті належать такі транспортні події, коли від однієї до п'яти осіб травмовано і (або) пошкоджено рухомий склад залізничного транспорту до ступеня виключення його з інвентарного парку.

Серйозний інцидент на залізничному транспорті є транспортною подією, що виникла під час руху рухомого складу залізничного транспорту, яка могла призвести до аварії, та унаслідок якої рухомий склад залізничного транспорту ушкоджено до ступеня капітального ремонту. Інцидент на залізничному транспорті характеризується тим, що він не закінчується серйозним інцидентом.

Загальними ознаками транспортних подій, що виникають під час руху залізничного рухомого складу є [51]:

– загибель або травмування людей;

- пошкодження рухомого складу, вантажу, об'єктів інфраструктури залізничного транспорту;
- дезорганізація руху;
- істотне погіршення стану навколишнього середовища.

Відповідно до територіального поширення, дезорганізації руху та обсягів технічних і матеріальних ресурсів, що необхідні для ліквідації наслідків транспортних подій, транспортні події розподіляються таким чином [51]:

- до загальнодержавного рівня належать транспортна подія, яка розвивається на території двох і більше залізниць або загрожує транскордонним перенесенням, чи внаслідок якої повна перерва у русі (у разі неможливості об'їзду місця події іншими ділянками залізниць) вантажних поїздів на транзитних напрямках багатоколіїної або одноколіїної дільниці становить понад 48 годин, а пасажирських поїздів на міжнародних напрямках – понад 24 години, а також, коли для її ліквідації необхідні матеріальні і технічні ресурси в обсягах, що перевищують власні можливості окремої залізниці;

- до регіонального рівня належить транспортна подія, яка розгортається на території двох і більше дирекцій залізничних перевезень однієї залізниці або загрожує перенесенням на територію суміжної залізниці, а також, коли для її ліквідації необхідні матеріальні і технічні ресурси в обсягах, що перевищують власні можливості підрозділів залізничного транспорту, територіально розташованих у межах цих дирекцій;

- до місцевого рівня належить транспортна подія, яка виходить за межі окремого об'єкта, загрожує поширенням самої події або її вторинних наслідків на довкілля, сусідні об'єкти, інженерні споруди, а також у разі, коли для її ліквідації необхідні матеріальні і технічні ресурси в обсягах, що перевищують власні можливості відокремлених структурних підрозділів залізничного транспорту, територіально розташованих у межах однієї дирекції;

- до об'єктового рівня відносяться всі транспортні події, які не підпадають під зазначені визначення.

Ініціюючими або вихідними подіями для залізничних аварій і катастроф можуть бути як внутрішні, так й зовнішні щодо рухомого складу і об'єктів події (рис. 1.2).

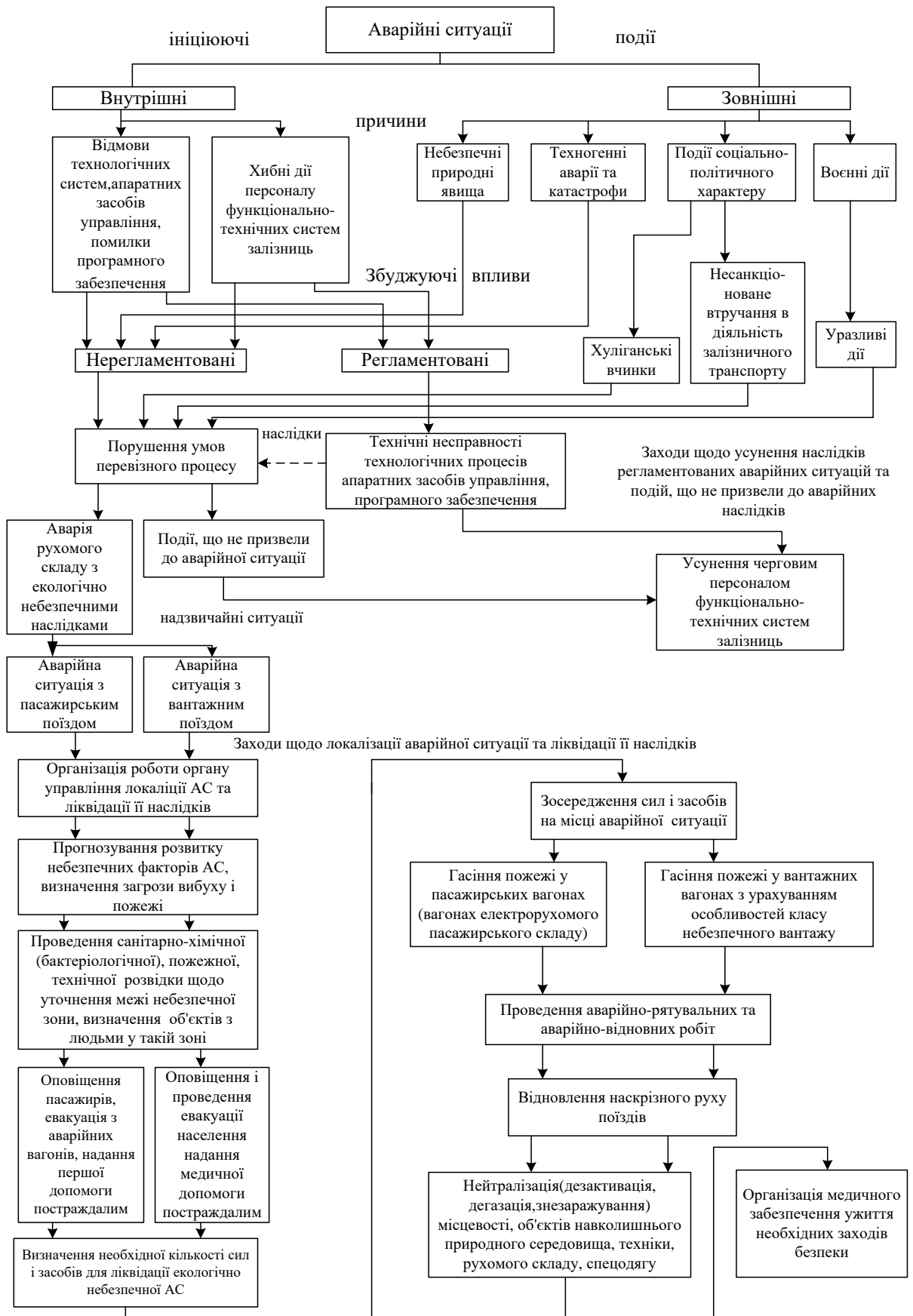


Рис. 1.2. Схема розвитку аварійних ситуацій, локалізації та ліквідації їхніх наслідків



Причинами внутрішніх ініціюючих подій можуть бути відмови технологічних систем, апаратних засобів управління, помилки програмного забезпечення чи хибні дії персоналу залізниць [12, 13, 56].

Хибні дії персоналу розглядаються у двох аспектах: по-перше, коли здійснюються ненавмисні неправильні дії чи пропуск правильних дій при управлінні механізмами, машинами, технологічними процесами, або проведення технічного обслуговування важливих для безпеки систем перевізного процесу.

По-друге, коли здійснюється ненавмисно прийняття неправильного рішення внаслідок невірної оцінювання ситуації, яка склалася на об'єкті, в технологічному процесі, виконанні технологічної операції.

До зовнішніх причин, які ініціюють аварійні ситуації подій, належать небезпечні природні явища, техногенні аварії та катастрофи на потенційно небезпечних об'єктах інших галузей господарства країни, події соціально-політичного та воєнного характеру.

Транспортні події природного характеру викликаються геологічними, метеорологічними, гідрологічними явищами (землетруси, селеві потоки, повені, зсуви, осідання земної поверхні, снігові замети, ожеледі, обвали, посухи, бурі і урагани, лісові та торф'яні пожежі, дуже сильний вітер або спека тощо).

Технологічні аварії та катастрофи на потенційно-небезпечних об'єктах виробництв інших галузей господарства країни, наприклад, атомної чи хімічної промисловості, здатні викликати сходи та зіткнення рухомого складу, руйнування транспортних засобів та комунікацій, порушення виробничого чи транспортного процесу, пожежі, вибухи, забруднення навколишнього природного середовища тощо.

Транспортні події соціально-політичного характеру пов'язані з протиправними діями терористичного і антиконституційного спрямування. До них належать хуліганські вчинки, здатні призвести до затримки поїздів, пошкодження елементів верхньої будови колії, забруднення докільця, а також збройні напади, захоплення рухомого складу і важливих об'єктів інфраструктури, знищення рухомого складу, захоплення заручників, блокування руху поїздів, накладання на колії сторонніх предметів тощо.

Транспортні події воєнного характеру пов'язані з наслідками застосування артилерійських та авіаційних боєприпасів, стрілецької зброї по об'єктах залізниці та рухомому складу під час яких виникають вторинні фактори ураження з ознаками транспортних подій.

Несанкціоноване втручання у діяльність залізничного транспорту зловмисника, в основному, спрямоване на порушення перевізного процесу, або на виведення з ладу окремих механізмів і пристроїв, що можуть призвести до затримки у русі поїздів.

Збуджуючі впливи, що є наслідками причин аварійних ситуацій, – це потоки речовини, енергії та інформації, які безпосередньо утворюються у навколишньому середовищі, чи такі, що виникають у результаті антропогенної діяльності, й можуть бути регламентованими та нерегламентованими.

Регламентовані впливи допускаються експлуатаційною документацією, вони пов'язані з технічними несправностями технологічних процесів, машин, механізмів, апаратних засобів управління та програмного забезпечення й, за певних умов, можуть бути причинами порушення умов перевізного процесу.

Нерегламентовані впливи пов'язані з впливами, що перебільшують допустимі для нормальних умов норми експлуатації. Такі впливи можуть бути короткочасними, коли уразливу дію визначають амплітудні значення параметрів впливу, і довгострокові, коли уразлива дія визначається дозованими ефектами, тобто накопиченням пошкоджень.

Наслідками регламентованих впливів можуть бути технічні несправності технологічних процесів, апаратних засобів управління та програмного забезпечення різнорівневих органів управління, що, за певних умов, можуть призвести й до порушення перевізного процесу.

Як правило, такі технічні несправності усуваються черговим персоналом функціонально-технічних систем залізниць.

Іншими словами, залізничний транспорт за нормальних умов свого функціонування, а також при регламентованих впливах знаходиться у констативному (сталому) стані свого функціонування, в якому для зниження ризику аварійних ситуацій здійснюється моніторинг станів його господарств та підпорядкованих підприємств з метою підготовки та реалізації комплексу правових,

соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання техногенної та природної безпеки, проведення оцінювання рівнів ризику для завчасного реагування на загрозу виникнення аварійних ситуацій і прогнозування можливого перебігу подій з метою недопущення їх подальшого розвитку або пом'якшення можливих наслідків.

З метою організації та координації діяльності, спрямованої на забезпечення безпеки перевезень на залізничному транспорті у сталому стані його функціонування, зокрема, здійснюється [9]:

- організація контролю за приведенням рухомого складу та елементів його інфраструктури у відповідність до вимог ПТЕ;

- систематичне проведення обстежень технічних засобів усіх господарств залізничного транспорту та вжиття заходів щодо утримання їх у постійній справності;

- безумовне дотримання вимог чинного законодавства до стану рухомого складу, що подається під навантаження небезпечних та негабаритних вантажів, виконання правил маневрової роботи й організації перевезення таких вантажів;

- моніторинг стану природного середовища й вжиття необхідних заходів щодо зменшення негативного впливу на нього з боку господарств і підприємств залізниць;

- здійснення постійного контролю за станом та надійною експлуатацією пристроїв і приладів безпеки руху й вжиття заходів щодо забезпечення надійності їх роботи;

- розроблення, створення і впровадження нових пристроїв, приладів безпеки та систем діагностування;

- нагляд за додержанням вимог чинного законодавства щодо забезпечення безпеки перевезень на залізничному транспорті відповідно до питомих показників стану безпеки і зон ризику;

- аналіз діяльності працівників, що здійснюють контроль за технічним станом та якістю робіт у господарствах і підприємствах залізниць;

- впровадження дієвих форм роботи щодо зміцнення трудової та технологічної дисципліни працівників залізничного транспорту, робота яких пов'язана із рухом поїздів, підвищення мотивації працюючих, відшкодування згідно

з чинним законодавством матеріальних збитків, завданих внаслідок порушення безпеки перевезень;

- організація технічного навчання кадрів і підвищення їх кваліфікації, відпрацювання практичних дій на випадок виникнення аварійних ситуацій;

- періодична перевірка знань працівників, робота яких пов'язана з рухом поїздів, вимог нормативних документів, нормативно-правових актів та посадових інструкцій;

- перегляд нормативних документів та приведення їх до вимог чинного законодавства з безпеки руху;

- проведення попереднього і періодичного медичних оглядів працівників, робота яких пов'язана з рухом поїздів, а також передрейсового і післярейсового (у разі потреби) контролю за станом здоров'я локомотивних бригад, бригад спеціального самохідного рухомого складу, водіїв автотранспортних засобів та інших категорій працівників.

Нині особлива увага приділяється вжиттю заходів щодо забезпечення безпеки залізничних перевезень в умовах виникнення транспортних подій, зумовлених несанкціонованим втручанням сторонніх осіб у діяльність залізниць, а також наслідками застосування стрілецької та артилерійської зброї по об'єктах інфраструктури залізниць і рухомому складу. Це вимагає тісної співпраці з органами виконавчої влади з питань запобігання проявам терористичних актів, воєнних дій, незаконного втручання в роботу залізничного транспорту і проведення спільних заходів щодо ліквідації наслідків таких подій.

Порушення умов перевізного процесу, спричинене аварійною ситуацією рухомого складу з небезпечними наслідками, викликає появу екологічно небезпечної залізничної аварійної ситуації з пасажирськими або вантажними поїздами, переводить залізничний транспорт у новаційний стан з новими, не притаманними залізничному транспорту, властивостями.

Динаміка кількості транспортних подій щодо обсягів перевезень за 2006–2017 рр. наведена на рис. 1.3

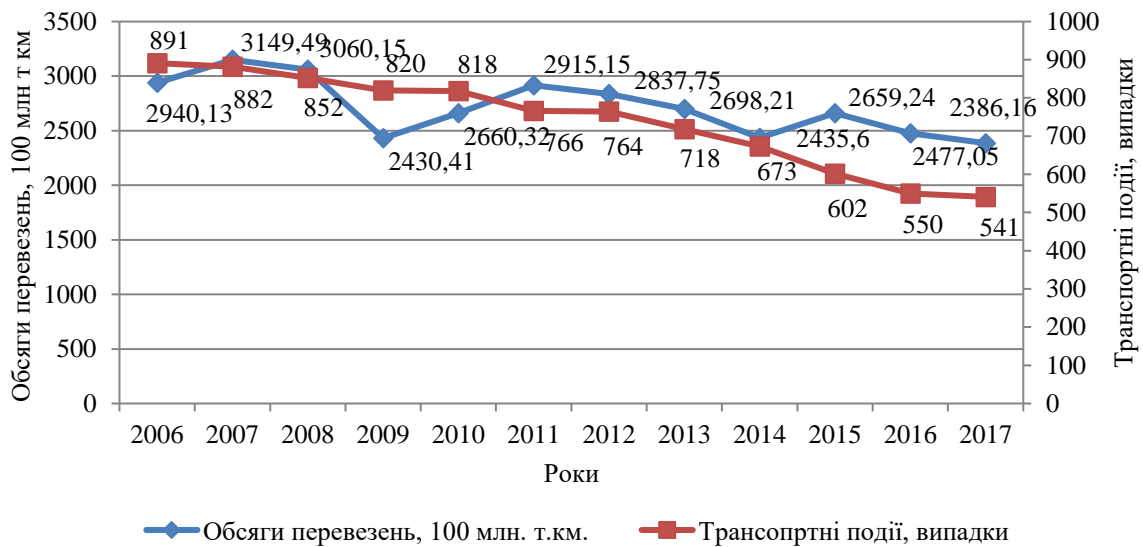


Рис. 1.3. Динаміка кількості транспортних подій із характером викиду небезпечних вантажів у довкілля за 2006 – 2017 роки

Рис. 1.3 свідчить, що кількість транспортних подій знижується відповідно до зменшення обсягів вантажних перевезень.

Дані про відносну кількість транспортних подій щодо обсягів перевезень, середню вартість збитків від однієї залізничної транспортної події та середню кількість залізничних транспортних подій за добу року наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

**Дані про залізничні щодобові транспортні події за період з 2006 по 2017 рр.**

Дані про події	Роки											
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Відносна кількість подій на 100 млн т км	0,30	0,28	0,28	0,34	0,31	0,26	0,27	0,27	0,28	0,23	0,22	0,23
Транспортні події, випадки	891	882	852	820	818	766	764	718	673	602	550	541
Середня вартість збитків від однієї події, тис. грн	1,38	13,15	1,19	3,09	2,02	1,84	2,82	2,81	8,15	6,72	7,24	7,06
Середня кількість подій за добу року, випадки	2,44	2,42	2,33	2,25	2,24	2,10	2,09	1,97	1,84	1,65	1,51	1,48
Балансові збитки, тис. грн	1,228	11,601	2,534	1,011	1,650	1,412	2,152	2,015	6,025	4,044	3,920	3,819

Дані, які наведені у табл. 1.1, вказують на те, що з 2006 р. по 2014 р. середня кількість транспортних подій на 100 млн т км щодобових вантажних перевезень зменшилася з 2,44 у 2006 р. до 1,48 у 2017 р. Все це стало можливим за рахунок організації та координації діяльності, спрямованої на забезпечення безпеки залізничних перевезень, яка здійснюється в умовах катастрофічного старіння рухомого складу та об'єктів залізничної інфраструктури.

Характер зміни середньої вартості балансових збитків від однієї транспортної події за останні п'ять років свідчить про те, що при зменшенні числа транспортних подій їхні наслідки мали більш негативний характер впливу на навколишнє середовище і об'єкти залізничної інфраструктури. Для ліквідування наслідків цих подій необхідно було залучати велику кількість сил і засобів за більш тривалого часу проведення відновних робіт.

На рис. 1.4 наведена динаміка вантажних перевезень, у тому числі й небезпечних, за період з 2006р. по 2017 р.

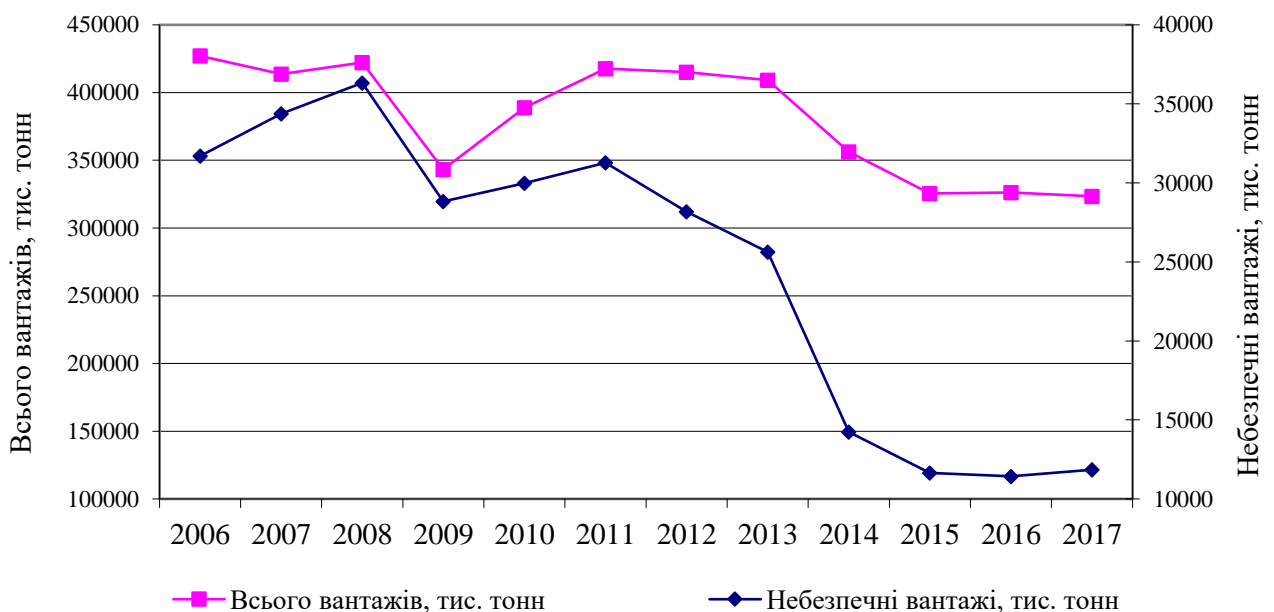


Рис. 1.4. Динаміка вантажних перевезень за період з 2006 року по 2017 рік

Рис. 1.4 показує, що за період з 2006 р. по 2011 р. частка небезпечних вантажів із загальної кількості вантажних перевезень становила у межах від 7,1% (2006р.) до 8,6 (2008р.). З 2012 р. намітилася тенденція до зменшення об'ємів вантажних перевезень, наприклад, у 2016 р. усі вантажні перевезення приблизно

дорівнювали вантажним перевезенням небезпечних вантажів у 2011р. Частка небезпечних вантажів вантажних перевезень становила: 2012 р. – 6,8%, 2013 р. – 6,3%, 2014 р. – 4%, 2015 р. – 3,6%, 2016 р. – 3,5%, 2017 р. – 3,7%.

Аналіз залізничних транспортних подій за характером викиду небезпечних вантажів у довкілля за цей період наданий на рис. 1.5.

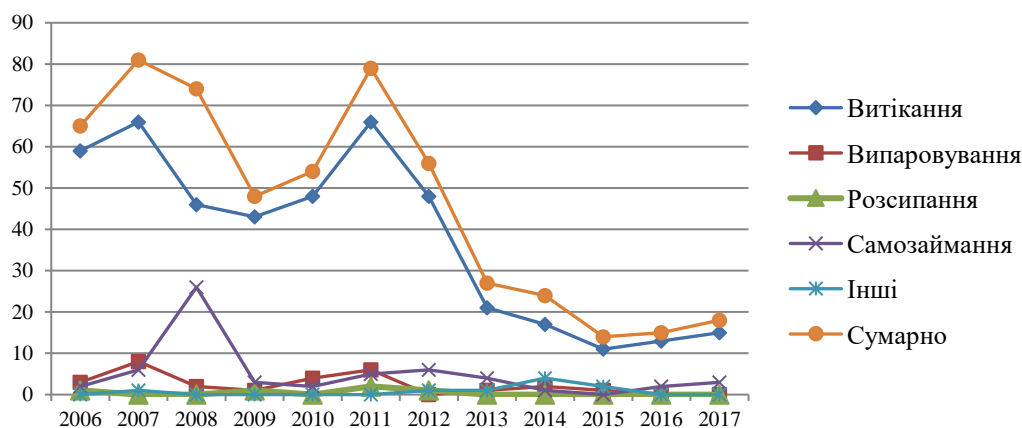


Рис. 1.5. Динаміка кількості транспортних подій за характером викиду небезпечних вантажів у довкілля

З рис. 1.5 видно, що найбільша кількість транспортних подій з небезпечними вантажами припадає на 2007 р. (80 випадків) та на 2009 р. (79 випадків), а найменша кількість – на 2015 р. (14 випадків).

Відносна кількість транспортних подій за тяжкістю їх наслідків подана на рис. 1.6.

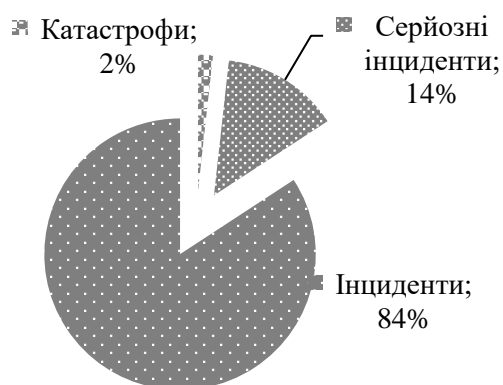


Рис. 1.6. Відносна кількість транспортних подій за тяжкістю їх наслідків у 2006 – 2017 рр.

З діаграми (рис. 1.6) видно, що найбільшу частку транспортних подій складають інциденти з небезпечними вантажами (84%), на серйозні інциденти припадає 14% , а на катастрофи – 2%.

Кількість аварійних ситуацій за їх наслідками стосовно стану небезпечного вантажу надана на рис. 1.7.

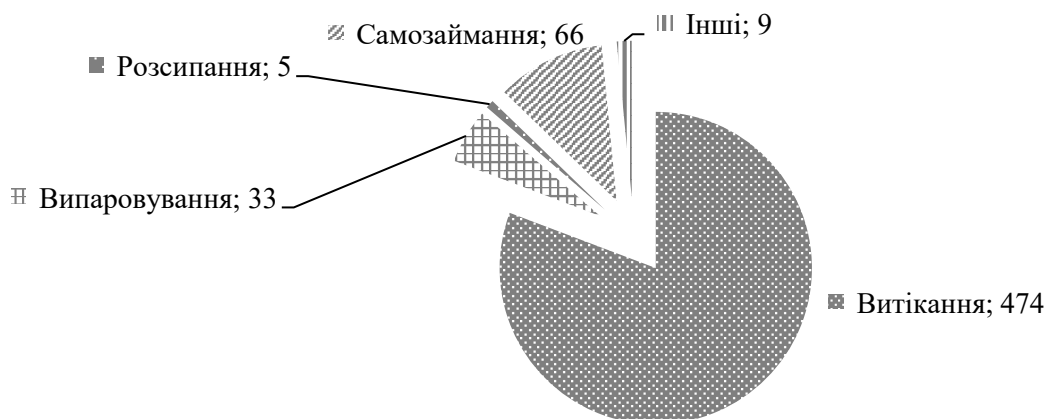


Рис. 1.7. Кількість аварійних ситуацій за їхніми наслідками стосовно стану небезпечного вантажу

З рис. 1.7 видно, що найбільша кількість наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами припадає на витікання вантажів із залізничних цистерн (474 випадки або 80,7%). Із samozайманням вантажів пов'язані 66 випадків (11,2%), на випаровування вантажів припадає 5,6% (33 випадки), 5 випадків (майже 1%) пов'язані із розсипанням вантажів, до інших наслідків належать 9 випадків (1,5%).

Витікання небезпечних вантажів, більшість з яких становлять нафтопродукти, характеризується значним шкідливим впливом на довкілля. Цей вплив пов'язаний з токсичністю вуглеводнів і домішок як у рідкому, так й у пароподібному стані, а також з токсичністю деяких продуктів згоряння нафтового палива.

Дія нафтопродуктів на ґрунти призводить до істотних порушень ґрунтових біоценозів, загибелі мікроорганізмів, блокування водно-солевих обмінів з корінням рослин тощо [58, 59].



При потраплянні нафтопродуктів до водоймищ, спочатку утворюється шар на його поверхні, потім починається випаровування летких вуглеводнів, при цьому у водний розчин переходять жирні, карбонові та нафтові кислоти, а також феноли та крезолі.

Через декілька діб знаходження нафтопродуктів у воді, в результаті біохімічного розкладання утворюються ще більш токсичні окиснені вуглеводні. Донні відкладання поглинають частину нафтопродукту, причому найбільшу поглинаючу спроможність мають глинисті мули.

Нафтопродукти, які потрапили до водного середовища, утворюють на його поверхні тонкі плівки, які тривалий час тримаються на поверхні води та негативно впливають на кисневий режим водойми.

У районах аварійного витоку нафтопродуктів спостерігається геохімічна перебудова ґрунтів, яка призводить до загибелі тварин, рослинного покриву, гноблення мікробіоценозів [58, 59].

Проведення аварійно-відновних робіт після розливання нафтопродуктів пов'язане із значними витратами на збирання, вивезення та очищення забрудненого ґрунту. Тому вжиття дієвих заходів щодо локалізації та ліквідації залізничних аварій, пов'язаних з розливанням небезпечних речовин, з метою мінімізації шкідливого впливу на довкілля та життєдіяльність людей є дуже актуальною проблемою.

Аналіз аварійних ситуацій і транспортних подій з небезпечними вантажами дозволило виявити такі з них, які характеризуються максимально негативними наслідками їх реалізації при розвитку за найнесприятливішими сценаріями, які отримали назву типових [16, 55 – 57, 61, 62].

До типових транспортних подій при перевезенні небезпечних речовин належать: ушкодження вагонів без впливу на небезпечний вантаж; ушкодження вагонів з утворенням виливання (висипання) небезпечного вантажу; ушкодження вагонів з утворенням розливання (розсипання, розкидання) небезпечного вантажу на рельєфі місцевості; ушкодження вагонів з пожежею (вибухом) небезпечного вантажу [16].

У зв'язку з викладеним запропонована така класифікація транспортних подій за їх наслідками (рис. 1.8).

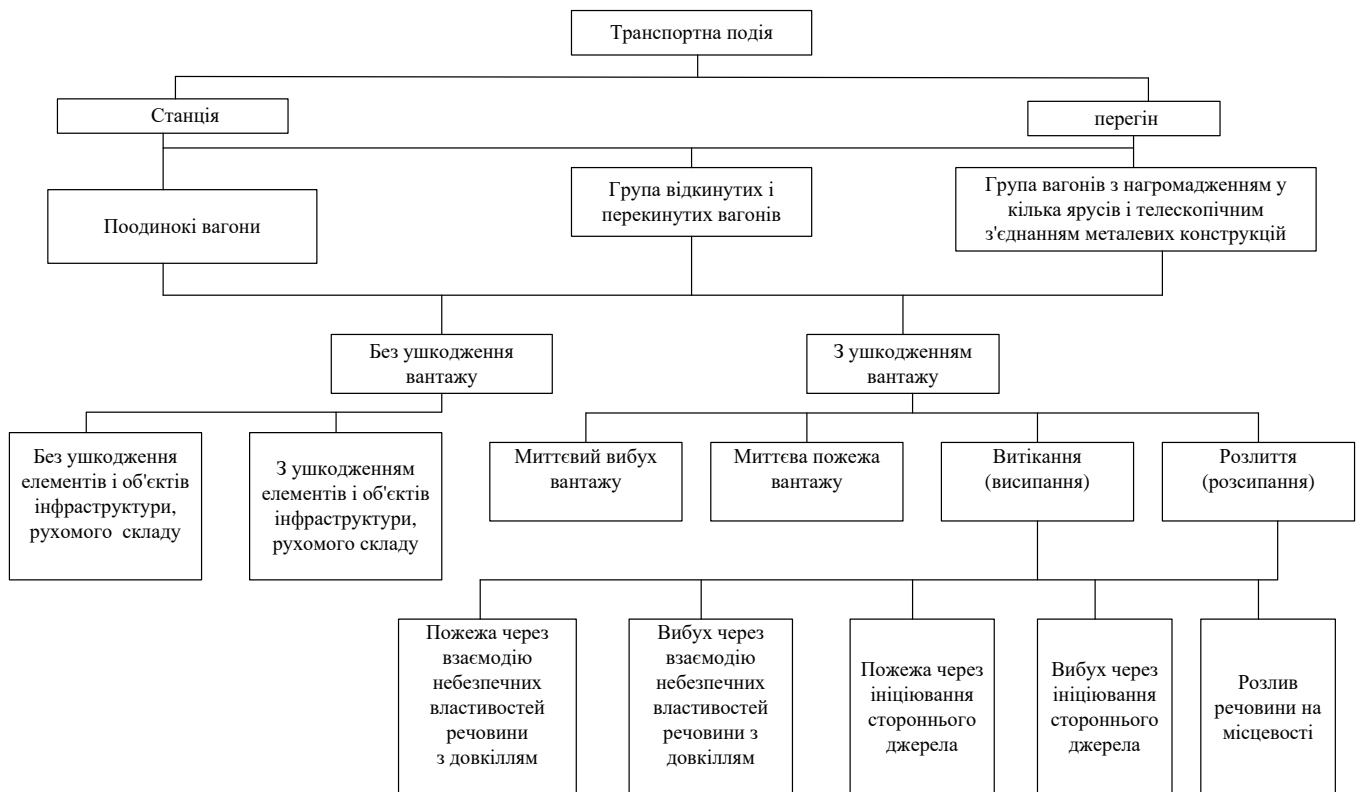


Рис. 1.8. Класифікація транспортних подій за їх наслідками

Основними причинами ушкодження вантажних вагонів є сходження їх з рейок внаслідок несправності колії, несправностей у ходових або зчіпних пристроях рухомого складу, неправильне керування поїздом, несанкціоноване втручання в діяльність залізничного транспорту, зіткнення з автотранспортними засобами на залізничних переїздах, зіткнення із залізничним рухомих складом та ін. Великий вплив на характер сходжень рухомого складу з рейок чинять швидкість руху, метеоумови, рельєф місцевості, профіль залізничної колії тощо. На їх характер можуть вплинути й раптово виниклі під час сходження перешкоди, наприклад, розворот візка, що зійшов з рейок, упор його деталей у шпальну решітку з подальшим накопиченням вагонів, що зійшли [11, 13, 63 – 65]. Сходження з рейок рухомого складу, які відбуваються через зіткнення, можуть закінчуватися, крім всього, ще й руйнуванням головної та бічної частин локомотива чи вагона, часто при цьому виникає пожежа [13].

Найчастіше трапляються сходження поодиноких вагонів або окремих груп із 2 – 4 вагонів на станціях під час розпуску з гірок через несправності колії, стрілочні переводи або «перескакування» через гальмівний башмак. Такі сходження характеризуються відносно малими швидкостями руху, що не призводить до падіння рухомого складу набік і ушкодження вантажу. Зіткнення при виконанні маневрів, які здійснюються з дещо більшою швидкістю, часто закінчуються більш складними сходженнями, аж до перекидання рухомого складу.

На перегонах сходження з рейок поодинокого рухомого складу або груп із малою кількістю вагонів відбуваються дуже рідко. В основному вони мають місце на станціях і розподіляються за такими наслідками: сходження локомотива або вагона з рейок однією колісною парою; сходження одним візком; сходження усіма візками без їхнього викиду з-під рами рухомого складу; сходження всіма візками з викидом візка з-під рами й заглиблення кінця вагону в земляне полотно; сходження з викидом усіх візків, падіння рухомого складу набік або перекидання.

На насипах у більшості випадків і особливо у кривих ділянках колії рухомий склад повністю або частково може бути відкинутий за межі габариту. У глибоких виїмках відкиданню рухомого складу за межі габариту будуть перешкоджати укоси, у зв'язку із чим обсяг завалів у виїмках за інших рівних умов буде більше ніж на насипах. Характер завалів багато в чому залежить від причин зіткнень і сходжень рухомого складу. При лобових і бічних зіткненнях, як правило, утворюються складні завали з руйнуванням і телескопічним з'єднанням рухомого складу, значним розвалом або розливом вантажу. Це відбувається в основному через проїзди заборонних сигналів, порушення правил приймання й відправлення поїздів, несправності пристроїв СЦБ, вихід вагонів з колій станції, а також зіткнення вагонів поїздів, що зйдуть із рейок на сусідні колії. Меншим обсягом виконання робіт характеризуються випадки сходжень з рейок рухомого складу при несправній колії, через зношування деталей або вузлів вагонів, хоча й у цих випадках багато чого залежить від конкретних обставин.

Найбільш складні випадки відбуваються при сходженні з рейок або зіткненні рухомого складу в тунелях, на мостах, а також двох зустрічних поїздів [13, 63 – 65].

Аналіз транспортних подій свідчить, що характер завалів багато в чому залежить від причин зіткнень і сходжень рухомого складу. При лобових і бічних зіткненнях утворюються складні завали з руйнуванням і телескопічним з'єднанням рухомого складу та значним ушкодженням вантажу [13].

Як підкреслювалося вище, до внутрішніх подій належать відмови технічних засобів, які впливають на безпеку, хибні дії персоналу (так званий «людський чинник»), пожежі та ін., а до зовнішніх – небезпечні природні явища, диверсії, незаконні втручання в діяльність залізниць сторонніх осіб.

Відмови і несправності елементів рухомого складу та об'єктів інфраструктури, викликанні їхнім технічним станом внаслідок фізичного спрацювання і старіння, а також неякісного ремонту та поточного утримання.

До небезпечних відмов елементів колії належать: злам рейки (24,4%), відмови елементів стрілочних переводів (14,7%), відмови, що призводять до недопустимих параметрів колії (36,2%), викид колії (12,1%), деформація земляного полотна (12,6%) [13, 63 – 65].

Основними причинами таких відмов є порушення технології виготовлення рейок, стрілочних переводів тощо та незадовільне утримання елементів верхньої будови колії.

Небезпечні відмови вантажних вагонів з причин несправності гальм (52%), буксових вузлів колісних пар (25%) є причинами незадовільної якості проведення їх ремонту у вагонних депо і технічного обслуговування у поїздах. Злами хребтової і шкворневої балок (2,6%) є причиною використання вагонними депо незносостійких матеріалів при їхньому відновлюванні.

До небезпечних відмов цистерн, призначених для перевезення небезпечних вантажів, належать відмови зливного пристрою (52,8%), тріщин у зварному шві (18,2%), тріщин казана цистерни (13,1%), відкриття люка (3,1%), відмови запобіжного клапану (2,0%), корозійні отвори (1,1%) та деякі інші, що стали наслідками порушень технології при виконанні планових видів ремонту і технічного обслуговування.

До виникнення аварій і катастроф приводили також падіння на колії деталей вагонів і вантажів (2,6%) з причини незадовільного кріплення або відмов пристроїв кріплення вантажу.

Особливий вплив на стан безпеки руху поїздів має «людський чинник», саме з ним пов'язані 72,8% із загальної кількості транспортних подій.

Основними стадіями розвитку аварій і катастроф на залізничному транспорті є:

– стадія ініціювання, яка містить етапи накопичення механічних пошкоджень обладнання, відхилень від заданих режимів експлуатації, а також порушенням контролю за станом обладнання (у разі екстремальних зовнішніх впливів може протікати короткочасно). Закінчується ця стадія виникненням аварійної ситуації, тобто з умовами, які відмінні від умов нормального перевезення вантажів;

– стадія розвитку аварійної ситуації, коли локомотивна бригада і працівники залізниці, які пов'язані з рухом поїздів, автоматичні системи захисту втрачають контроль за процесами нормального функціонування перевізного процесу, починається вивільнення енергії, небезпечних речовин чи починаються неконтрольовані реакції, формуються уразливі фактори, що є загрозою для людей, об'єктів інфраструктури і навколишнього середовища;

– стадія руйнування захисних оболонок пакувань (транспортної тари з вантажем), балонів, цистерн, контейнерів, вагонів тощо і виходу уразливих факторів за захисні бар'єри (стадія руйнування первинного реципієнта);

– стадія дії уразливих факторів катастроф або аварії на рухомий склад, об'єкти інфраструктури залізниці, навколишнє природне середовище (утворення вторинного реципієнта).

Дослідження причин залізничних аварій і катастроф, які сталися у країнах Європи та США довели, що найбільшу ймовірність виникнення ці транспортні події мають на дільницях маневрування. При аналізі викидів небезпечних речовин найбільш значною, з точки зору ушкодження рухомого складу, є транспортна подія, що стається при великих навантаженнях, які реалізуються при зіткненні залізничних складів або сходів вагонів з рейок [13, 63 – 65].

За своєю фізичною природою впливи аварій і катастроф на рухомий склад та об'єкти інфраструктури залізниць можуть бути механічні (удари з різною швидкістю при різноманітних зіткненнях рухомого складу, перекиданнях при сході з рейок), термічні (пожежі, нагрівання від сторонніх джерел), впливи агресивних середовищ та іонізуючих випромінювань (при аваріях з іншими об'єктами оточуючого середовища), балістичні (обстріли, аварії з вибухонебезпечними об'єктами) й комплексні.

Основними видами впливів на рухомий склад і об'єкти залізниць при аваріях і катастрофах є лінійні перевантаження та удари, що призводять до механічних руйнувань елементів конструкцій, викиду, просипання, розлиттю небезпечних вантажів, ініціюванню вибухових перетворень, порушенню в роботі у електричних, електромеханічних та радіоелектронних приладів і пристроїв.

Ударні впливи виникають при падінні вантажу, дії повітряної ударної хвилі та у деяких інших випадках. У процесі удару навантаження до елементів конструкцій прикладається протягом короткого проміжку часу. Це призводить до виникнення прискорення таких елементів, що у свою чергу, може викликати різні ушкодження конструкції. Інтенсивність ударної дії залежить від форми, амплітуди і тривалості ударного імпульсу.

Основними видами термічних впливів є тепловий удар (наприклад, світлове випромінювання вибуху) і нагрівання (аеродинамічне, тепловим потоком, полум'ям).

При залізничних аваріях і катастрофах термічні впливи реалізуються, в основному, при пожежах, які являють собою неконтрольовані процеси горіння. Параметрами, які визначають теплову дію пожежі, є температура, інтенсивність і тривалість нагрівання [55, 65 – 70].

До інших параметрів пожежі належать: площа пожежі, її периметр, лінійна швидкість розповсюдження пожежі, швидкість вигорання горючих речовин і матеріалів, інтенсивність газообміну, площа задимлення та інші.

Розрізняють внутрішні пожежі, тобто горіння в обмеженому об'ємі (приміщенні вагоні, локомотиві, контейнері тощо) та відкриті пожежі, тобто горіння, яке не обмежене розмірами будівельних конструкцій.

Дослідження аварій, які супроводжувалися пожежею (вибухом), дозволило встановити наявність таких небезпечних зон [55, 65 – 70]:

- зона дії повітряної ударної хвилі (надлишкового тиску) під час вибуху хмари паливо-повітряної суміші;
- зона безпосередньої дії полум'я;
- зона дії теплового випромінювання пожеж під час розливів газоподібних речовин, легкозаймистих і горючих рідин та випромінювання вогняних куль;
- зона дії осколків (уламків) зруйнованих цистерн.

При цьому небезпечні радіуси надлишкового тиску ударної хвилі вибухів пароповітряної суміші при аваріях із газоподібними речовинами можуть сягати для людей до 1800 м, для техніки – до 450 м. Небезпечні радіуси зон дії теплового випромінювання при аваріях за участю газоподібних речовин та утворенням вогняної кулі можуть встановлювати для людей до 300 м, а для техніки – 120 м.

Небезпечні радіуси зон дії теплового випромінювання пожеж при горінні розливів газоподібних речовин, легкозаймистих та горючих рідин можуть складати: при розливі газоподібних речовин з однієї цистерни для людей – 80 м, для техніки – 40 м; при розливанні легкозаймистих та горючих рідин з однієї цистерни для людей – 60 м, для техніки – 35 м; при розливанні газоподібних речовин з двох та більш цистерн радіус небезпечної зони для людей – 120 м, для техніки – 55 м.

Зона розльоту осколків (уламків) при вибуху цистерни сягає до 150 м, а у окремих випадках – до 450 м. Зафіксовані випадки, коли вибух зриває цистерну з рами та відкидає її на відстань до 80 м.

Розміри розливів, а також розміри вибухонебезпечних зон при витоках газоподібних речовин та легкозаймистих рідин визначають розміри можливої пожежі після займання або вибуху хмари паливо-повітряної суміші

Більш інтенсивно розвивається пожежа при розливі газоподібних речовин з залізничних цистерн у випадках аварій або катастроф поїздів. При цьому цистерни перекидаються та ушкоджуються, внаслідок чого загальна площа пожежі може становити 10 тис. м<sup>2</sup>.

Характерною особливістю таких пожеж є значна швидкість зростання площі горіння. Звичайно вона складає біля 330 м<sup>2</sup>/хв, а інколи може сягати 1000 м<sup>2</sup>/хв.

При розливах легкозаймистих рідин з залізничних цистерн, які сталися у результаті аварії зіткнення або катастрофи, горіння по розлитому нафтопродукту може розповсюджуватися не тільки на сусідні поїзди, але й на найближчі будівлі, а при потраплянні небезпечної речовини у каналізацію або стічні канави – на об'єкти, які розташовані на відстані до 1 км.

Швидкість розповсюдження полум'я по розлитому нафтопродукту складає 15 – 25 м/хв та може збільшитися у окремих випадках до 40 м/хв.

Таким чином, не викликає сумніву, що залізничні транспортні події, серед них і за участю небезпечних вантажів, суттєво відрізняються за причинами виникнення, характером процесів розвитку та наслідками для навколишнього середовища від тих, що трапляються на стаціонарних об'єктах або інших видах транспорту.

### **1.3. Огляд та аналіз основних аспектів управління екологічною безпекою при ліквідуванні залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами**

Аналіз джерел, присвячених проблемам управління екологічною безпекою при ліквідуванні аварійних ситуацій з небезпечними вантажами на залізничному транспорті, дозволив окреслити основні напрями наукових досліджень з цих проблем.

До одного з цих напрямів належать роботи, які присвячені методам оцінювання забруднення атмосфери, що засновані на різних математичних моделях турбулентного переносу і розсіювання забруднюючих речовин, а також комп'ютерним програмним комплексам, які реалізують ці методи. Необхідно



відмітити, що зараз, з причин багатогранності і багатоаспектності підходів до моделювання, відсутня єдина класифікація математичних моделей розповсюдження забруднюючих речовин від джерел викидів забруднень. Характер таких моделей визначається колом завдань, які необхідно вирішувати, а також вимогам до точності моделювання.

В роботі [80] розглянуті найбільш поширені програмні комплекси, які побудовані на основі різних математичних моделей розповсюдження забруднень в атмосфері, з точки зору використання для їхньої реалізації обчислювальних ресурсів і процесорних комп'ютерних систем. Робота [81] присвячена аналізу фізичних основ побудови математичних і комп'ютерних моделей розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. В роботах [82, 83] розглянуті основні моделі, які застосовуються для оцінювання забруднення атмосфери: штатні моделі служб цивільного захисту; стандартні моделі забруднення атмосфери стаціонарними джерелами (зокрема ОНД-86); моделі МАТАТЕ (міжнародний стандарт) для розрахунків забруднень атмосфери стаціонарними джерелами; простіші нестационарні моделі для експрес-аналізу розповсюдження хмари забруднювача; нестационарні моделі забруднення, які враховують неоднорідність підстиляючої поверхні; нестационарні моделі розповсюдження забруднень в атмосфері з урахуванням рельєфу місцевості; моделі прогнозування забруднення атмосфери при штилевих умовах різного типу; моделі, що враховують процеси хімічної трансформації забруднюючих речовин; спеціальні моделі для районування територій за імовірністю аварій та ступенів загрози населенню і промисловим об'єктам.

Для прогнозування наслідків викидів небезпечних пожежо-вибухонебезпечних речовин необхідним є моделювання розповсюдження таких речовин в атмосфері.

Нині для моделювання якості атмосферного повітря застосовуються два класи моделей розповсюдження забруднювачів в атмосфері: моделі розсіювання забруднювачів та моделі забруднення атмосферного повітря.

Практична програмна реалізація таких математичних моделей є складною системою, яка проектується під конкретну задачу й враховує різні чинники, наприклад: динаміку турбулентних повітряних потоків; перенесення тепла, пилу і реагування газоподібних забруднювачів; перенесення сонячного і дифузного випромінювання; вплив випромінювання на теплові процеси та випаровування; поглинання (та вивільнення) газоподібних забруднювачів краплями.

Найбільш відомими реалізаціями моделей розсіювання «важкого газу» є методика Всесвітнього банку, звід методик HGSYSTEM, методики, розроблені при підтримці провідних закордонних дослідницьких організацій TNO - the Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (Нідерланди), Det Norske Veritas (DNV Technica) (Норвегія), методики РД 03-26-2007 і програмні комплекси «ТОКСИ» різних версій, «ТОКСИ+», «ТОКСИ+Risk» (Російська Федерація), ALOHA (США) [79, 85 –88].

Розглянемо найбільш поширені моделі розповсюдження забруднюючих речовин у атмосфері.

Модель атмосферної дисперсії AERMOD (Канада, США) заснована на алгоритмі гауссової моделі й призначена для моделювання стану атмосфери у радіусі до 50 км від стаціонарних промислових джерел забруднення [1].

Модель дозволяє прогнозувати неперервні плавучі викиди від рівня землі і дисперсії переривистих викидів. У моделі концентрація забруднюючих речовин не впливає на розряджений потік, при моделюванні турбулентні потоки є лінійними, бокова середня швидкість і вертикальна швидкість вітру дорівнюють нулю; модель приймає метеорологічні дані з декількох висот, дозволяє створювати профілі температури, вітру, турбулентності, враховувати будівельні ефекти, моделювати сухе та мокре осадження забруднюючих речовин.

Така модель містить три основних модулі: AERMOD (модель стану атмосферної дисперсії). AERMET з інструментальним набором AERSURFACE для створення вхідних даних, пов'язаних зі станом атмосфери і рельєфом місцевості, розрахунку атмосферних параметрів, необхідних для дисперсійної моделі (турбулентна дифузія в атмосфері, швидкість розсіювання, довжини Моніна-

Обухова і теплового поверхневого потоку тощо), AERMAR – програмні засоби, призначені для прив'язки моделі до тримірних даних рельєфу місцевості та об'єктів.

Недоліками цієї моделі є суттєві витрати при підготовці вхідних даних, її застосування є доцільним при оцінюванні екологічних ризиків від промислових джерел забруднення.

Модель CALPUFF прийнята Агентством з охорони довкілля США, заснована на основі «Керівництва щодо якості повітря» є сучасною нестационарною метеорологічною і повітряною системою моделювання атмосферної дисперсії на базі інтегрованої Гауссової моделі. Вона є привілейованою моделлю для оцінювання дальнього переносу забруднювачів та їх впливу на федеральні області США, у тому числі й при складних метеоумовах [78].

Система моделювання складається з трьох основних компонентів і множинних програм постоброблення і попереднього оброблення даних.

CALMET – діагностичні тримірної метеорологічні моделі; CALPUFF – модель дисперсії якості повітря; CALPOST – пакет постоброблення. Кожний з цих компонентів має графічний інтерфейс, додатково до цих пакетів програма містить багато інших процесорів, які використовуються для підготовки геофізичної статистики з використанням метеоданих.

Модель призначена для моделювання дисперсії неперервних плавучих викидів від точкових або лінійних джерел, містить також алгоритм для оброблення ефекту скошування на найближчі будівлі, що знаходяться на шляху розповсюдження забруднюючих речовин.

До основних переваг цієї моделі можна віднести: використання моделі Ейлера, яка імітує ефекти розповсюдження забруднювача у часі та просторі при різних метеоумовах; можливість імітації добового циклу для кожного забруднювача; використовує тримірні метеорологічні поля тощо.

До недоліків можна віднести те, що робота з моделлю потребує високої кваліфікації оператора, моделі «важких газів» не розглядаються, відсутній алгоритм обчислення температури джерела і не моделюється сухе осадження.

Програма AUSTAL 2000, яка призначена для моделювання дисперсії забруднювачів повітря, була розроблена у Німеччині за контрактом з Міністерством з питань охорони довкілля і безпеки ядерних реакторів. Вона є еталонною, бо базується на «Технічній інструкції щодо контролю за якістю повітря» [80].

Програма побудована на моделі Лагранжа, яка завбачає дисперсію забруднювача при відомих змінах базових показників. Модель описує перенос окремих повітряних потоків під дією атмосферних полів і розповсюдження забруднювачів.

До переваг цієї програми можна віднести те, що модель Лагранжа дає ефективну обчислювальну систему; має можливість моделювання розповсюдження забруднювачів при наявності на їх шляху будівель, складного рельєфу місцевості; здійснює моделювання шлейфа забруднювача по сухим та мокрим осадженням у порядку хімічних реакцій.

Недоліки програми: важкість моделювання взаємодії великої кількості окремих джерел забруднення, що потребує використання нелінійної хімії.

Модель ADMS-3 є сучасною моделлю дисперсії для обчислення концентрації забруднювачів, що виділяються точковими, лінійними, об'ємними та площадними джерелами. Модель містить алгоритми, які враховують: ефекти основної ділянки забудови; складність рельєфу місцевості; вологе осадження; короткострокове коливання у концентрації; хімічні реакції; радіоактивний розпад і гамму – дозу; підвищення факела як функції відстані; потоки і спрямовані викиди; усереднення часу у межах від короткострокового до щорічного.

Модель CALINE3 є стаціонарною гауссовою моделлю дисперсії, розробленою для визначення концентрації забруднювача повітря у відносно нескладній місцевості. Модель включена у більш досконалі моделі CAL3QHCR і CAL3QHCR.

Модель CTDMPLUS є удосконаленим точковим джерелом гауссової моделі якості повітря для використання в умовах складного ландшафту.

Модель OCD розроблена для визначення впливу емісії від точкових, площадних або лінійних джерел на якість повітря у прибережних районах.

Поряд з розглянутими вище моделями використовуються також моделі на основі розподілу Гаусса (наприклад, ADAM, ISC-3), Ейлерові моделі та моделі Нав'є-Стокса (CAMx, Chensi, PANACHE, REMSAD, WYNDVALLEY).

Іноді додатково застосовуються лагранжева модель для розрахунку переносу пилу (RAPTAD, PANACHE). Найбільш досконалі програми враховують фактори хімічної кінетики (ADAM, ADAM-3, CAMx, PANACHE, REMSAD, RPM-IV та інші), переносу тепла (ADAM, PANACHE), складності геометрії області (ADAM-3, ISC-3, PANACHE та інші), турбулентності (PANACHE).

Аналогічні розрахунки можуть здійснюватися також й універсальними системами моделювання (FlowVision, FLUENT, GAS DYNAMICSTOOL, PHOENIX, Star-CD та іншими). [71].

Висока густина речовини, що викидається є дуже важливим чинником, у зв'язку з чим був введений спеціальний термін – «важкий газ», для опису поведінки якого були розроблені спеціальні моделі – «модель розсіювання важкого газу» [77].

Як й усі моделі, модель розсіювання «важкого газу» має ряд обмежень. Наприклад, це пов'язане з необхідністю врахування рельєфу місцевості та наявності забудови. У найбільшій ступені врахувати такі чинники дозволяють моделі які, побудовані на чисельному розв'язуванні повної системи рівнянь газодинаміки. Це складний, але найбільш перспективний підхід. Нині такий підхід реалізований у декількох програмних продуктах, наприклад, у обчислювальному комплексі PHOENIX.

Методики «ТОКСИ-3», РД03-26-2007 та АЛОНА дозволяють розрахувати характеристики хмари небезпечної речовини, яка переміщується в атмосфері, у рамках розсіювання «важкого газу», що базуються на інтегральних законах збереження.

Виходячи з наведеного вище, можна зробити висновок про те, що існує велика кількість різнохарактерних моделей для розрахунку процесу розсіювання викидів небезпечних речовин – від простіших гауссовських моделей із завищеними оцінками до детальних розрахунків за складними газодинамічними моделями.

Аналіз обстановки, яка склалася у результаті аварійної ситуації при транспортуванні небезпечних вантажів, потребує наявності точних і достатньо простих для проведення розрахунків моделей розвитку небезпечних чинників таких ситуацій.

Тому актуальною задачею є задача вибору моделі для прогнозування розвитку небезпечних чинників аварійних ситуацій з небезпечними вантажами.

До іншого напрямку належать роботи, в яких розглядаються процеси розвитку небезпечних чинників аварійних ситуацій і технологій ліквідування наслідків таких ситуацій при перевезенні небезпечних вантажів.

Розвитку небезпечних явищ у аварійних ситуаціях, оцінюванню ймовірності переростання аварійної ситуації в аварію, а також прогнозуванню виникнення аварійних ситуацій, зокрема й на залізничному транспорті, розглянуті в роботах [85, 88, 92]. Показано, що ймовірність залізничних транспортних аварій залежить від об'єму перевезень й, при визначених умовах, потік залізничних аварійних ситуацій є простішим пуасоновським потоком. У роботі розглянута математична модель реалізації аварії з небезпечним вантажем з урахуванням обсягу перевезень, інтенсивності виникнення аварійних ситуацій, швидкості руху поїзда в момент аварії та граничної швидкості зіткнення, при якій ще не руйнується пакування вантажу. Результати проведеного моделювання свідчать, що досягнути зниження інтенсивності аварій з небезпечними вантажами можна або шляхом зменшення середньої швидкості руху поїзда, або підвищенням стійкості конструкцій пакування, які мають свої економічні та технічні межі. Велика увага приділена питанням ліквідації аварійних ситуацій та оцінюванню шкоди від них.

Загальні проблеми щодо ліквідування наслідків аварій під час перевезення основних екологічно небезпечних вантажів розглянуті у роботі [90]. В ній розглянуті типи фізичних процесів розвитку аварій і напрями ліквідації наслідків аварійних ситуацій з рідкими та зрідженими екологічно потенційно небезпечними вантажами, визначені основні підходи до ефективного проведення ліквідаційних робіт. Певна увага в роботі приділяється визначенню вимог щодо організаційних заходів і технічних рішень з ліквідації аварій зокрема, необхідності розроблення технологічних процесів з локалізації, уловлювання або знешкодження екологічно

небезпечних речовин, що потрапили в навколишнє середовище, створення необхідного обладнання для приготування, зберігання і перекачування нейтралізуючих розчинів, збирання розлитих рідин з ґрунту, а також дооснащення відновних поїздів необхідним для цього обладнанням. Підкреслюється, що для ефективного проведення ліквідаційних робіт потрібно мати механізми прогнозування розвитку аварії та надійний зв'язок між усіма учасниками процесу проведення ліквідаційних робіт.

Питання вдосконалення профілактичних заходів під час перевезень небезпечних вантажів розглянуті у роботі [89]. Підкреслено, що основними властивостями, які визначають умови перевезень і зберігання нафтопродуктів, є їхня легка займистість, підвищена в'язкість і застигання при мінусових температурах, висока здатність до випаровування, корозійний вплив на метал та шкідливий вплив на організм людини. Встановлені загальні вимоги до засобів і процесів технології ліквідації екологічних наслідків залізничних аварійних ситуацій. Детально розглянуті механізми забруднення ґрунту та водойм. Показано, що інтервал часу між моментом аварії та початком робіт з ліквідації їх наслідків повинен бути як найменшим. Це особливо актуально для летких фракцій нафтопродуктів, які мають велику швидкість міграції крізь ґрунти та розповсюдження їх по поверхні, а також негативний вплив на атмосферу в зоні впливу.

У роботі [59] розглянуті методи підвищення ефективності ліквідації розливів нафтопродуктів і розроблена технологічна схема ліквідування таких розливів, яка забезпечує постійний та оперативний доступ до сорбентів нафтопродуктів у зоні проведення ліквідаційних робіт. Запропоновано обладнання, що дозволяє переводити сорбенти у вигляді сорбційних бонів безпосередньо на цистерні для перевезення нафтопродуктів. Це дає можливість скоротити проміжок часу від початку контакту небезпечного вантажу з довкіллям до їх поглинання на поверхні сорбентів.

У дисертаційній роботі [83] розглянуті проблеми захисту довкілля при ліквідуванні, знешкоджуванні та блокуванні забруднень при розливанні нафтопродуктів, що транспортуються залізницею, за рахунок впровадження нових технологічних рішень, зокрема застосування глейких речовин.

У дисертаційній роботі [84] розглянуті питання оцінювання ризиків та втрат при перевезенні небезпечних вантажів залізничним транспортом при взаємодії з автомобільним та трубопровідним транспортом.

Принципи і методи оцінювання екологічних ризиків виникнення аварійних ситуацій на залізничному транспорті висвітлені у роботах [80,85], в яких розглянуті основні аспекти формування екологічних ризиків в умовах екологізації транспортних процесів та запропоновані методи оцінювання ймовірності та деякі принципи управління екологічними ризиками на залізничному транспорті.

На жаль, у цих роботах не проведено класифікацію транспортних подій за їхніми наслідками, не проаналізовані основні властивості небезпечних вантажів різних класів безпеки щодо їхнього впливу на навколишнє середовище, а також не розглянуті кількісні та якісні характеристики негативного впливу небезпечних вантажів на довкілля. Не знайшло свого місця й прогнозування процесів розвитку ймовірних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами та їхнього впливу на навколишнє середовище. Не розглянуті математичні моделі щодо визначення параметрів небезпечних чинників аварійних і аварійних ситуацій з небезпечними вантажами. Не проаналізовані основні завдання з підвищення ефективності функціональної підсистеми залізничного транспорту щодо запобігання і реагування на аварійні ситуації.

У багатьох зарубіжних країнах нині велика увага приділяється проблемі інтелектуалізації транспортних процесів, серед них і для підвищення рівня безпеки перевезень, покращення екологічної обстановки, зниження негативного впливу людського фактора на якість керування тощо.

Ще один напрям наукових досліджень присвячений науково-методичним підходам створення інтелектуальних транспортних систем, з урахуванням особливостей функціонування залізничного транспорту, застосування у їх складі експертних систем і систем підтримки прийняття рішень, застосуванню інформаційних технологій, новітніх систем зв'язку і моніторингу стану об'єктів інфраструктури і рухомого складу. Деякі аспекти таких підходів розглянуті, зокрема, у роботах [95, 102].

Результати аналізу сучасних принципів управління станом навколишнього середовища на залізничному транспорті у процесах транспортування і



використання нафтопродуктів подані у роботі, в якій також запропоновано один з шляхів оптимізації існуючих схем такого управління з метою підвищення еколого-економічних показників [47].

У роботі [95] розглядаються питання щодо організації взаємодії аварійно-рятувальних служб різного підпорядкування при ліквідуванні наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами.

Дисертаційна робота [88] присвячена методам управління безпекою перевізного процесу небезпечних вантажів та шляхам підвищення екологічної безпеки, зокрема за рахунок розроблення нових принципів проектування систем безпеки перевезень небезпечних вантажів на підставі інформаційних технологій.

Застосуванню систем підтримки прийняття рішень та експертних систем при управлінні процесами руху поїздів, перевезенні пасажирів і вантажів, скороченню простоїв вагонів, проведенню ремонтів об'єктів інфраструктури та рухомого складу присвячені роботи [84, 89, 90, 94].

У роботі [91] пропонується розробити багаторівневу СППР із зв'язком між рівнями на основі залізничної мережі зв'язку за допомогою терміналів, які встановлені на відповідних мобільних та стаціонарних пунктах управління. В ній пропонується розглядати кількість сил і засобів необхідних для ліквідування аварійної ситуації, як функцію від завданої нею шкоди.

Технології комплексного управління надійністю, ризиками на усіх етапах життєвого циклу залізничного транспорту, яка базується на використанні сучасних інформаційних систем, для розв'язування завдань стійкого управління перевізним процесом із заданими показниками безпеки та надійності залізничного транспорту (АС УРРАН) розглянуті у роботі [64].

У роботах [319 – 322] розглядаються експертні системи, що застосовуються для управління вантажними перевезеннями, організації ремонту і технічного обслуговування рухомого складу та проектування залізничної інфраструктури.

У наведених вище роботах з проблем створення інтелектуальних транспортних систем не розглянуті особливості реагування на залізничні екологічні небезпечні аварійні ситуації, не здійснене дослідження впливу своєчасності прийняття управлінських рішень на ймовірність перебування залізничної транспортної системи у стані її надійного функціонування. Не знайшло

свого відображення алгоритми дій оперативних штабів пунктів управління при аварійних ситуаціях з небезпечними вантажами, що є основою для бази знань інтелектуальної СППР. Не здійснене моделювання дій сил і засобів ліквідаційних підрозділів при локалізації та ліквідації наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами. Не розглянуті науково-прикладні аспекти застосування принципів мережецентричного управління реагуванням на залізничні аварійні ситуації.

#### **1.4. Вибір напрямку та завдань досліджень**

Дослідження проблеми підвищення ефективності забезпечення екологічної безпеки при ліквідуванні залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами шляхом застосування науково обґрунтованої методології управління силами і засобами ліквідаційних підрозділів для обмеження і запобігання шкідливого впливу на довкілля і життєдіяльність людини приводить до висновку, що існуючі нині методології не дозволяють здійснювати інформаційну підтримку прийняття своєчасних обґрунтованих раціональних рішень керівника ліквідації таких ситуацій.

Зважаючи на це, метою дисертаційної роботи є створення наукових основ управління екологічною безпекою при ліквідуванні аварійних ситуацій з небезпечними вантажами на залізничному транспорті з урахуванням закономірностей розвитку таких ситуацій, застосування новітніх методів інформаційної підтримки процесів вироблення управлінських рішень та організації раціонального управління різнорідними силами і засобами ліквідаційних підрозділів для зменшення шкідливого впливу на довкілля та життєдіяльність людини.

Згідно з метою дослідження в роботі потрібно розв'язати такі проблеми:

- на основі системного підходу проаналізувати функціонування системи залізничного транспорту як мегасистему довкілля;
- проаналізувати причини і особливості залізничних аварійних ситуацій, а також статистичні дані щодо виникнення і наслідків таких ситуацій при транспортуванні небезпечних вантажів за останні десять років;

- провести аналіз джерел, присвячених проблемам управління екологічною безпекою при ліквідуванні аварійних ситуацій з небезпечними речовинами на промислових об'єктах і транспорті;
- дослідити основні шкідливі властивості небезпечних вантажів, а також визначити кількісні та якісні характеристики негативного впливу цих вантажів на довкілля;
- розробити типові сценарії розвитку аварійних ситуацій з небезпечними вантажами та виявити причинно-наслідкові зв'язки процесів розвитку таких ситуацій з характеристиками їхніх наслідків;
- розробити структурно-аналітичні моделі визначення величини небезпечних для довкілля чинників залізничних аварійних ситуацій при транспортуванні газів і легкозаймистих речовин, що не є отруйними, та порядок визначення параметрів зони забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливі нафтопродуктів;
- проаналізувати існуючі математичні моделі прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері та основні фізико-хімічні процеси горіння і вибуху небезпечних вантажів різних агрегатних станів;
- розробити метод проведення розрахунків величин забруднення зон уражень внаслідок аварійної ситуації, пов'язано з викидом хімічно-небезпечної легкозаймистої речовини;
- розробити структурно-аналітичну модель метода визначення еквівалентної кількості сильнодіючої отруйної речовини у первинній та вторинній хмарах;
- провести комп'ютерний модельний експеримент щодо оцінювання наслідків залізничної аварійної ситуації з легкозаймистою речовиною;
- проаналізувати особливості управління реагуванням на залізничні аварійні ситуації та основні методи організації відповідних робіт у аварійній ситуаціях з небезпечними вантажами;
- розробити математичну модель функціонування залізничної транспортної системи при реагуванні на аварійні ситуації з небезпечними вантажами;

- дослідити раціональні способи реагування на залізничні аварійні ситуації з небезпечними вантажами та організацію ліквідаційних робіт, розробити структурно-логічні схеми дій оперативного штабу у таких ситуаціях;
- розробити структурно-логічні схеми дій оперативного штабу у аварійних ситуаціях з небезпечними вантажами, пов'язаних з виливанням (розсипанням), вибухом, пожежами витікання чи розливу таких вантажів;
- проаналізувати можливі напрями підвищення ефективності застосування пожежних та відновних поїздів для ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій;
- розробити математичні моделі функціонування ліквідаційних підрозділів та їхніх оперативних з'єднань щодо відновлення безпечного стану і належного рівня екологічної безпеки залізничної транспортної системи;
- дослідити сферу застосування мережецентричних комп'ютерних методів оптимального управління локалізацією аварійних ситуацій та ліквідацією наслідків;
- розробити математичні моделі інформаційних процесів реагування на залізничні аварійні ситуації з небезпечними вантажами;
- розробити варіант структури системи підтримки прийняття рішення ситуаційного центру управління реагуванням на залізничні аварійні ситуації.

## РОЗДІЛ 2

### ВПЛИВ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ НАСЛІДКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ З НЕБЕЗПЕЧНИМИ ВАНТАЖАМИ

#### 2.1. Основні властивості небезпечних вантажів, що впливають на навколишнє середовище

До небезпечних вантажів належать речовини, матеріали, вироби, відходи виробничої та іншої діяльності, які внаслідок притаманних їм властивостей, за наявності певних чинників, можуть під час перевезення спричинити вибух, пожежу, пошкодження технічних засобів, пристроїв, споруд та інших об'єктів, заподіяти матеріальні збитки та шкоду довкіллю, а також призвести до загибелі, травмування, отруєння людей, тварин і які за міжнародними договорами, згода на обов'язковість яких надана Верховною Радою України, або за результатами випробувань в установленому порядку залежно від ступеня їх впливу на довкілля або людину віднесено до одного з класів небезпечних речовин [96].

Класифікація небезпечних вантажів, тобто належність їх до класу, категорії та групи пакування, здійснюється відповідно до Державного стандарту України залежно від виду та ступеня їхньої потенційної небезпеки за показниками і критеріями [96, 102].

Небезпечні вантажі поділяються на 9 класів. Клас чи підклас небезпечності вантажу визначаються його специфічними властивостями, характером та ступенем небезпеки, а вони, у свою чергу, зумовлюють особливості поводження з вантажем при перевезенні, а також тяжкість можливих наслідків для середовища при аварійних ситуаціях.

Таким чином, не тільки теоретичне, але й велике практичне значення має дослідження номенклатури небезпечних вантажів та виду і ступеня їх небезпеки. Таке дослідження було здійснене шляхом аналізу даних аварійних карток на усі класи небезпечних вантажів, що перевозяться залізничним транспортом.

На основі статистичних даних результатів вантажних перевезень небезпечних вантажів залізничним транспортом України побудовані графіки транспортування таких вантажів за період з 2006 р. по 2017 р. ( рис 2.1).

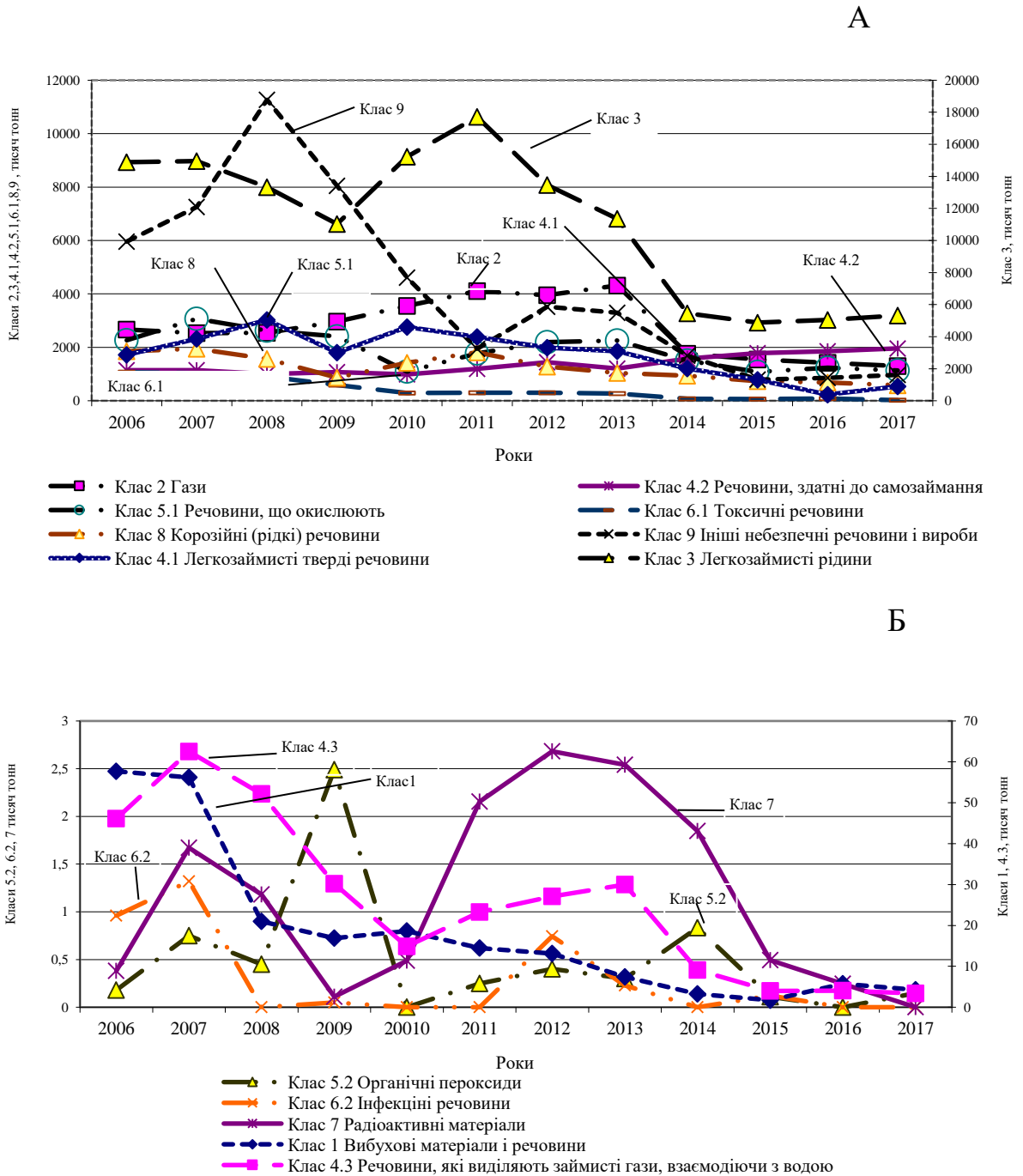


Рис. 2.1. Динаміка транспортування небезпечних вантажів залізничним транспортом за період з 2006 року по 2017 рік

На рис. 2.1а подана динаміка транспортування вантажів залізничним транспортом класів 2,3,4.1,4.2, 5.1,6.1, 8 та 9, а на рис. 2.1, б – класів 1, 4.3, 5.2, 6.2 та 7.

Відносна кількість вантажів різних класів небезпеки, транспортування яких залізничним транспортом України здійснювалося у період 2006 – 2017 рр., становить: клас 1 – 0,09%, клас 2 – 11%, клас 3 – 45%, клас 4.1 – 7 %, клас 4.2 – 5%, клас 4.3 – 0,12%, клас 5.1 – 7%, клас 5.2 – 0,002%, клас 6.1 – 2%, клас 6.2 – 0,001%, клас 7 – 0,005%, клас 8 – 5%, клас 9 – 18%.

До небезпечних вантажів класу 1 належать вибухові та піротехнічні речовини та вибухові вироби [24, 25, 96 – 99, 103, 104, 106, 107].

До вибухових речовин належать тверді або рідкі речовини, чи суміші речовин, які здатні до хімічної реакції з виділенням газів такої температури, тиску та швидкості, що призводять до пошкодження навколишніх об'єктів.

Піротехнічні речовини, які являють собою тверді чи рідкі речовини, або суміші речовин, призначені для утворення зовнішніх ефектів (теплових, світлових, звукових, димових або їхнього поєднання) у результаті екзотермічних реакцій, що самопідтримуються й протікають без детонації.

Вибуховими речовинами є вироби, що містять одну чи декілька вибухових або піротехнічних речовин.

Залежно від виду небезпеки небезпечні вантажі класу 1 відносяться до одного з підкласів, які визначені правилами перевезень [96].

Встановлений такий розподіл вантажів за класами та підкласами:

– підклас 1.1 – речовини та вироби, які характеризуються небезпекою вибуху масою (вантажів цього класу 32,8 % від загальної кількості найменувань);

– підклас 1.2 – речовини та вироби, які характеризуються небезпекою розкидання та суттєвого пошкодження навколишніх предметів, але не створюють небезпеки вибуху масою. Вибух окремого пакування (виробу, частини пакування) може призвести до істотного пошкодження навколишніх предметів, ініціювати вибух інших пакувань (18,4% вантажів класу 1);

– підклас 1.3 – речовини та вироби, які характеризуються небезпекою загоряння та виділення значної кількості тепла під час горіння, а також незначною небезпекою вибуху, або розкидання, або тим та іншим, але не характеризується небезпекою вибуху масою (20,6% вантажів 1 класу небезпеки);

– підклас 1.4 – речовини та вироби, які становлять незначну небезпеку у разі їх займання або ініціювання під час транспортування (23,3% вантажів класу 1).

Результати дії таких вантажів виявляються, в основному, всередині пакування, або викиду осколків (уламків) значних розмірів або на значну відстань не відбувається. Крім, того зовнішня пожежа не повинна бути причиною миттєвого вибуху майже усього вмісту пакування (22,4 % цього класу небезпеки);

– підклас 1.5 – речовини, які характеризуються небезпекою вибуху масою, але мають настільки низьку чутливість, що за звичайних умов транспортування існує дуже мала ймовірність їхнього ініціювання, або переходу від горіння до детонації. Причому імовірність переходу від горіння до детонації зростає під час транспортування таких речовин у великих кількостях (4% вантажів 1 класу небезпеки);

– підклас 1.6 – вироби, які містять тільки малочутливі до детонації речовини, що не здатні до вибуху масою, та характеризуються ймовірністю випадкового ініціювання або поширення вибуху. Небезпека, яка характерна до вантажів цього підкласу, обмежується вибухом одного виробу (0,9% вантажів цього класу).

Для небезпечних вантажів класу 1 залежно від їхніх властивостей та можливості сумісного перевезення з іншими небезпечними вантажами цього класу встановлено 13 груп сумісності, наведених у табл. А.1 Додатка А.

За ступенем небезпеки підкласи вантажів 1 класу розташовуються у такому порядку: 1.1, 1.5, 1.2, 1.3, 1.6 і 1.4.

До небезпечних вантажів класу 2 належать [24, 25, 95 – 100, 111, 112]:

– гази, тобто речовини чи суміші речовин, які за температури 50°C мають тиск пари вищий ніж 300 кПа або цілком газоподібні за температури 20°C і при нормальному тиску 101,3 кПа;

– вироби, які містять гази, у тому числі й аерозольні розпилювачі.

Речовини та вироби класу 2 підрозділяються на:

1. Стиснені гази – гази з критичною температурою мінус 50°C або нижче.

2. Скраплені гази з критичною температурою вище за мінус 50°C, а саме:

– скраплені гази високого тиску – гази з критичною температурою від мінус 50°C до + 65°C;



– скраплені гази низького тиску – гази з критичною температурою вище за  $+65^{\circ}\text{C}$ .

3. Охолоджені рідкі гази – гази, які знаходяться у рідкому стані через їхню низьку температуру.

4. Гази, розчинені під тиском, – гази, які розчинені у рідкому розчиннику.

5. Аерозольні упаковки і малі ємкості, які містять газ (газові балончики).

6. Інші вироби, які містять газ під тиском.

7. Зразки газів – гази, що не знаходяться під тиском, й які підпадають під дію спеціальних вимог.

Речовини та вироби (за винятком аерозольних упаковок) класу 2 належать до однієї з таких груп залежно від їхніх небезпечних властивостей:

A– задушливі; O– окисники; F – займисті; T– отруйні; TF – отруйні, займисті; TC – отруйні, корозійні; TO – отруйні, окиснювальні; TFC – отруйні, займисті, корозійні; TOC – отруйні, окиснювальні, корозійні.

Основний вид небезпеки (тобто підклас) газів, які характеризуються декількома видами небезпеки, визначається з урахуванням пріоритету небезпеки такого, що підклас 2.3 має пріоритет над усіма іншими підкласами, а підклас 2.1 має пріоритет над підкласом 2.2.

Відносна кількість вантажів класу 2 за їхніми властивостями подана у таблиці А.2 Додатка А та на рис. 2.2.

До небезпечних вантажів класу 2 відносяться гази і вироби, які містять гази. Вантажі цього класу небезпеки поділяються на 3 підкласи: займисті гази незаймисті нетоксичні гази, токсичні гази.

До вантажів цього класу відносяться стиснені (22%) і скраплені гази (43,9%) високого та низького тиску; охолодженні рідкі гази (7,3%); гази, розчиненні під тиском (2,4%), аерозольні упакування і малі ємкості з газом (4,9%); інші вироби, що містять газ під тиском (12,2%) та зразки газів (7,3%).

Дані про відносну кількість вантажів класу 2 за їхніми небезпечними властивостями подані на рис 2.2.

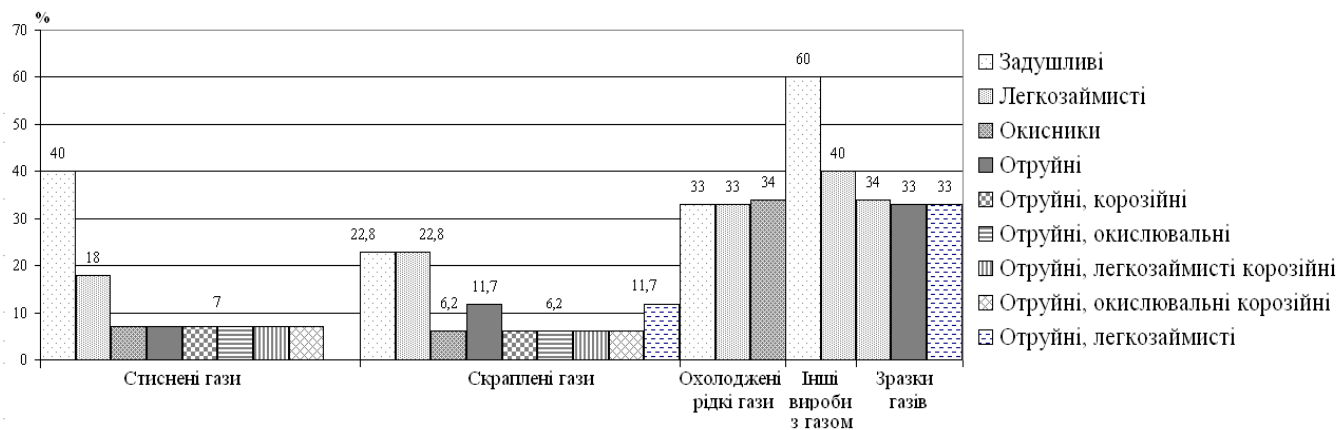


Рис. 2.2. Відносна кількість вантажів класу 2 за їхніми небезпечними властивостями

З даних рис. 2.2 видно, що, наприклад, із стиснених газів найбільшу небезпеку становлять задушливі гази, а із скраплених – задушливі і легкозаймісті гази.

Результати таблиці А.2 свідчать, що стиснені гази становлять 22 % від усіх видів газів, скраплені гази складають 43,9%, частина охолоджених рідких газів становить 7,3%, на газ, розчинений під тиском, припадає 2,4%, аерозольні упаковки і малі ємкості, які містять газ, становлять 4,9%, на інші вироби, що містять газ, і зразки газів припадає 12,2% та 7,3% відповідно.

Транспортну небезпеку вантажів цього класу обумовлює те, що гази стиснені, зріджені і розчинені під тиском в ємкостях (цистернах, балонах), де створюється надлишковий тиск, який значно підвищується зі збільшенням температури і може призвести до розгерметизації ємкості або до її руйнування.

Порожні цистерни з-під займистих зраджених газів мають підвищену небезпеку, поводження з ними унеможлиблює пошкодження котла з причини падіння надлишкового тиску в об'ємі котла, де може утворитися вибухонебезпечна суміш газу з повітрям В умовах пожежі такі цистерни прогриваються з великою швидкістю і через підвищення тиску можливі їх розгерметизація або руйнування.

До небезпечних вантажів класу 3 (легкозаймісті рідини) належать [24, 25, 96 – 99, 103, 104, 106, 107]:

– легкозаймісті рідини (ЛЗР), тобто рідини, суміші рідин, розчини чи суспензії (наприклад, фарба, оліфа, лак тощо), які мають температуру спалаху не вище 60°C у закритому тиглі або не вище 66°C у відкритому тиглі;

– рідкі десенсибілізовані вибухові речовини, тобто вибухові речовини, які для отримання їхніх вибухових властивостей розчинені у воді чи інших рідких речовинах, або речовини у вигляді суспензії;

– рідини, що надаються до перевезення за температури не нижче температури їх спалаху, а також речовини, що надаються до перевезення або перевозяться у рідкому стані за підвищеною температурою та які виділяють займисту пару за температури, яка не перевищує максимальну температуру під час перевезення.

Залежно від виду додаткової небезпеки небезпечні вантажі цього класу розподіляються на категорії: без додаткового виду небезпеки, токсичні, корозійні, токсичні та корозійні, десенсибілізовані, за підвищеної температури.

Відносна кількість найменувань речовин або виробів класу 3 за їхніми небезпечними властивостями наведена у таблиці А.3 Додатка А та на рис. 2.3.

Найбільшій кількості речовин та виробів цього класу притаманні властивості легкозаймістих рідин без додаткової небезпеки (46,8%). Отруйні речовини становлять (38,7%, з них 62,5% - пестициди), на корозійні речовини припадає 8,1%, отруйними і корозійними речовинами є 1,6%, десенсибілізовані вибухові речовини складають 4,8%.

Загальною властивістю вантажів класу 3 у разі витікання є здатність створювати над поверхнею розлитої рідини горюче середовище з пожежонебезпечною концентрацією парів при температурах навколишнього повітря вище температури спалаху. Горюча концентрація може поширюватися від місця виникнення на відстань понад 2 км, а низькі температури самозаймання парів (100 – 300°C) призводять до їх займання від нагрітих тіл і поверхонь. Насичені пари ЛЗР з підвищенням температури навколишнього середовища створюють у цистерні значний тиск, здатний призвести до її розгерметизації.

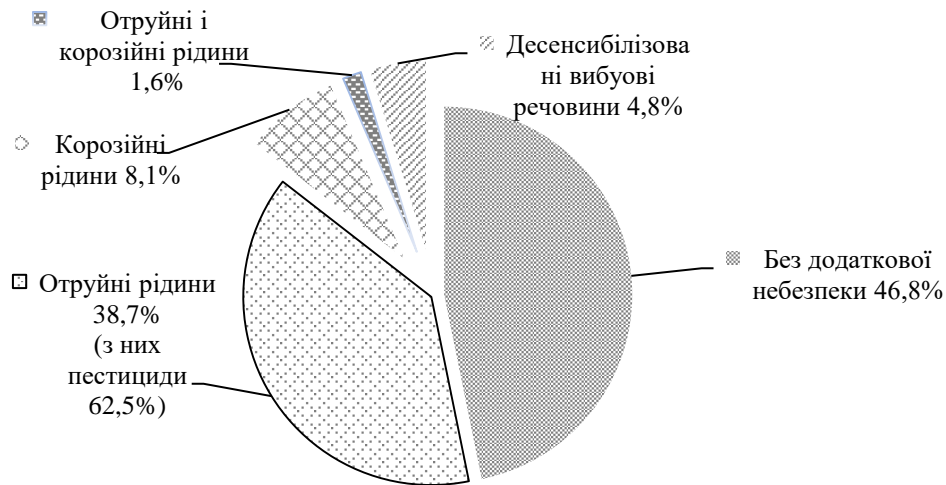


Рис. 2.3. Відносна кількість видів додаткової небезпеки легкозаймистих вантажів

Розігріті пожежею цистерни, особливо верхні їх частини, які не контактують з рідкою фазою, можуть спричинити загоряння парової фази внаслідок переміщення рідкої фази і гідроудару при зсуві цистерни з місця сильними ривками.

Порожні цистерни із залишками ЛЗР містять насичені пари, вибухонебезпечна концентрація яких знаходиться у температурних межах поширення полум'я. Якщо температура навколишнього середовища лежить у діапазоні температурних меж поширення полум'я, то за наявності джерела запалювання може відбутися вибух пароповітряної суміші.

До небезпечних вантажів класу 4.1 (легкозаймисті тверді речовини, самореактивні речовини і тверді десенсибілізовані вибухові речовини) належать [24, 25, 96 – 99, 103, 104, 106, 107]:

– легкозаймисті тверді речовини (ЛЗТ), тобто порошкоподібні, гранульовані або пастоподібні речовини, що можуть легко загорятися під короткочасним впливом джерела запалювання і під час горіння яких полум'я поширюється швидко, а також тверді речовини або вироби, що здатні загорятися під час тертя;

– самореактивні речовини, тобто речовини, які здатні до інтенсивного екзотермічного розкладання без доступу повітря;

– тверді десенсибілізовані вибухові речовини, тобто вибухові речовини, які для стримування їхніх вибухових властивостей змочені водою чи спиртами або розбавлені іншими речовинами та які можуть вибухати у разі недостатнього розбавлення.

Залежно від виду додаткової небезпеки небезпечні вантажі класу 4.1 належать до таких категорій: без додаткового виду небезпеки, окисники, токсичні, корозійні, десенсибілізовані, десенсибілізовані токсичні, самореактивні, самореактивні з небезпекою вибуху [96 – 99, 103, 104, 106, 107].

Легкозаймистими твердими речовинами є тверді речовини, що здатні легко займатися і тверді речовини, здатні викликати займання при терті.

Твердими речовинами, які здатні легко займатися, є порошкоподібні, гранульовані або пастоподібні речовини, які можуть легко займатися при короткочасному контакті з джерелом запалювання та якщо полум'я розповсюджується швидко. Небезпека може виникати не тільки від полум'я, але й від токсичних продуктів горіння. Особливо небезпечні у цьому сенсі порошки металів, бо погасити полум'я у цьому випадку важко з тієї причини, що вогнегасні речовини, такі як вуглецю діоксин або вода, можуть тільки посилити небезпеку.

До самореактивних речовин належать термічно нестійкі речовини, здатні зазнавати бурхливе екзотермічне розкладання без участі кисню (повітря).

Розкладання самореактивних речовин може бути ініційоване у результаті дії тепла, контакту з каталізуючими додатками (наприклад, кислотами, з'єднаннями важких металів, основами) тертя або удару. Швидкість розкладання зростає з підвищенням температури від властивостей речовини. Певні самореактивні речовини можуть розкладатися з вибухом, особливо якщо вони знаходяться у замкненій ємкості. Ця властивість може бути змінена додаванням розріджувачів або використанням відповідної тари.

Відносна кількість найменувань речовин або виробів класу 4.1 за їх небезпечними властивостями наведена в таблиці А.4 Додатка А.

Таблиця А.4 демонструє, що найбільшу небезпеку складають легкозаймисті тверді речовини без додаткової небезпеки (25,6%) та самореактивні речовини (51,3%).

У разі пожежі з вантажами цього класу враховується, що недостатнє зволоження вантажу сприяє самозайманню після припинення горіння. Це викликає необхідність здійснення додаткового контролю за появою повторних вогнищ.

До небезпечних вантажів класу 4.2 (самозаймисті речовини) належать [96 – 99, 103, 104, 106, 107]:

– пірофорні речовини, тобто речовини, включаючи суміші та розчини, які навіть у малих кількостях займаються у разі контакту з повітрям протягом 5 хвилин;

– самонагрівні речовини, тобто речовини, включаючи суміші та розчини, або вироби, які у разі контакту з повітрям без підведення енергії ззовні здатні до самонагрівання. Ці речовини займаються тільки у великих кількостях (кілограми) і лише через тривалий час (години або дні).

Причиною самонагрівання цих речовин, яке призводить до самозаймання, є реакція речовини з киснем (повітрям) при якій тепло виділяється і не відводиться достатньо швидко у оточуюче середовище. Самозаймання зчиняється тоді, коли швидкість утворення тепла перевищує швидкість тепловіддавання й досягається температура самозаймання.

Дані про відносну кількість властивостей речовин та виробів класу небезпеки 4.2 надані у таблиці А.5 Додатка А.

До небезпечних вантажів класу 4.3 належать речовини, які, взаємодіючи з водою, можуть виділяти займисті гази, здатні утворювати з повітрям вибухові суміші. Такі суміші легко займаються від будь-яких звичайних джерел запалювання, наприклад, від відкритого вогню, іскор слюсарних інструментів та незахищених електричних ламп [96 – 99, 103, 104, 106, 107].

Відносна кількість найменувань речовин або виробів класу 4.3 за їх небезпечними властивостями надана у таблиці А.6 Додатка А.

Найбільшу небезпеку складають речовини, які виділяють займісті газу при взаємодії з водою без додаткової небезпеки, а також вироби, що містять у собі рідкі та тверді речовини (25,6%).

Вантажі цього класу небезпеки характеризуються високою активністю щодо води. Взаємодія з водою має характер вибуху. У ході хімічної реакції утворюються займісті (горючі) газу. Ці властивості враховуються при проведенні аварійних робіт поблизу водоймищ та річок, у дощову погоду або взимку

До небезпечних вантажів класу 5.1 (окислювальні речовини) належать [96 – 99, 103, 104, 106, 107]:

- тверді або рідкі речовини (включаючи суміші та розчини), що самі по собі не обов'язково є горючі, але через виділення кисню підтримують горіння, викликають і/або сприяють горінню інших матеріалів;

- вироби, які містять такі речовини.

Відносна кількість речовин та виробів, які містять речовини класу 5.1 за їх небезпечних властивостях подана у таблиці А.7 Додатка А. Таблиця підтверджує, що найбільшу небезпеку складають окислюючі рідкі та тверді речовини без додаткової небезпеки або вироби (74,1%).

До небезпечних вантажів класу 5.2 належать органічні піроксиди, тобто такі органічні речовини (тверді або рідкі), що мають двовалентну структуру –O–O– та можуть розглядатися як похідні пероксиду водню, у яких один чи обидва атоми водню заміщені органічними радикалами [96 – 99, 103, 104, 106, 107].

Речовини класу 5.2 підрозділяються на органічні пероксиди без регулювання температури, які становлять 50% від загальної чисельності речовин цього класу (P1) та органічні пероксиди з регулюванням температури, перевезення яких залізничним транспортом не допускається, які теж становлять 50% речовин цього класу (P2).

Органічні пероксиди є термічно нестабільними речовинами та за нормальної або підвищеною температури можуть піддаватися екзотермічному розкладанню, яке самоприскорюється. Крім того, вони можуть мати такі властивості: здатність розкладатися з вибухом, швидке горіння, чутливість до удару чи тертя, а також небезпечне реагування з іншими речовинами.

Властивостями небезпечних вантажів класів 5.1 і 5.2 є здатність розкладатися при нагріванні з утворенням кисню (розкладання пероксидів може мати характер вибуху), що сприяє розвитку пожежі в умовах аварійної ситуації; утворювати з

горючими речовинами суміші, які самозаймаються в момент їх утворення або займаються при наявності джерела запалювання; утворюють токсичні речовини в контакт з неорганічними речовинами.

До небезпечних вантажів класу 6.1 належать токсичні речовини, тобто речовини (включаючи суміші та розчини), які у разі потрапляння до дихальних шляхів, шлунка та/або на шкіру здатні спричинити отруєння, смерть, травму або заподіяти шкоду здоров'ю людини [96 – 99, 103, 104, 106, 107].

Відносна кількість найменувань речовин класу 6.1 за їхніми небезпечними властивостями надана у таблиці А.8 Додатка А.

Найбільшу небезпеку становлять отруйні речовини без додаткової небезпеки (67,9%) та отруйні легкозаймисті речовини (18,1%).

Особливо небезпечними вантажами підкласу 6.1 є легколеткі речовини, які при аварійних ситуаціях можуть створювати небезпечні концентрації і призвести до отруєння не тільки в зоні аварійної ситуації, а й на значній відстані від неї. Більшість вантажів цього підкласу є горючими речовинами і при горінні утворюють газоподібні токсичні речовини. У разі пожежі нагрівання призводить до випаровування і розкладання негорючих і малолетких отруйних вантажів, що підвищує небезпеку отруєння.

До небезпечних вантажів класу 6.2 належать інфекційні речовини, тобто речовини, що містять патогенні організми (мікроорганізми (включаючи бактерії, віруси, рикетсії, паразити, грибки), а також інші інфекційні агенти, такі як пріони), які спричиняють захворювання людей або тварин [96 – 99, 103, 104, 106, 107].

Речовини класу 6.2 підрозділяються на:

I1 – інфекційні речовини, що небезпечні для людей (14,3 % усіх речовин цього класу);

I2 – інфекційні речовини, небезпечні тільки для тварин, теж 14,3%;

I3 – відходи лікарняного походження (43,9%);

I4 – діагностичні зразки (28,6% усіх речовин класу 6.2).

Небезпечні вантажі класу 6.2 поділяються на інфекційні речовини, небезпечні для людей; інфекційні речовини, небезпечні для тварин; відходи лікарняного походження; діагностичні зразки.

Небезпечні вантажі класу 6.2 належать до однієї з двох категорій:



– категорія А – інфекційні речовини, які у разі впливу під час перевезення здатні викликати постійну непрацездатність людей, утворити загрозу життю людей та тварин або призвести до захворювання;

– категорія В – інфекційні речовини, що не відповідають визначенню категорії А.

До небезпечних вантажів класу 7 належать радіоактивні матеріали, тобто будь-які матеріали, що містять радіонукліди, у яких питома активність, а також повна активність вантажу перевищує межі, встановлені директивними нормами і правилами [96 – 99].

До небезпечних вантажів класу 8 належать корозійні або їдкі речовини, а також вироби, які їх містять, тобто речовини (включаючи суміші та розчини), які характеризуються відповідними показниками й критеріями та які у разі контакту зі шкірою та слизовими оболонками викликають травми; за наявності води або вологи повітря утворюють корозійні рідини та/або пару чи аерозоль; у разі витoku чи розсипання спричиняють пошкодження інших вантажів або транспортних засобів або навіть спричиняють їх руйнування [96 – 99, 103, 104, 106, 107].

Окремі вантажі цього класу є горючими речовинами, які утворюють під час горіння токсичні продукти, виявляють окислювальні властивості, запалюють горючі речовини (матеріали).

Найбільшу небезпеку становлять корозійні речовини без додаткової небезпеки (70,7%) та корозійні речовини (31,8%).

Відносна кількість найменувань речовин та виробів класу 8 за їхніх небезпечних властивостей надана у таблиці А.9 Додатка А.

До небезпечних вантажів класу 9 належать речовини (включаючи суміші й розчини), матеріали та вироби, які під час транспортування становлять небезпеку, не характерну іншим класам [96 – 99, 103, 104, 106, 107].

Небезпечні вантажі цього класу належать до таких категорій: речовини, дрібний пил яких у разі вдихання може бути небезпечним для здоров'я; речовини і вироби, які у разі пожежі виділяють діоксини; речовини, що виділяють легкозаймисту пару; літієві батареї; рятувальні й транспортні засоби, що містять небезпечні вантажі у складі устаткування; речовини, які небезпечні для навколишнього та водного середовища; речовини, що надаються до перевезення з

підвищеною температурою; намагнічений матеріал; інші небезпечні речовини, матеріали і вироби, яким призначено номер ООН; речовини, що становлять небезпеку у разі їхнього перевезення навалом морськими та річковими суднами.

Відносна кількість найменувань речовин та виробів класу 9 за їхніми небезпечними властивостями надана у таблиці А.10 Додатка А та на рис. 2.4.

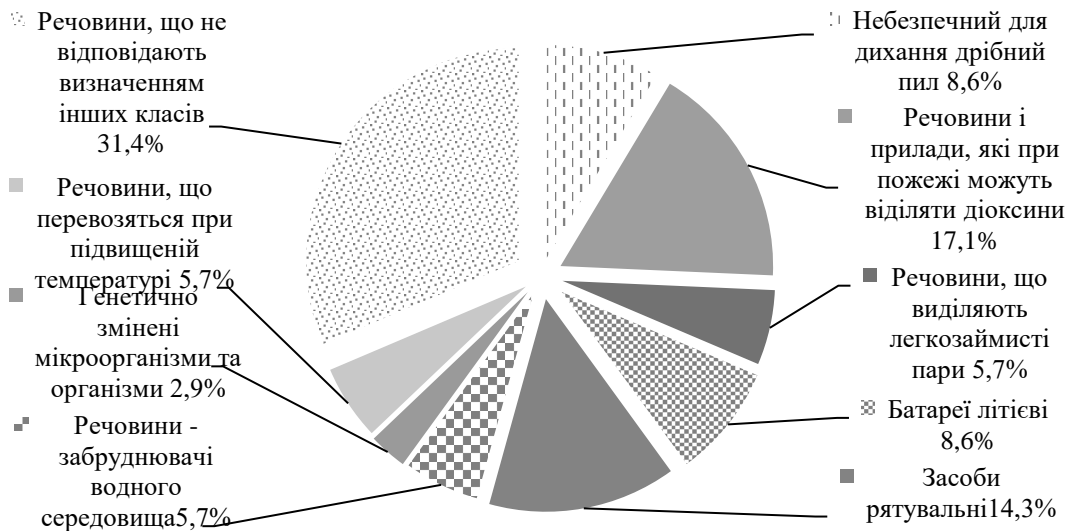


Рис. 2.4. Відносна кількість видів небезпеки вантажів класу 9

З рис. 2.4 видно, що найбільшу небезпеку становлять речовини та прилади, які під час пожежі можуть виділяти діоксини (77,1%), а також речовини, що являють собою небезпеку при перевезенні, але не відповідають визначенням інших класів (31,4%).

## 2.2. Кількісні та якісні характеристики негативного впливу небезпечних вантажів на довкілля

Дослідження основних фізико-хімічних, вибухо- та пожежонебезпечних властивостей небезпечних вантажів, що перевозяться залізничним транспортом, дозволило виявити види небезпеки, які утворюються під час їхньої взаємодії з

повітрям, водою, кислотами, лугами, металами тощо, а також при нагріванні та вибуху [24, 25, 102, 103].

Небезпека під час взаємодії небезпечних вантажів з повітрям, яка сталася внаслідок аварійної ситуації, надана у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

### Види небезпеки під час взаємодії небезпечних вантажів з повітрям, (%)

Класи небезпеки	Утворює токсичний пил	Пари важчі, накопичуються в низинах, підвалах тунелях	Пари утворюють вибухонебезпечні суміші	Реагують з виділенням великої кількості тепла	Самозаймаються	Над поверхнею розлитої рідини утворюється горюча концентрація парів при температурі навколишнього середовища								Розкладаються	Самозаймаються з утворенням вибухонебезпечних сумішей	Випромінює $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ - промені за умови руйнування пакування	Парують при виході в атмосферу	Леткі	Горючі
						менше - 18 °С	більша - 18°С	більше -32° С	від - 18°С до + 23°С	від -18°С до 61°С	від -13°С до +61°С	від +23°С до +61°С	При температурі сталаху і вище						
1	4,3	2,8	3,8	2,5	1,3											0,3			100
2		88,5	56,8		0,4												25,5	6,6	65
3		100	99,6			0,4	7,2	0,3	9,8	8,4	2,6	16,1	35,0					98,8	100
4.1																			
4.2		10,8	71,2		59,3									2,4				4,4	94,9
4.3																			
5.1															12,5				45,2
5.2		4,2																	
6.1		54,7	17,0		1,0		3,7			2,9						0,5		26,5	6
6.2													1,0						
8		69,4			0,5													12,7	53,8
9					6,6														90,3

Як видно з цієї таблиці найбільша кількість вантажів, пари яких здатні накопичуватися у низинах, є вантажі 3 і 2 класів небезпеки. Пари вантажів класів небезпеки 2,3, 4.1, 4.2 і 4.3 найбільш спроможні до утворення вибухонебезпечних сумішей. Вантажі 4.1, 4.2 і 4.3 класів небезпеки найбільш спроможні до самозаймання, а 0,3% з них – до випромінювання  $\alpha$ - $\beta$ - $\gamma$ - променів за умови руйнування пакування.

Відносна кількість вантажів класів небезпеки, які створюють різні види небезпеки під час взаємодії з водою надані у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

## Види небезпеки під час взаємодії небезпечних вантажів з водою, (%)

Класи небезпеки	Нерозчинні або не реагують	Важчі	Реагують бурхливо	Утворюють токсичні легкозаймисті гази	Вибухають	Виділяють велику кількість тепла	Забруднюють водоймища	Розкладаються	Утворюють корозійні і підтримуючі горіння гази	Утворюють горючі гази	Утворюють токсичні гази	Утворюють токсичні гази, можливий розігрів	Викликають займання горючих матеріалів	Токсичні та їдкі гази	Розчинні	Легші за воду
1	92,2	11,0	5,3	0,5	0,5	2,5									3,0	0,8
2	60,0						44,0	1,6	2,5	0,4					11,5	
3	77,2	4,9		0,9	1,4		97,7	4,3							54,8	22,8
4.1,4.2,4.3	40,0	19,7	13,6	1,4	20,3		67,1	2,4		28,5					1,4	4,4
5.1,5.2	38,1	0,6	6,5	4,2	1,8		44,6						52,4		61,9	
6.1,6.2	29,4	25,5		6,0		1,0	100	8,7		5,1			1,0			
8	88,1	10,4		0,5	8,9		92,7	0,8			56,1	3,6	25,5	1,8	11,9	12,7
9													0,9			

Аналіз цієї таблиці свідчить, що найбільша кількість вантажів, які забруднюють водоймища, є вантажі класів небезпеки 6.1, 6.2, а також вантажі 3-го та 8-го класів небезпеки. Найбільша кількість вантажів, що утворюють токсичні гази, це вантажі класів небезпеки 6.1, 6.2, а також 5.1 та 5.2, найбільш здатні до вибуху – вантажі класів 4.1,4.2, і 4.3, а також вантажі 8 класу.

Відносна кількість вантажів основних класів небезпеки, які створюють загрозу при взаємодії з речовинами доквілля, надані у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

## Види небезпеки при взаємодії з речовинами навколишнього середовища (%)

Класи небезпеки	Утворюють ВНС при взаємодії з горючими газами	Чутливі до удару, тертя, дії полум'я	При взаємодії з лугами займаються	Реагують з кислотам, лугами з виділенням великої кількості тепла	При взаємодії з мастилами (нафтопродуктами) вибухають	Викликають займання горючих матеріалів	Корозійні	Корозійні та окислюючі	Взаємодія з металами при зволоженні утворює займисті (горючі) газу	Сильні окислювачі	Можуть вибухати при ударі і терті	Вибухають в суміші з органічними речовинами	Самозаймаються при контакті з окислювачами	Кислотами розкладаються з утворенням токсичних і займистих газів	Руйнує метали, скло, кераміку, інші матеріали	Взаємодія з металами утворює горючі газу	Вибухають в контакт з окислювачами і горючими речовинами	Тверді залишки після випаровування рідини є сильними окислювачами
1		54,4	8,5	13														
2					2,5	2,5	11,1	1,2	9,1									
3							40,6											
4.1																		
4.2							9,8											
4.3																		
5.1						52,4	32,1			99,4	13,0	1,2						
5.2																		
6.1						1,0	40,0			1,0			3,7	3,9		0,2		
6.2																		
8						25,5	96,6			3,9		3,6			0,3	20,5	8,1	
9						0,9												0,9

Таблиця 2.3 вказує на те, що велика кількість вантажів 1 класу небезпеки чутливі до удару, тертя, дії полум'я, а також вибухають під дією інших вибухів. Вони ж становлять велику небезпеку для довкілля при взаємодії з лугами та кислотами. Під час взаємодії з мастилами (нафтопродуктами) вибухають деякі вантажі 2 класу небезпеки. Найбільша кількість вантажів, що викликають займання горючих матеріалів, це вантажі класів 5.1, 5.2, а також 8 класу. Найбільш корозійну дію мають вантажі 3 класу, а також класів 6.1, 6.2. Найсильнішими окислювачами є вантажі класів 5.1 і 5.2.

Відносна кількість вантажів різних класів небезпеки, які створюють небезпеку при нагріванні, подані у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

## Види небезпеки при нагріванні небезпечних вантажів, (%)

Класи небезпеки	Виділяють отруйні гази	Виділяє займисті пари (гази)	Утворює з повітрям вибухонебезпечні суміші	Розкладаються з утворенням токсичних компонентів	Розкладаються з утворенням корозійних газів	Ємкості (балони) вибухають	Утворюють токсичні гази (пари, аерозолі)	Розкладаються з утворенням займистих газів	Розкладаються з вибухом	Розкладаються з утворенням кисню, що сприяє швидкому розвитку пожежі	Розкладання із самоприскоренням яке може закінчитися вибухом	Займаються (самозаймаються)	У порожніх ємкостях утворюються ВНС	Стають вибухонебезпечними
1	0,5	3,8	3,8											
2				17,7	11,5	97,5							53,9	
3						99,9							99,6	
4.1, 4.2 4.3		17,3				55,9	95,3	0,7					2,4	
5.1,5.2	11,3					33,3			69,6	80,1	12,5			
6.1,6.2		11,6				71,7	36,8		0,4	1,0	3,9	68,8	15,3	3,9
8			56,4			81,6			0,3	0,5	8,1		8,3	
9	75,0		21,9			66,9					1,2	28,5		

З даних цієї таблиці випливає, що найбільша кількість вантажів, які при нагріванні виділяють отруйні гази, є вантажі класів 5.1,5.2. Вантажі цих класів найбільш здатні до розкладання з вибухом і утворенням кисню (прискорює швидкість горіння). Найбільшою кількістю вантажів, яка утворює займисті й токсичні гази (пари), аерозолі, є вантажі класів 4.1,4.2 і 4.3. Найбільша кількість вантажів, здатних утворювати з повітрям вибухонебезпечні суміші, є вантажі 8 класу небезпеки. При нагріванні найбільша кількість ємкостей (балонів), що здатні вибухати, належать вантажам 3 класу, у найбільшій кількості порожніх ємкостей цього класу утворюються вибухонебезпечні суміші.

Види небезпеки, які утворюються під час горіння небезпечних вантажів, подані у таблиці 2.5.



Таблиця 2.6 свідчить, що 32,8% вантажів класів небезпеки 1 вибухають масою, з них 0,3% утворюють токсичні аерозолі та 4,5% здатні вибухати під дією інших вибухів. 0,6% вантажів класів небезпеки 5.1 і 5.2 під час вибуху утворюють небезпечні гази. Прийняття рішення керівником оперативного штабу з реагування на залізничну аварійну ситуацію, зокрема, потребує інформацію про поточний стан такої ситуації, який характеризується певними зовнішніми ознаками, та найбільш можливий її фінальний стан.

В роботах [104-106, 108 - 110] запропонований підхід до визначення фінальних станів аварійних ситуацій з пожежами небезпечних вантажів, а в роботі [152], крім того, ще й з врахуванням властивостей небезпечних вантажів щодо їх взаємодії з довкіллям, а також при нагріванні та вибуху, які були розглянуті у цьому підрозділі.

Визначені сукупності ознак та властивостей небезпечних вантажів, які характеризують поточні стани залізничних аварійних ситуацій дали можливість розробити інформаційні моделі на підставі системи продукцій, що враховує досвід експертів щодо ідентифікації аварійних ситуацій та визначення їх фінальних станів. Метод продукційних систем нині широко застосовується у теорії та практиці штучного інтелекту при побудові алгоритмів пошуку і моделювання процесів розв'язування задач людиною [152, 108-110].

Застосування цього методу сприяє здійсненню автоматизованого оцінювання обстановки у аварійній залізничній ситуації для вироблення рішення керівника оперативного штабу при взаємодії з СППР, у базі знань якої знаходяться відповідні правила і механізми продукційної системи.

Яке практичне застосування результатів цього дослідження специфічних властивостей, характеру та ступеня небезпеки вантажів відповідних класів та підкласів? Маючи наведені вище відсотки розподілу номенклатури небезпечних вантажів за класами та підкласами (а відповідно – за їхніми небезпечними



властивостями), можна обґрунтовано приймати рішення щодо забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту.

Отримані на цьому етапі дослідження відсоткові розподіли небезпечних вантажів за характером їх впливу на навколишнє середовище дають підставу приймати обґрунтовані рішення щодо забезпечення засобами нейтралізації, локалізації та ліквідації небезпечних речовин і обладнання пожежних та відновних поїздів.

### **2.3. Прогнозування процесів розвитку ймовірних залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами та їхнього впливу на довкілля**

Залізничним транспортом нині перевозяться значні обсяги небезпечних вантажів, які складають близько 18% усього вантажообігу залізниць. У середньому, за інших рівних умов, небезпечні вантажі знаходяться у процесі перевезення більше часу ніж звичайні. Крім того, значну кількість складають транзитні вантажі, які перевозяться у вагонах іноземних власників, що збільшує ризик виникнення транспортних подій [65, 68].

Все зазначене вище зумовлює важливість ефективного реагування на транспортну подію з небезпечним вантажем. Ефективність такого реагування залежить передусім від швидкості та обґрунтованості прийняття управлінського рішення, яке повинно ґрунтуватися на прогнозуванні розвитку ситуації в основі якого лежать запропоновані алгоритми ймовірнісних процесів розвитку типових аварійних ситуацій з небезпечними вантажами

Прийняття рішення керівником оперативного штабу з реагування на залізничну аварійну ситуацію, зокрема потребує інформацію про поточний стан такої ситуації, який характеризується певними зовнішніми ознаками, та найбільш можливий її фінальний стан.

В роботах [104-106, 108 – 110] запропонований підхід до визначення фінальних станів аварійних ситуацій з пожежами небезпечних вантажів, а в роботі [152], крім того, ще й з врахуванням властивостей небезпечних вантажів щодо їх взаємодії з довкіллям, а також під час нагрівання та вибуху, які були розглянуті у цьому підрозділі.

Визначені сукупності ознак та властивостей небезпечних вантажів, які характеризують поточні стани залізничних аварійних ситуацій дали можливість розробити інформаційні моделі на підставі системи продукцій, що враховує досвід експертів щодо ідентифікації таких ситуацій та визначення їхніх фінальних станів. Метод продукційних систем нині широко застосовується у теорії та практиці штучного інтелекту при побудові алгоритмів пошуку і моделювання процесів розв'язування задач людиною [108 – 110 , 152].

Застосування цього методу дозволяє здійснити автоматизоване оцінювання обстановки при аварійній ситуації для вироблення рішення керівником оперативного штабу при взаємодії з СППР, у базі знань якої знаходяться відповідні правила і механізми продукційної системи.

Дослідження інформаційних джерел, в яких розглядалися залізничні аварійні ситуації, дозволили з великого їх різноманіття виявити такі з них, які мають максимально можливі негативні наслідки їх реалізації у разі розвитку за найнесприятливішими сценаріями, що отримали назву типових.

Існує декілька підходів до класифікації типових сценаріїв залізничних аварійних ситуацій: залежно від виду небезпечного вантажу, місця його зберігання чи розташування, при виникненні аварійної ситуації в рухомому складі на шляху прямування чи знаходження на станції, контейнерних площадках, депо тощо [55, 56, 60, 62].

Розглянемо аварійні ситуації та їх можливий розвиток при перевезенні небезпечних вантажів з урахуванням їхніх небезпечних властивостей та виду.

При розглядання типових аварій із стисненими, зрідженими та розчиненими під тиском газами (ЗВГ) в ємкостях (цистернах) потрібно враховувати низку таких специфічних особливостей:

- при температурі доквілля вміст цистерни, як правило, – це двофазне середовище (рідина – пар) з тиском, який перевищує атмосферний (іноді у 7 – 8 разів);

- розгерметизація цистерни у будь-якому її місці призводить до витоку рідкого та (або) пароподібного середовища з утворенням у навколишньому середовищі вибухонебезпечної пароповітряної хмари;

- під час витоку рідкої фази одна її частина (у деяких випадках до 40%) миттєво випаровується, інша частина утворює дзеркало розливу, з якого відбувається інтенсивне випаровування речовини;

- ЗВГ, що перевозяться, є займистими речовинами, мінімальні енергії займання їх пари з повітрям дуже низькі. Зважаючи на це, найбільш ймовірним кінцем аварії з розгерметизацією цистерни є займання через деякий час речовини, що витікає з цистерни;

- згоряння вибухонебезпечних пароповітряних хмар паливно-повітряних сумішей може призвести до утворення ударних хвиль та, у подальшому, руйнування оточуючих об'єктів;

- під час нагрівання цистерни із ЗВГ у вогнищі пожежі відбувається підвищення температури рідини з відповідним збільшенням тиску парів всередині ємності, а також збільшення температури стінок цистерни, особливо у верхній її частині, яка не омивається рідкою фазою. Запобіжні клапани не встигають стравлювати газ і тому через 15 – 25 хв цистерна руйнується з вибухом, викидом полум'я на висоту до 150 м та утворенням нових вогнищ горіння на відстані до 150 м [55, 56, 60].

З урахуванням цього, «типовими» аварійними ситуаціями за участю газоподібних вантажів є:

- типова аварійна ситуація 1г (ТАС – 1г) – витікання газу при розгерметизації трубопроводів, відмові запірної арматури, при виникненні пробоїн тощо);
- типова аварійна ситуація 2г (ТАС – 2г) – розлиття газу у результаті виникнення пробоїн, розгерметизації чи сходу цистерни з рейок.

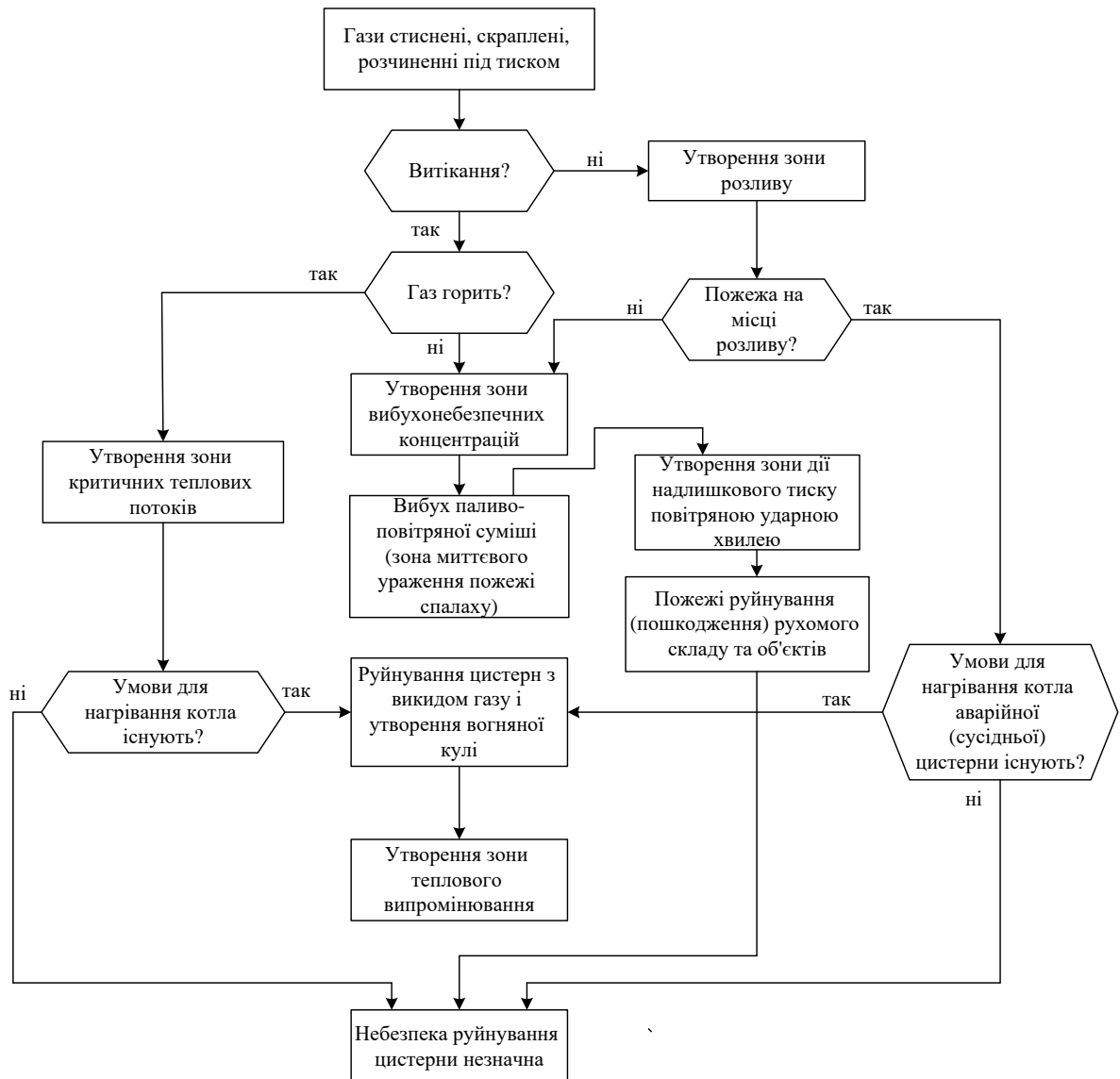


Рис. 2.5. Структурно-логічна схема ймовірних процесів розвитку типових аварійних ситуацій з вантажами другого класу небезпеки (ТАС – 1г й ТАС – 2г)

Рисунок 2.5 свідчить, що при розвитку аварійної ситуації ТАС -1г за умови, що газ, який витікає, не горить, утворюється зона вибухонебезпечних концентрацій, яка за наявності джерела запалювання, може призвести до вибуху паливо-повітряної суміші (зона миттєвого ураження пожежі – спалаху), утворення зони надлишкового тиску повітряною ударною хвилею.

За умови, що газ, який витікає, горить, утворюється зона критичних теплових потоків, коли нагрівання котла аварійної чи сусідньої цистерн може спричинити її руйнування з викидом газу і утворенням вогняної кулі. Це призводить до виникнення зони теплового випромінювання такої кулі та зони дії надлишкового тиску повітряною ударною хвилею, а також створюється небезпечний екологічний вплив.

При розливанні газоподібної небезпечної речовини утворюється зона розливу, яка створює небезпеку природному середовищу.

За умови, що існує пожежа розливу та є умови для нагрівання котла аварійної чи сусідньої цистерн, можливе руйнування цистерни з викидом газу і утворенням вогняної кулі. Подальші фазиси цього процесу аналогічні розглянутим вище.

При відсутності пожежі на місці розливу речовини, можливе утворення зони вибухонебезпечних концентрацій, вибух паливо-повітряної суміші з зоною миттєвого ураження пожежі – спалаху та зони дії надлишкового тиску повітряною ударною хвилею.

За відсутності умов щодо нагрівання котла аварійної (сусідньої) цистерн, небезпека їх руйнування є незначною [55, 56, 60].

Причинами виникнення аварійних ситуацій при перевезенні легкозаймистих речовин можуть статися: пробій корпусу цистерни при зіткненні залізничних рухомих складів або залізничних потягів з іншими транспортними засобами, схід цистерн з розливом рідини, відмова запірної арматури, пробій корпусу цистерн, серед них, й внаслідок терористичних актів.

Типові аварійні ситуації з легкозаймистими речовинами або пов'язані з витіканням (ТАС – 1л), або розливанням таких речовин (ТАС – 2л).

Якщо відбувається витікання легкозаймистої речовини, яка не горить, то можливе утворення зони вибухонебезпечних концентрацій та небезпечного екологічного впливу на довкілля.

За умови, що є джерело запалювання, може статися вибух паливо-повітряної суміші з утворенням зони миттєвого ураження пожежі-спалаху та зони надлишкового тиску повітряною ударною хвилею. Такий розвиток ситуації ТАС – 1л може призвести до пожеж у сусідніх спорудах і рухомому складі та на

місці витікання речовини, а також руйнуванню сусідніх цистерн і об'єктів інфраструктури залізниці, а також небезпечних екологічних наслідків.

Можливі розвитку типових аварійних ситуацій ТАС – 1 л і ТАС – 2 л поданий на рис.2.6.

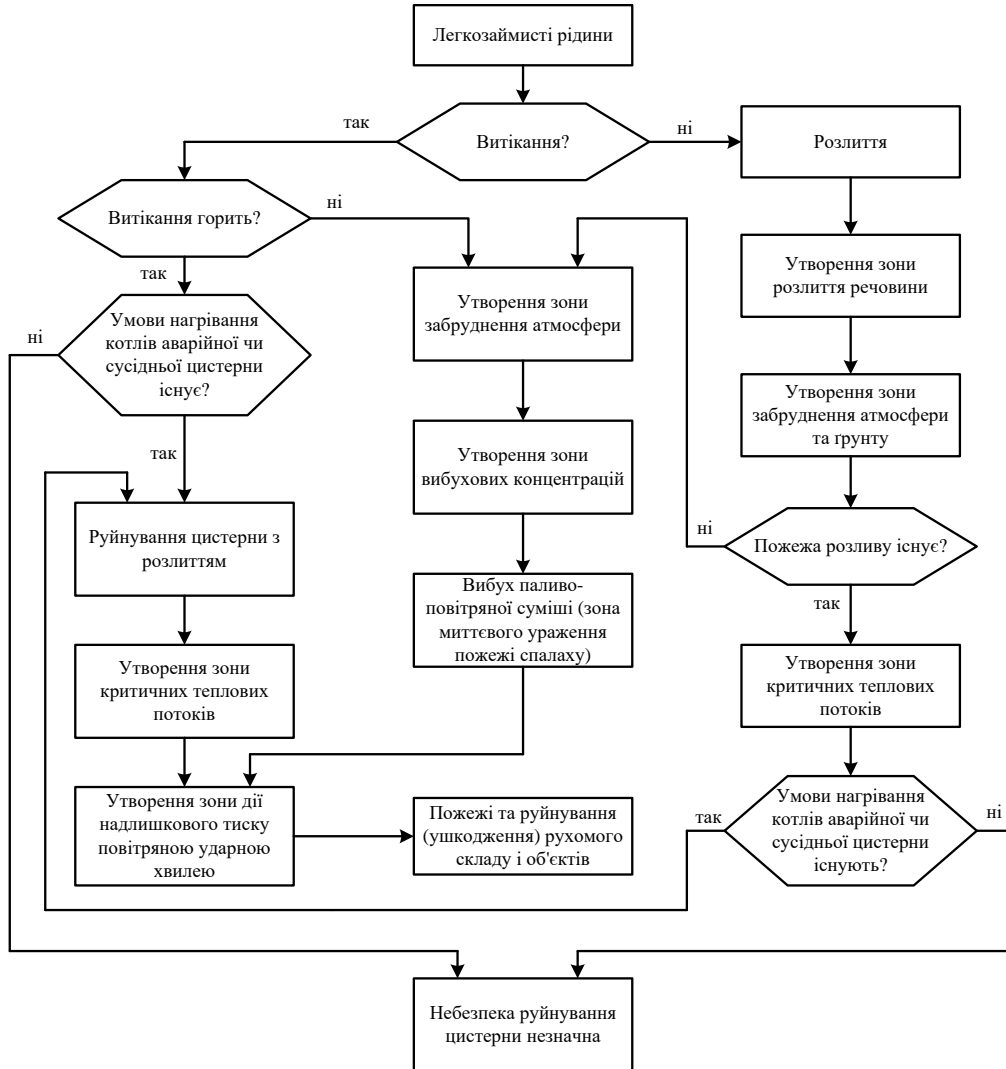


Рис. 2.6. Структурно-логічна схема ймовірних процесів розвитку типових аварійних ситуацій з вантажами третього класу безпеки (легкозаймісті речовини) (ТАС-1л і ТАС – 2л)

При горінні речовини, що витікає, і наявності умов нагрівання котлів аварійної або сусідньої цистерн, можливе руйнування цих цистерн з розлиттям речовини, утворенням зони критичних теплових потоків від горіння речовини, а також зони дії надлишкового тиску повітряною ударною хвилею і екологічно небезпечного впливу.

Коли відбувається розлиття небезпечної речовини і відсутня пожежа розливу (ситуація ТАС – 2л), то можливе утворення зон вибухонебезпечних концентрацій з подальшим вибухом паливо-повітряної суміші та дії надлишкового тиску повітряною ударною хвилею та утворенням небезпечних екологічних наслідків.

Якщо пожежа розливу існує та існують умови нагрівання котлів аварійної чи сусідньої цистерн, то можливе руйнування таких цистерн з виникненням фазисів розвитку аварії, які були розглянуті вище.

За відсутності умов нагрівання котлів аварійної чи сусідньої цистерн, небезпека руйнування таких цистерн є незначною.

Під час розливання небезпечної речовини чималу загрозу об'єктам інфраструктури залізниць і природному середовищу становить потрапляння цієї речовини у злизову або каналізаційну систему, що може викликати, зокрема, пожежі на цих об'єктах.

Розглянемо розвиток аварійної ситуації з легкозаймистими твердими речовинами (ЛЗТ), самореактивними речовинами (СР) та твердими десенсибілізованими вибуховими речовинами (ТДВР).

При ушкодженні вагона з ЛЗТ та наявності джерела запалювання можливе утворення критичних теплових потоків при горінні ЛЗТ на площі одного вагону з утворенням токсичних продуктів згоряння (рис. 2.7).

За наявності горючих матеріалів в зоні пожежі аварійного вагона відбувається розповсюдження пожежі на сусідні вагони з утворенням екологічно небезпечних наслідків.

Якщо джерело запалювання відсутнє, можливе забруднення навколишнього середовища токсичними і корозійними речовинами (виробами) або токсичними продуктами згоряння.

У разі виникнення аварійної ситуації з вагоном під час перевезення самореактивної речовини при ушкодженні пакування і контакті СР з каталізуючими домішками такими як кислоти, з'єднання важких металів, основами тощо,

відбувається розкладання речовини з виділенням займистого отруйного газу (пари), що, в свою чергу, призводить до забруднення навколишнього середовища.

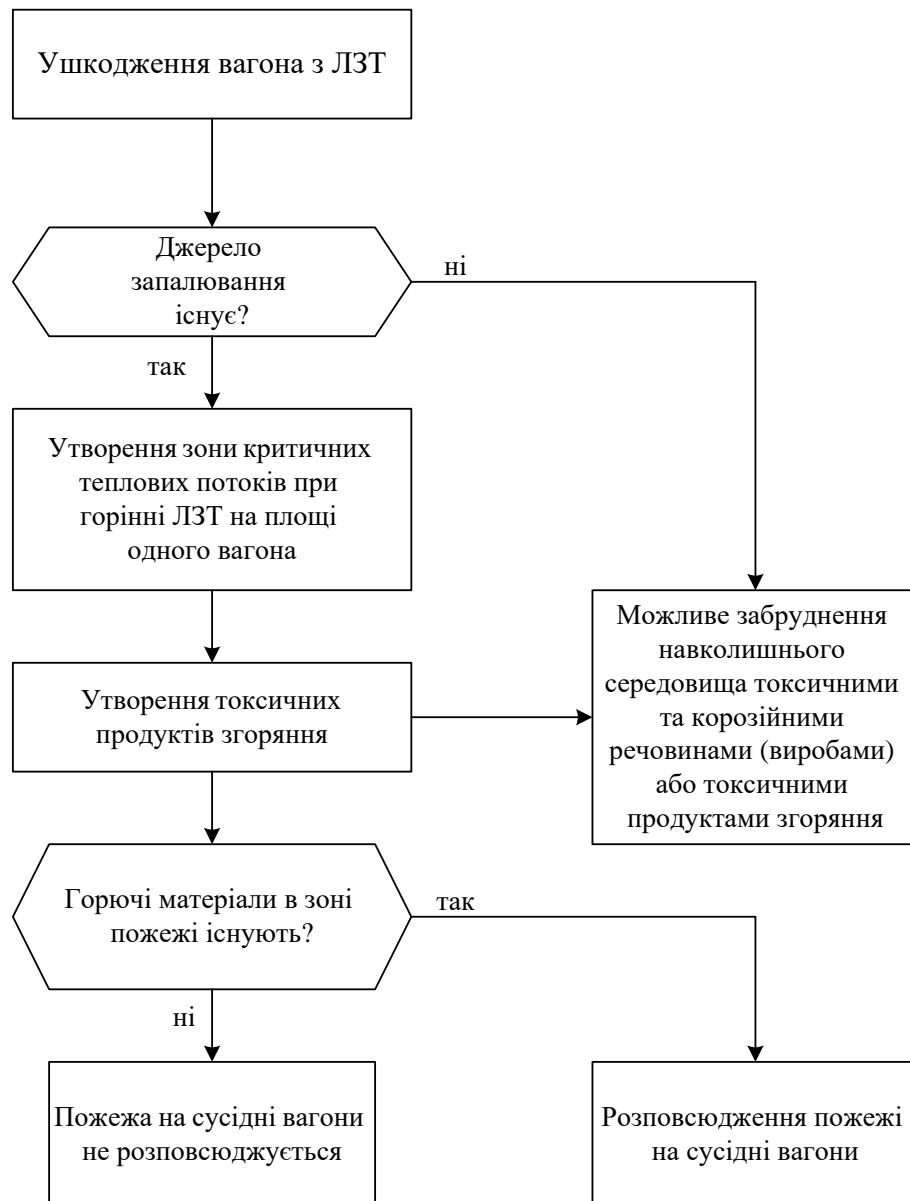


Рис.2.7. Структурно-логічна схема ймовірних процесів розвитку типових аварійних ситуацій з вантажами четвертого класу небезпеки (ТАС- 1т)

Якщо неушкоджене пакування знаходиться в зоні пожежі й загоряння СР не відбувається, то можливе розкладання з виділенням отруйного газу та забруднення навколишнього середовища.

При горінні СР з подальшим вибухом утворюється зона надлишкового тиску повітряною ударною хвилею, що може призвести до руйнування чи пошкоджень



рухомого складу і об'єктів, також розповсюдження екологічно небезпечних інгредієнтів самореактивної речовини. На рис. 2.8 подані можливі варіанти розвитку типової аварійної ситуації ТАС – 2т1.

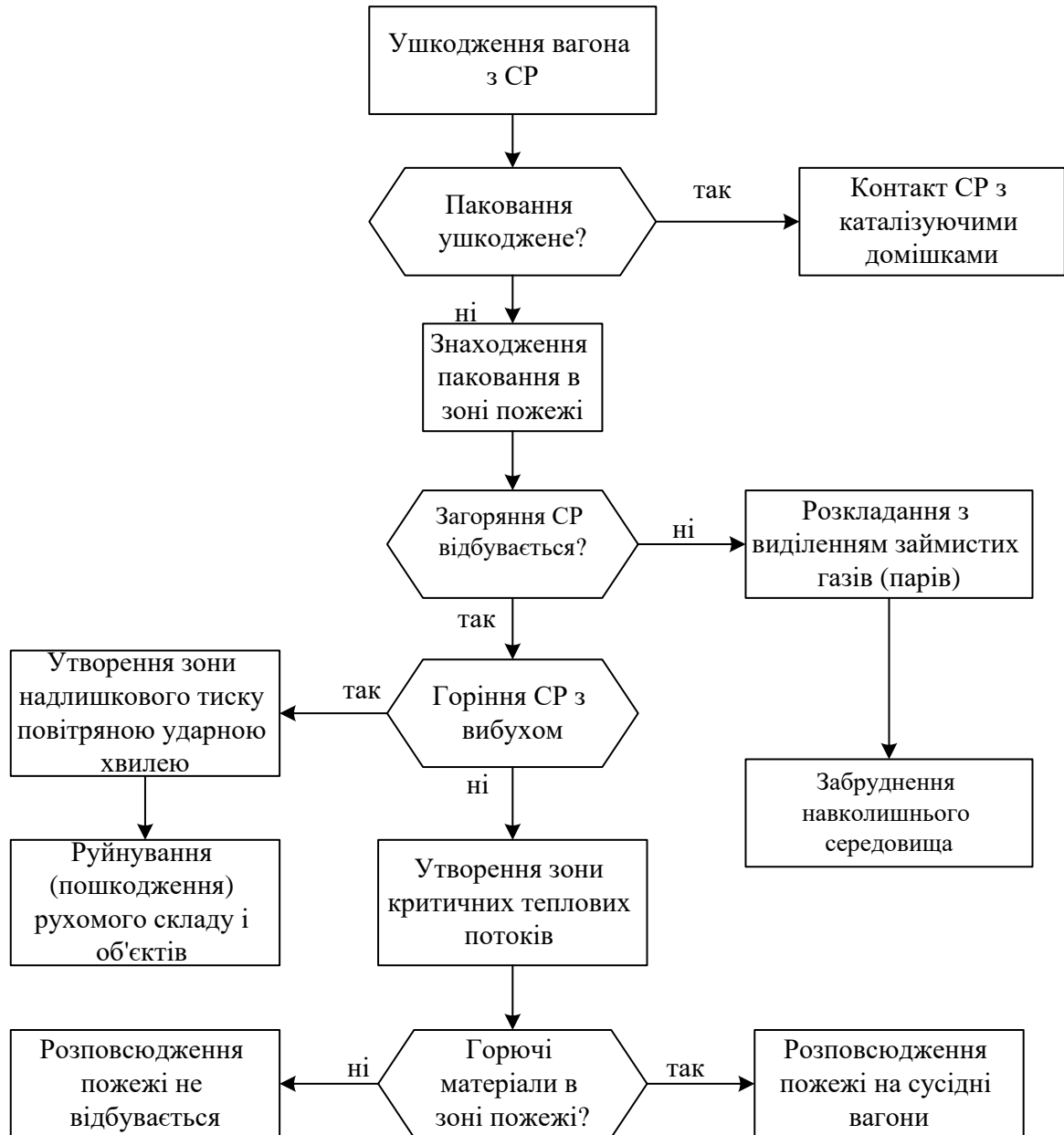


Рис. 2.8. Структурно-логічна схема ймовірних процесів розвитку типових аварійних ситуацій з вантажами четвертого класу небезпеки (ТАС – 2т1)

При ушкодженні пакування з твердою десенсибілізованою вибуховою речовиною і наявності витікання розріджувача можливе утворення небезпечної концентрації самореактивної речовини, що може призвести до утворення зони надлишкового тиску повітряною ударною хвилею з руйнуванням чи пошкодженням

рухомого складу і об'єктів, а також забрудненням навколишнього природного середовища.

Якщо витікання розріджувача з пакування відсутнє, то загрози створення небезпечної концентрації самореактивної речовини немає.

Можливі варіанти розвитку типової ситуації ТАС – 3т1 надані на рис. 2.9.

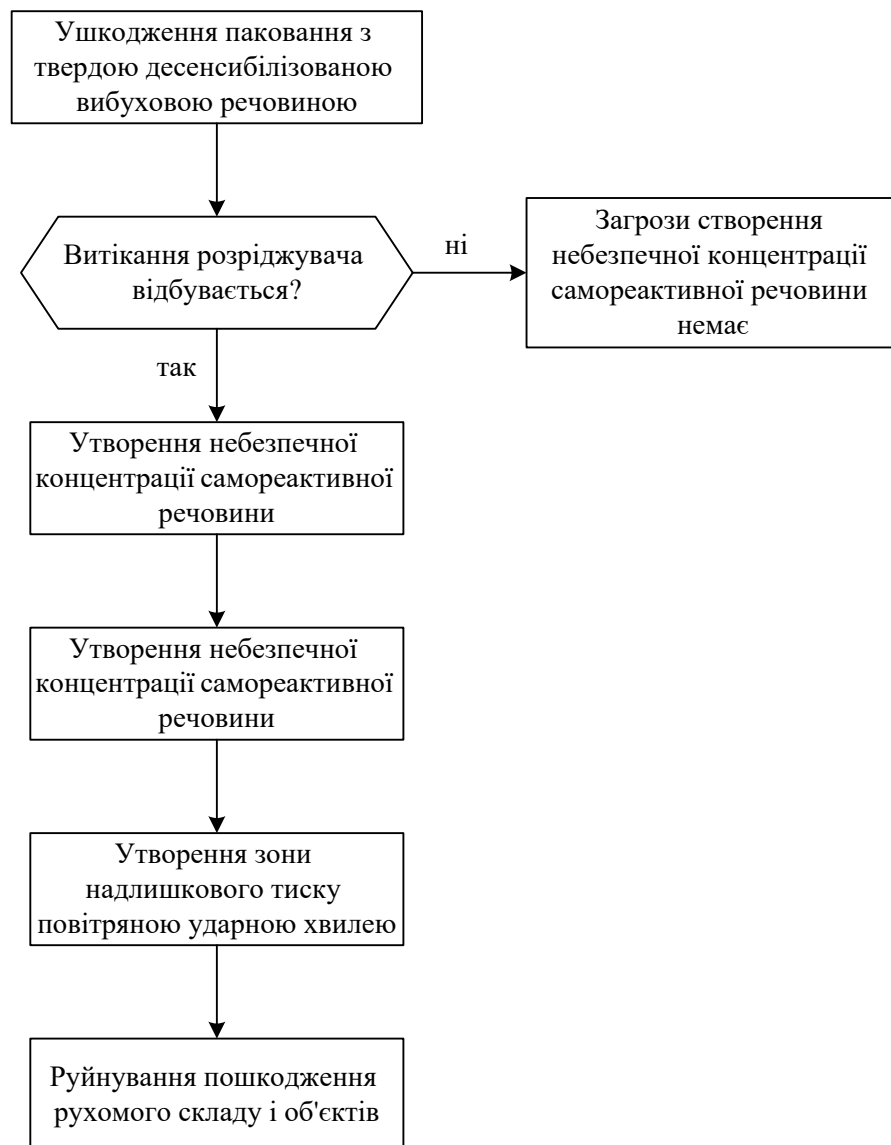


Рис. 2.9. Структурно-логічна схема ймовірних процесів розвитку типових аварійних ситуацій з вантажами четвертого класу небезпеки (ТАС – 3т1)

При ушкодженні вагона з піроформною речовиною, горіння такої речовини, включаючи її суміші та розчини (рідкі або тверді), зчиняється під час контакту з повітрям протягом 5 хвилин, що призводить до утворення зони критичних

теплових потоків, і за наявності горючих речовин в зоні пожежі призведе до розповсюдження пожежі на сусідні вагони та розповсюдження у навколишньому природному середовищі небезпечних інгредієнтів.

Якщо аварійним є вагон з самонагрівною речовиною, займання якої відбувається дуже повільно, то при цьому можливе виділення у навколишнє природне середовище токсичних і корозійних речовин.

При займанні самонагрівних речовин відбуваються фазиси процесу горіння, аналогічні горінню піроформних речовин.

Можливі варіанти розвитку типової аварійної ситуації при ушкодженні вагону з піроформними та самонагрівними речовинами (ТАС – 4т2) подані на рис. 2.10.

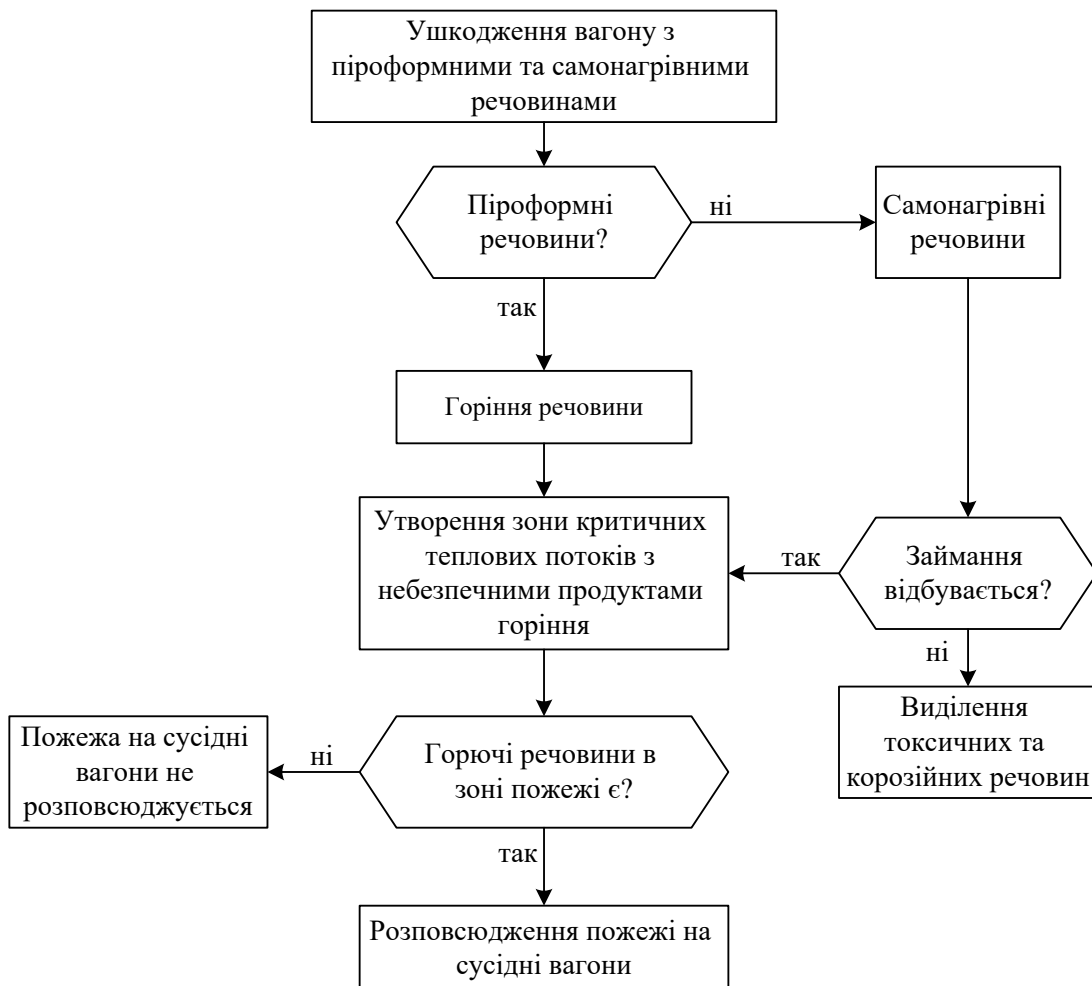


Рис. 2.10. Структурно-логічна схема ймовірних процесів розвитку типової аварійної ситуації при ушкодженні вагона з піроформними та самонагрівними речовинами (ТАС – 4т2)

Ушкодження вагона з речовиною, яка при взаємодії з водою виділяє займисті гази, що, за наявності джерела запалювання, може призвести до вибуху з утворенням зони надлишкового тиску повітряною ударною хвилею та руйнування чи пошкодження рухомого складу і об'єктів.

За відсутності джерела запалювання, відбувається виділення токсичних і корозійних газів, які призводять до забруднення навколишнього середовища.

На рис. 2.11 подані можливі варіанти розвитку такої типової аварійної ситуації (ТАС – 5т3).

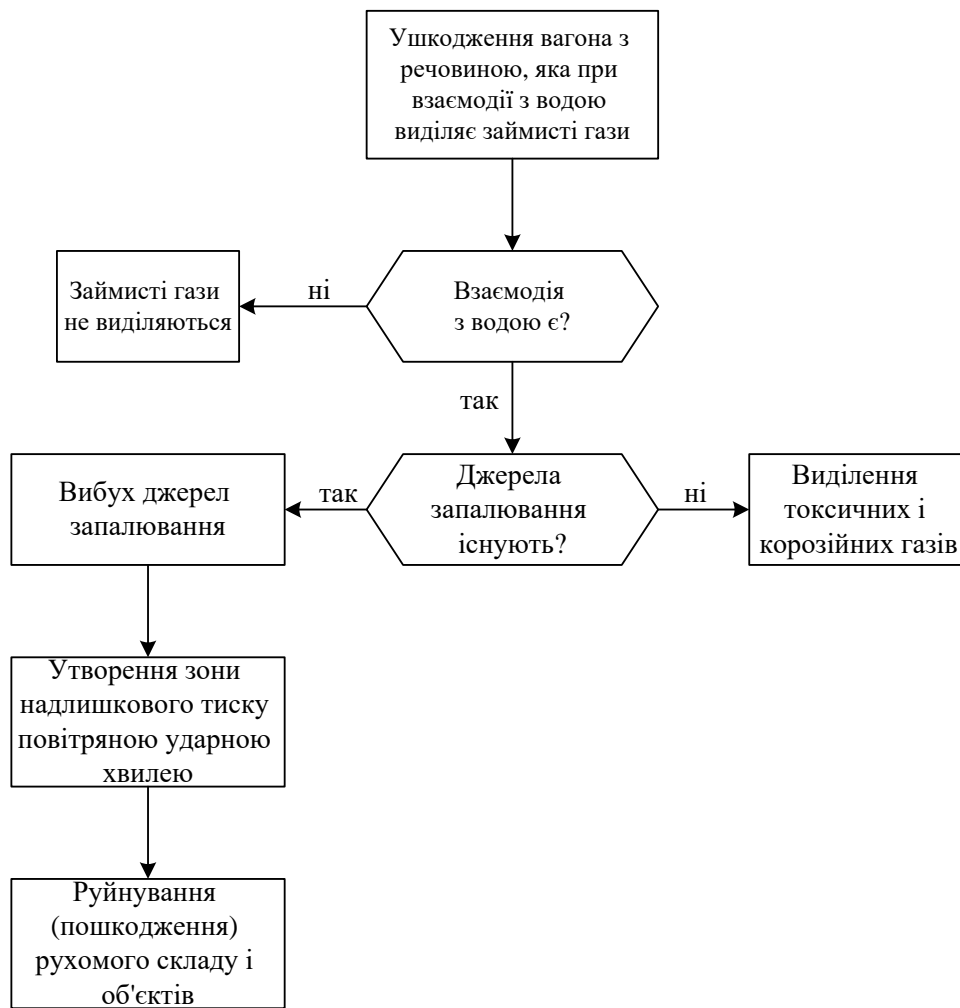


Рис. 2.11. Структурно-логічна схема ймовірних процесів розвитку типової аварійної ситуації (ТАС – 5т3)

Причиною аварій зі СДОР можуть бути: руйнування цистерни від вибуху, переповнення або нагрівання скрапленого СДОР; руйнування оболонки цистерни

з причини її несправності; пробій корпуса цистерни при зіткненні; порушення герметичності з причини конструкційних недоліків й несправностей арматури чи манометрів; схід вагона з рейок з розливом СДОР з цистерни [55, 56, 60, 66 – 68, 103, 112, 185].

При аваріях на залізничному транспорті можливі випадки викиду та проникнення у атмосферу СДОР у газоподібному, пароподібному або аерозольному стані.

Якщо у результаті аварійної ситуації станеться розливання (витікання) СДОР за умови, що його агрегатний стан – зріджений газ, то відбувається миттєве скипання частини продукту з утворенням первинної хмари. У подальшому продукт випаровується з утворенням вторинної хмари. Якщо СДОР – стислий газ, то утворюється лише первинна хмара. Якщо СДОР – рідина, яка кипить при температурі оточуючого середовища, то при цьому утворюється лише вторинна хмара.

При аварії зі СДОР на залізничному транспорті можливі такі типові аварійні ситуації:

–ТАС- 1сд – у результаті руйнування (ушкодження) цистерни (скраплений газ) відбувається його вільне розливання з подальшим випаровуванням, при цьому утворюються первинна та вторинна хмари СДОР;

–ТАС- 2сд – у результаті руйнування (ушкодження) цистерни із стислим газом) відбувається викид речовини з утворенням первинної хмари СДОР;

–ТАС- 3сд – у результаті руйнування (ушкодження) цистерни із рідиною утворюється її вільне розливання з подальшим випаровуванням, при цьому утворюється вторинна хмара СДОР.

Аналіз ймовірних проведених вище процесів розвитку типових ситуацій з газоподібними та рідкими небезпечними вантажами дозволяє визначити види характеру їхніх екологічно небезпечних наслідків.

До першого виду характеру екологічно небезпечних наслідків належать наслідки ситуацій, які виникають при миттєвій розгерметизації, наприклад, внаслідок вибуху цистерн, резервуарів ємностей. При цьому утворюється первинна

газова (парогазова, аерозольна) хмара з високою концентрацією речовини у повітрі. Розливання рідкої фази, як правило, при цьому не відбувається. Розлив горючої рідини швидко випаровується за рахунок тепла природного середовища протягом кількох хвилин. Такий характер екологічної небезпеки є найбільш небезпечним з точки зору уразливих факторів.

Другий вид характеру екологічно небезпечних наслідків становлять наслідки ситуацій, які виникають при аварійних розливах рідких небезпечних вантажів при розгерметизації цистерн, резервуарів тощо. Це призводить до миттєвого випаровування речовини з утворенням первинної хмари пари, а частина рідини виливається на баласт колійної призми та дренаж. При цьому рідина поступово випаровується за рахунок температури природного середовища й утворює вторинну хмару. Залежно від пори року, метеоумов, характеру і геометричного розміру розливу термін часу випаровування може сягати від деяких хвилин до кількох діб. Характер екологічної небезпеки таких наслідків викликає короткочасну інгаляційну уразливу дію первинної хмари пари та суттєво більш тривалу інгаляційну дію вторинної хмари пари.

Аналіз рекомендованих дій, які містяться у аварійних картках, поданих у таблицях В.3 і В.4 Додатка В [24], свідчить, що для ситуацій першого виду екологічно небезпечних наслідків одним з основних способів ліквідації є створення водяної завіси для максимально можливого обмеження розповсюдження хмари у напрямку місць з масовим знаходженням людей, розташування потенційно небезпечних об'єктів, а також для максимально можливого зниження концентрації пари у хмарі.

Для ситуацій другого виду характеру екологічної небезпеки, поруч зі створенням водяної завіси, використовуються й інші способи ліквідації екологічно небезпечних наслідків.

Локалізація розливу методом обвалування застосовується для запобігання розтікання небезпечної речовини для зменшення площі випару та параметрів вторинної хмари.

Технологія обвалування визначається з урахуванням величини розливу, умов забору ґрунту для обвалування у безпосередній близькості від розливу, застосування технічних засобів, пари року, стану погоди.

Локалізація розливу шляхом збирання рідкої фази у ями-пастки здійснюється для припинення розтікання, зменшення площі забруднення та інтенсивності випаровування.

Локалізація розливу методом засипання сипучими сорбентами (піском, пористим ґрунтом, шлаком, керамзитом). Для проведення робіт залучаються інженерно-технічні та дорожні підрозділи, екскаватори, транспортні автомашини.

Локалізація розливу методом покриття шаром піни здійснюється за допомогою пожежних поїздів та пожежних машин. Піноутворювач повинен бути нейтральним щодо рідини.

Особливо небезпечними є аварійні ситуації, які супроводжуються пожежами (вибухами) небезпечних вантажів, бо гасіння пожеж на залізничному транспорті відрізняється складністю в організації дій пожежних підрозділів, що обумовлено великою кількістю вантажів, які мають різноманітні пожежо- вибухонебезпечні властивості, необхідністю знеструмлення контактної мережі, складністю оцінювання обстановки на пожежі, залученням необхідних сил та засобів тощо [55, 60, 65, 68].

Отримані в результаті дослідження алгоритми ймовірних процесів розвитку типових аварійних ситуацій є основою для створення бази знань СППР керівника оперативного штабу ліквідації аварійної ситуації.

#### **2.4. Прогнозування значень параметрів небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами**

Локалізація небезпечних наслідків залізничних аварійних ситуацій відрізняється складністю в організації дій підрозділів постійної готовності оперативного реагування на такі ситуації Укрзалізниці та підрозділів інших міністерств і відомств, які залучаються для проведення локалізаційних робіт, що

обумовлено, як це було зазначено вище, великою кількістю різноманітних за своїми пожежо- та вибухонебезпечними властивостями вантажів, необхідністю знеструмлення контактної мережі, складністю оцінювання обстановки, зосередження необхідних сил і засобів тощо.

Велике значення для оцінювання обстановки, яка склалася при виникненні залізничної транспортної події, відіграє прогнозування розвитку небезпечних чинників залізничної аварійної ситуації на підставі відповідних математичних моделей.

Моделювання процесів формування небезпечних чинників таких ситуацій щодо впливу на людину та природне середовище будується на основі проведеного у попередніх розділах даної роботи дослідження можливих варіантів розвитку типових аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, динаміки та уразливих дій виникаючих при цих ситуаціях, фізичних полів, шляхів розповсюдження небезпечних речовин, формування дозових навантажень на людину, інші популяції та природне середовище.

Зараз існує певна кількість різноманітних моделей і методів, які застосовуються у системах прогнозування впливів чинників техногенних аварій і катастроф на довкілля [194 – 197].

З метою розроблення дієвих планів вжиття заходів з ліквідування наслідків залізничних аварійних ситуацій, що супроводжуються пожежами небезпечних вантажів, необхідно встановити об'єкти і рухомий склад, які знаходяться у зонах: миттєвого ураження від пожежі-спалаху; різних ступенів руйнування й які горять; різних ступенів руйнування; розлиття газів і легкозаймистих рідин.

Крім цього потрібно встановити:

– місцезнаходження рухомого складу з небезпечними речовинами, з якого витікає (розсипається) небезпечна речовина, що не горить, й спрогнозувати подальший розвиток такої ситуації;

– рухомого складу з небезпечними речовинами, що витікають й горять для визначення розмірів небезпечних зон.

Для здійснення необхідних розрахунків впливів небезпечних чинників вибуху, пожежі, розливів газів і горючих рідин, сильнодіючих отруйних речовин



при виникненні залізничних транспортних подій з небезпечними вантажами нині існує певна кількість методів, найбільш поширені з яких розглядаються нижче.

#### **2.4.1. Визначення значень параметрів небезпечних чинників аварійних ситуацій зі стисненими, зрідженими, скрапленими, розчиненими під тиском газами**

Визначення значень параметрів небезпечних чинників залізничних транспортних подій з небезпечними вантажами докладно викладено у роботах [55, 60, 195 – 197, 210 – 213].

Величина вибухонебезпечної зони, яка утворюється при викиді горючих газів – це територія з радіусом  $R_{\text{нкмр}}$ , який обмежує область концентрацій, що перебільшують нижчу концентраційну межу розповсюдження полум'я [53].

Порядок визначення величин вибухонебезпечних зон аварійної ситуації за участю газів подана на рис. 2.12.

Вихідною інформацією для проведення розрахунків є дані про наявну масу речовини у аварійній ємкості та умови її витікання. При миттєвому розливанні речовини враховуються дані про температуру кипіння пару, а при повільному витіканні – інтенсивність витікання пару і розташування пробоїни котла цистерни відносно розливу. На підставі цих даних визначається маса газу у хмарі пароповітряна суміш (ППС) і розміри вибухонебезпечної зони. За відсутності таких даних здійснюється спрощений розрахунок маси речовини у хмарі ППС і розміри вибухонебезпечної зони (ВНЗ). Межі ВНЗ наносяться на мапу і визначаються об'єкти і рухомий склад у зоні миттєвого ураження пожежі-спалаху.

Визначення надлишкового тиску на фронті ударної хвилі при згорянні паливоповітряної суміші у відкритому незахаращеному просторі здійснюється за різними методиками [60, 119, 123, 193 – 195, 211].

Залежність надлишкового тиску  $\Delta P$  (кПа) від відносної величини відстані  $X_p$  можна визначити за допомогою графічного методу [60], при якому величина  $X_p$  визначається з формули:

$$X_p = R_{\text{мс}} / (0,42M_p)^{1/3} \quad (2.1)$$

де  $R_{\text{мс}}$  – відстань від місця вибуху, м;

$M_p$  – маса газу у хмарі ППС, т.

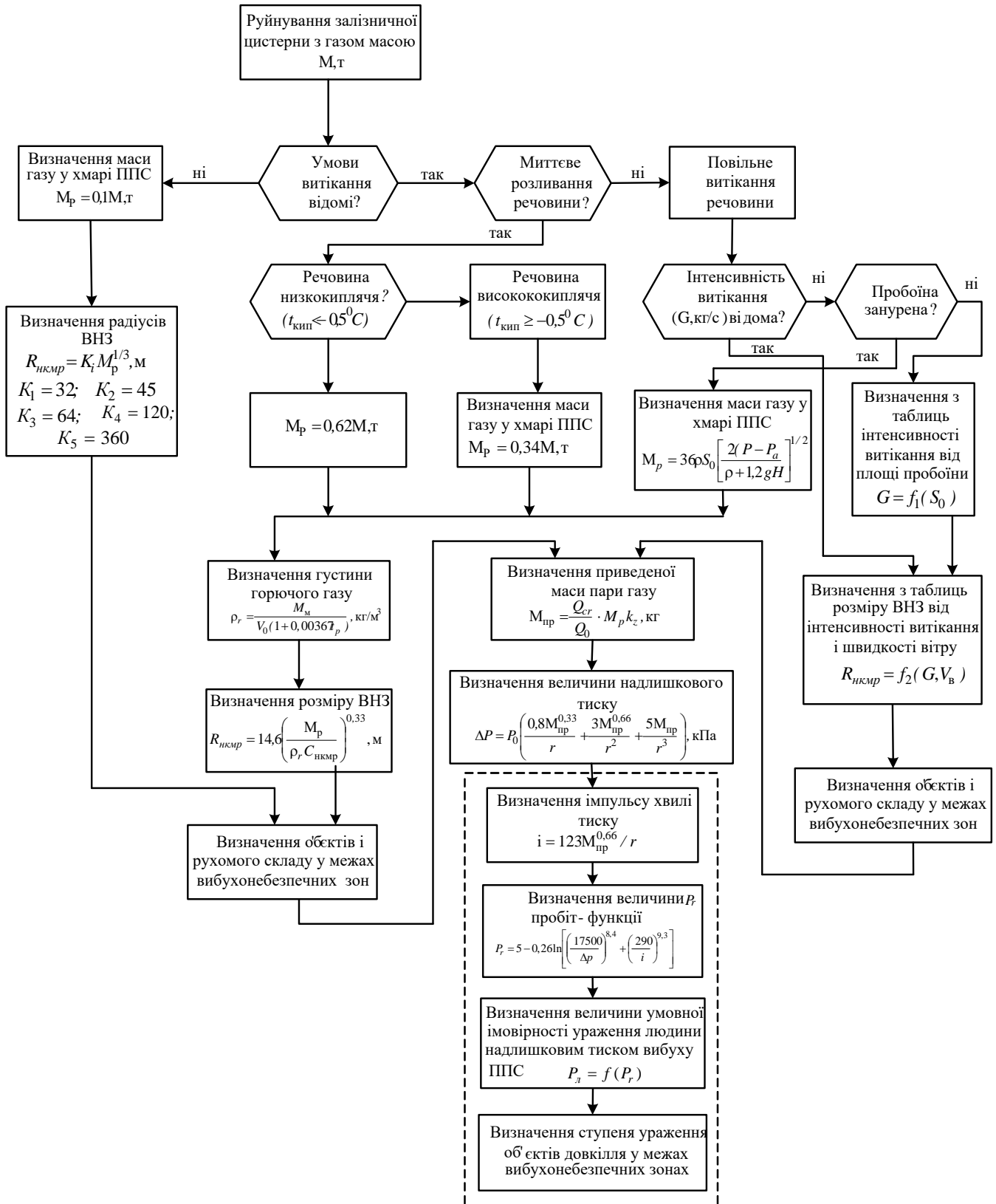


Рис. 2.12. Структурно-аналітична модель визначення величин небезпечних для довкілля чинників залізничних аварійних ситуацій при транспортуванні газів

Більш точний результат для величини надлишкового тиску можна отримати за допомогою методик [197, 210]. Для практичних розрахунків часто використовується формула [60,197,210]:

$$\Delta P = P_0 \left( \frac{0,8M_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + \frac{3M_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + \frac{5M_{\text{пр}}}{r^3} \right) \quad (2.2)$$

де  $P_0$  – атмосферний тиск (допускається приймати таким, що дорівнює 101 кПа);

$r$  – відстань від геометричного центру паливоповітряної суміші, м;

$M_{\text{пр}}$  – приведена маса газу, кг, яка розраховується за формулою:

$$M_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{сг}}}{Q_0} \cdot M_p Z \quad (2.3)$$

де  $Q_{\text{сг}}$  – питома теплота згоряння газу, Дж·кг<sup>-1</sup>;

$K_z$  – коефіцієнт участі горючих газів, який допускається приймати рівним 0,1;

$Q_0$  – константа, яка дорівнює  $4,52 \cdot 10^6$  Дж·кг<sup>-1</sup>;

$M_p$  – маса газу у хмарі ППС, кг.

Імпульс хвилі тиску ( $i$ , Па·с), розраховується за формулою  $i = 123m_{\text{пр}}^{0,66} / r$ .

Для розрахунку меж зон ураження людей під час вибуху ППС використовуються такі формули [53]:

– межа зони тяжких уражень

$$R_1 = 32M_p^{1/3}, \text{ м};$$

– межа зони порогу ураження

$$R_2 = 360M_p^{1/3}, \text{ м}.$$

Розрахунок меж зон ушкодження будівель і споруд при вибуху хмари ППС здійснюється за формулами тієї ж методики:

– межа зони повних руйнувань

$$R_1 = 32M_p^{1/3}, \text{ м};$$

– межа зони сильних руйнувань

$$R_2 = 45M_p^{1/3}, \text{ м};$$

– межа зони середніх руйнувань

$$R_3 = 64M_p^{1/3}, \text{ м};$$

– межа зони помірних руйнувань

$$R_4 = 120M_p^{1/3}, \text{ м};$$

– межа зони малих ушкоджень

$$R_5 = 360M_p^{1/3}, \text{ м}.$$

У деяких джерелах [194, 196] пропонується більш проста формула для визначення радіусів зон ураження, яка використовується, як правило, для оцінювання наслідків вибухів концентрованих вибухових речовин, але з відповідними припущеннями, що дає можливість використовувати її для приблизного оцінювання наслідків вибухів ППС:

$$R = kW^{1/3} (1 + (3180/W)^2)^{1/6} \quad (2.4)$$

де  $k$  – коефіцієнт, який встановлює взаємозв'язок між характером ушкодження будівлі і надлишковим тиском, що задається таблицею;

$w$  – тротилевий еквівалент вибуху, який визначається співвідношенням [134, 195]:

$$W = \frac{0,4}{0,9} \cdot \frac{M_p \cdot q_r}{4,5 \cdot 10^6} \quad (2.5)$$

де  $q_r$  – теплота згоряння газу.

Класифікація небезпечних зон руйнування будівель і споруд подана у табл. В.5, а величина надлишкового тиску ураження людей надана у табл. В.6. Додатка В.

Умовну ймовірність ураження людини надлишковим тиском при згорянні газо- пароповітряних сумішей на відстані  $r$  від епіцентру визначають у такій послідовності [194, 196]:

- визначають значення  $\Delta P$  та  $i$  з формул, які наведені вище;
- визначають значення величини пробіт-функцій  $Pr$  з формули:

$$Pr = 5 - 0,26 \ln(V),$$

$$V = \left( \frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left( \frac{290}{i} \right)^{9,3} \quad (2.6)$$

де  $\Delta P$  – надлишковий тиск, Па;

$i$  – імпульс хвилі тиску Па·с.

За допомогою табл. В.7 Додатка В визначають умовну ймовірність ураження людини  $Q_{aj}(a)$ .

#### 2.4.2. Визначення небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій, пов'язаних з розлиттям небезпечних рідин

При руйнуванні залізничних цистерн з небезпечними вантажами (легкозаймистими рідинами, зрідженими (скрапленими) вуглеводневими газами) проводять аналіз умов витікання аварійної рідини з цистерн. Структурно-аналітична модель метода визначення величин небезпечних для довкілля чинників залізничних аварійних ситуацій при транспортуванні ЛЗР подана на рис. 2.13, порядок визначення концентрації небезпечної речовини в атмосфері показано пунктиром.

За наявності інформації про умови витікання, проводиться аналіз рельєфу місцевості і визначається площа розливу рідини. Якщо така інформація відсутня, то площа розливу визначається за спрощеною формулою. Для визначення величини вибухонебезпечної зони, визначаються необхідні параметри: тиск насиченої пари, інтенсивність випаровування і маса речовини, що випаровується. Залежно від величини маси речовини, що випаровується, за відповідними формулами визначаються радіуси зон надлишкового тиску та імпульсу хвилі тиску, а також умовну ймовірність ураження людини.

Масу розлитої речовини ( $M(\tau)$ ), площу розливу ( $S_p(\tau)$ ), масу випару ( $M_p(\tau)$ ) у будь-який момент часу від початку аварії доцільно визначити з формул, наведених вище, а саме [60]:

$$M(\tau) = 79,4 \cdot \rho_{\text{рід}} \cdot S_0 \cdot \sqrt{H} \cdot \tau \quad (2.7)$$

де  $\rho_{\text{рід}}$  – густина нафтопродукту,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;

$S_0$  – площа перерізу пробоїни,  $\text{м}^2$ ;

$H$  – висота стовпа рідини у цистерні, м.

$$S_p(\tau) = \left( \frac{f \cdot G}{\rho_{\text{рід}}} \right) \cdot \tau \quad (2.8)$$

де  $f$  – коефіцієнт розливу,  $m^{-1}$ ;  $f = 5$  при розташуванні аварійної цистерни у низині або на рівній поверхні з ухилом до 1%,  $f = 12$  при розташуванні аварійної цистерни на височині;

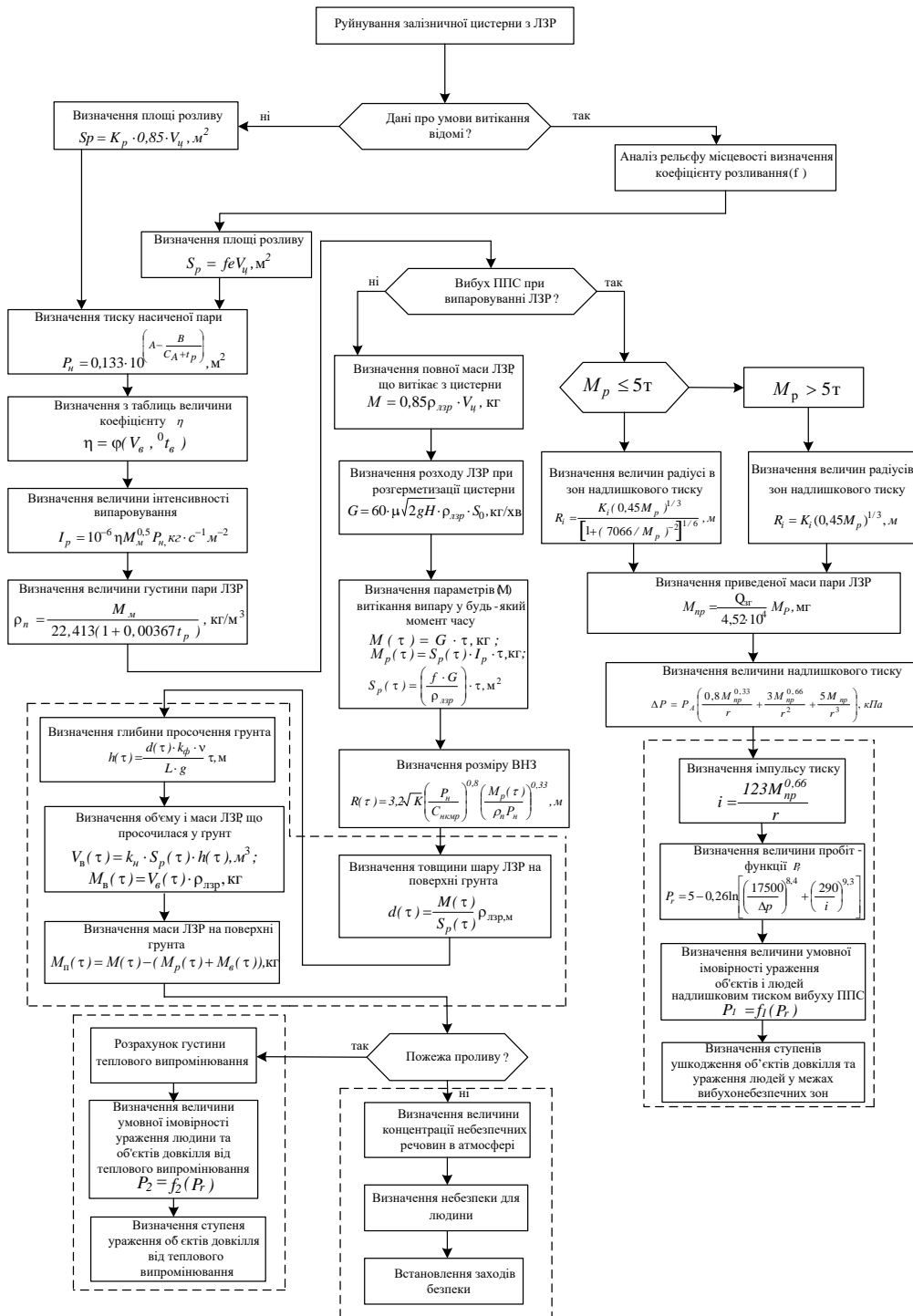


Рис. 2.13. Структурно-аналітична модель метода визначення величин небезпечних для довкілля та життєдіяльності людини чинників залізничних аварійних ситуацій при транспортуванні легкозаймистих рідин

$$G = 79,4 \cdot \rho_{\text{рід}} \cdot S_0 \cdot \sqrt{H},$$

$$M_p(\tau) = \left( \frac{I_p \cdot T \cdot f \cdot G}{\rho_{\text{рід}}} \right) \cdot \tau \quad (2.9)$$

$I_p$  – інтенсивність випаровування, кг/(см·м<sup>2</sup>), яка визначається з формули:

$$I_p = 10^{-6} \eta M_M^{0,5} P_{\text{нкг}} \cdot c^{-1} \cdot \text{м}^{-2} \quad (2.10)$$

де  $\eta = \varphi(V_{\text{в}}, t_{\text{в}}^0)$  – коефіцієнт, який залежить від швидкості повітряного потоку та температури повітря, визначається з табл. В. 8 Додатка В;

$M_M$  – молекулярна маса речовини, кг/моль визначається з таблиць;

$T$  – розрахункова тривалість надходження пари речовини у природне середовище, приймається  $T \leq 14400$  с.

$P_{\text{н}}$  – тиск насиченої пари, кПа.

До небезпечних параметрів «вогняної кулі», яка утворюється у результаті вибуху газоповітряної суміші, відносяться: її радіус ( $R_{\text{в.к.}}, \text{м}$ ), термін часу існування ( $t_{\text{в.к.}}, \text{с}$ ), величина густини теплового випромінювання ( $q, \text{кВт/м}^2$ ) та індекс дози теплового випромінювання  $I$  [60, 123, 195, 196].

Усі ці параметри залежать від маси газу у вогняній кулі ( $M_{\text{в.к.}}, \text{т}$ ), яка визначається співвідношенням [60]:

$$M_{\text{в.к.}} = 0,6 M_{\text{т}} \quad (2.11)$$

де  $M$  – маса газу у цистерні, т.

При  $M_{\text{в.к.}} < 1$  вогняна куля не утворюється. При  $M_{\text{в.к.}} > 1$  радіус  $R_{\text{в.к.}}$  і термін існування  $t_{\text{в.к.}}$  вогняної кулі визначаються з формул [56]:

$$R_{\text{в.к.}} = 29 M_{\text{в.к.}}^{1/3}, \text{с}$$

$$t_{\text{в.к.}} = 4,5 M_{\text{в.к.}}^{1/3}, \text{с} \quad (2.12)$$

Величина густини теплового випромінювання ( $q$ ) на визначеній відстані ( $r$ ) від вогняної кулі визначається як :

$$q(r) = 200 \varphi(r) \quad (2.13)$$

де 200 – середньповерхова густина теплового випромінювання газів, кВт/м<sup>2</sup>;

$\varphi(r)$  – коефіцієнт опромінення між факелом полум'я та елементарною площадкою на поверхні об'єкта, що опромінюється на визначеній відстані ( $r$ ) від вогняної кулі, який визначається з формули:

$$\varphi(r) = \frac{R_{\text{в.к.}}^2}{\left(R_{\text{в.к.}}^2 + r^2\right)^{\frac{1}{2}}} (1 - 0,058 \ln r) \quad (2.14)$$

Імовірність ураження людей тепловим потоком визначається відповідно до індексу дози теплового випромінювання  $I$ , який визначається:

$$I = t_{\text{в.к.}} (1000q)^{4/3} \quad (2.15)$$

Рівень ураження людей за визначеним індексом  $I$  визначається з табл. В. 9 Додатка В.

Дещо інший підхід до визначення небезпечних параметрів вогняної кулі пропонують методи [186, 187].

Величина густини теплового випромінювання «вогняної кулі» визначається з формули:

$$q = E_f F_q \tau \quad (2.16)$$

де  $E_f$  – середньоповерхова густина теплового випромінювання полум'я, кВт·м<sup>-2</sup>, яка визначається з табл. В.10 Додатка В;

$F_q$  – кутовий коефіцієнт опромінення;

$\tau$  – коефіцієнт пропускання атмосфери.

Значення кутового коефіцієнта визначається з виразу:

$$F_q = \frac{\frac{H}{D_s} + 0,5}{4 \left[ \left( \frac{H}{D_s} + 0,5 \right)^2 + \left( \frac{r}{D_s} \right)^2 \right]^{1,5}} \quad (2.17)$$

де  $H$  – висота центру «вогняної кулі», м;

$D_s$  – ефективний діаметр «вогняної кулі», м;

$r$  – відстань від об'єкта, що опромінюється, до точки на поверхні землі безпосередньо під центром «вогняної кулі», м.

Ефективний діаметр «вогняної кулі» розраховується з формули:

$$D_s = 5,33 M p^{0,327} \quad (2.18)$$



Висота центру «вогняної кулі»  $H$  визначається в ході спеціальних випробувань, допускається приймати  $H = D_s/2$ .

З урахування цього

$$F_q = \frac{0,25}{\left[1 + (r/5,33M_p^{0,327})^2\right]^{1,5}} \quad (2.19)$$

Термін часу існування «вогняної кулі» визначається:

$$t_s = 0,92M_p^{0,303}.$$

Коефіцієнт пропускання атмосфери  $\tau$  розраховується з виразу:

$$\tau = \exp\left[-7,0 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_s}{2}\right)\right] \quad (2.20)$$

або з урахуванням вищенаведеного:

$$\tau = \exp\left[-3,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\sqrt{4r^2 + D_s^2} - D_s\right)\right] \quad (2.21)$$

Радіус впливу високотемпературних продуктів згорання «вогняної кулі»  $R_{в.к.}, \text{м}$  визначається з формули:

$$R_{в.к.} = 1,2 R_{нкмп}, \text{м} \quad (2.22)$$

З огляду на це, величину густини теплового випромінювання «вогняної кулі» можна визначити з виразу:

$$q = \frac{112,5}{\left(1 + (r/5,33M_p^{0,327})^2\right)^2} \exp[-7,0 \cdot 10^{-4} r]. \quad (2.23)$$

Умовну ймовірність ураження людини тепловим випромінюванням при пожежі розливу горючої рідини, «вогняну кулю» визначають у такій послідовності [186]:

розраховують величину  $Pr$  з формули:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \ln(tq^{1,33}) \quad (2.24)$$

де  $q$  – інтенсивність теплового випромінювання  $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2}$ ;

$t_{вк}$  – ефективний час експозиції, с.

$$t_{вк} = t_0 + \frac{x}{u}. \quad (2.25)$$

де  $t_0$  – характерний час виявлення пожежі (допускається приймати  $t = 5$  с;

$x$  – відстань від місця розташування людини до зони, де інтенсивність теплового випромінювання не перевищує  $4\text{кВт}\cdot\text{м}^{-2}$ , м;

$u$  – швидкість руху людини,  $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$  (допускається приймати  $u = 5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ ).

Оцінка наслідків у потерпілих при термічному ураженні подано у табл. В.11 Додатка В, допустима тривалість перебування людей у зонах теплової дії пожежі подана у табл. В.12 Додатка В.

### **2.4.3. Визначення параметрів зони забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливі нафтопродуктів**

За своєю суттю усі технології локалізації та збору розливів легкозаймистих речовин підрозділяються на три основні етапи: локалізація розливу, його ліквідація та різноманітні заходи щодо ліквідації наслідків впливу розливу на навколишнє природне середовище [58, 59, 192 – 195, 197].

На етапі локалізації залізничної аварійної ситуації з розливом небезпечної речовини часто застосовують обвалування і герметизацію котла аварійної цистерни. Основним завданням етапу ліквідації розливу є запобігання подальшого проникнення небезпечної речовини у об'єкти природного середовища, для чого застосовуються різні технології, які обумовлені фізико-хімічними властивостями небезпечного вантажу та факторами оточуючого природного середовища, серед яких найбільше розповсюдження отримали технології фізичного збору, хімічної нейтралізації та іммобілізації (сорбції) [194].

Аналіз залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами третього класу безпеки свідчить про сильну диференціацію у часі та просторі обсягів можливого забруднення навколишнього природного середовища – від крапельного витоку до масштабних аварійних розливів.

Встановлено, що втрати від дії розливу небезпечної речовини на навколишнє природне середовище залежать від часу локалізації та ліквідації аварійного розливу.

Для прийняття обґрунтованого рішення на локалізацію залізничної аварійної ситуації та ліквідацію її наслідків важливою проблемою є проблема моделювання зони забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливанні

нафтопродуктів із залізничних цистерн залежно від терміну проведення локалізаційних та ліквідаційних заходів.

Частина розлитого нафтопродукту потрапляє ще й у баласт призми верхньої будови залізничної колії.

Обсяг нафтопродукту, який потрапив у ґрунт, визначається властивостями баластної призми, величиною розливу, терміном фільтрації та визначається з формули [192 – 194]:

$$V_{\Gamma} = K_{\text{Н}} \cdot S_{\text{Р}}(\tau) \cdot h_{\Gamma} \quad (2.26)$$

де  $K_{\text{Н}}$  – нафтоємність ґрунту, %, визначається з таблиць;

$h_{\Gamma}$  – середня глибина просочення ґрунту нафтопродуктом, м;

$S_{\text{Р}}(\tau)$  – площа аварійного розливу, м<sup>2</sup>.

Глибина просочення знаходиться з формули

$$h_{\Gamma} = W_{\Phi} \cdot T_{\text{Л}}, \quad (2.27)$$

де  $W_{\Phi}$  – швидкість фільтрації, м/с,

$T_{\text{Л}}$  – час проведення локалізаційних та ліквідаційних заходів, с.

Для оцінювання величини швидкості фільтрації скористаємося лінійною залежністю закону Дарсі [65, 191 – 193]:

$$W_{\Phi} = K_{\text{П}} \frac{h}{L}, \quad (2.28)$$

де  $h$  – висота шару нафтопродукту на поверхні ґрунту, м;

$L$  – товща ґрунту у напрямку фільтрації;

$K_{\text{П}}$  – коефіцієнт проникності, який характеризує фільтраційні властивості ґрунту.

Висота шару нафтопродукту, під час знаходження аварійної цистерни на рейках, обмежується висотою головки рейки  $h = 0,18$  м, товщина баластної призми має розміри від 0,25 м до 0,35 м залежно від виду колії.

Коефіцієнт проникності може бути визначений через коефіцієнт фільтрації  $K_{\Phi}$ .

$$K_{\text{П}} = \frac{K_{\Phi} \mu}{\rho_{\text{рід}} g} = \frac{K_{\Phi} \nu}{g}, \quad (2.29)$$

де  $K_{\Phi}$  – коефіцієнт фільтрації, м, може бути знайдений з таблиці [59];

$g = 9,82 \text{ м/с}^2$ ;  $\mu$  – абсолютна в'язкість рідини,  $\text{г/м}\cdot\text{с}$ ;  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

З урахуванням цього, вираз для  $W_\phi$  буде:

$$W_\phi = \frac{K_\phi \nu h}{gL}, \quad (2.30)$$

а об'єм нафтопродукту, що потрапив у ґрунт, оцінюється як:

$$V_r = \frac{K_H K_\phi \nu h}{gL} \cdot S_p(\tau) \cdot T_L. \quad (2.31)$$

Для баластної призми  $K_H = 0,24\%$ ; при  $L = 0,25 \frac{h}{L} = 0,72$ ;

$K_\phi = 100 \dots 200 \text{ м/доба}$ . Об'єм випару можна знайти із співвідношення:

$$V_B = I_p \cdot S_p(\tau) \cdot T_L \cdot \rho^{-1} \quad (2.32)$$

## **2.5. Математичні моделі для прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері**

У першому розділі цієї роботи були розглянуті найбільш поширені програмні комплекси для моделювання процесів розповсюдження аварійних викидів пожежо-вибухонебезпечних і токсичних речовин, вантажів 2 і 3 класів небезпеки при їхньому перевезенні залізничним транспортом. Відмічалось, що в основі таких програмних комплексів лежать відповідні математичні моделі, які визначаються, зокрема, колом завдань, що необхідно вирішувати. Ці моделі розподіляються на 2 класи: моделі розповсюдження небезпечних речовин в атмосфері та моделі забруднення атмосферного повітря.

Для застосування таких моделей необхідно мати відповідну метеорологічну і географічну інформацію, а також дані про джерела забруднення і викидах.

Моделі розсіювання описують процеси турбулентної дифузії в атмосфері. Такі моделі містять [198, 199]:

– Ейлерові моделі, які дозволяють чисельно розв'язувати рівняння атмосферної дифузії;

– Гауссові моделі, у відповідності з якими розподіл концентрацій характеризується як гауссове у горизонтальному і вертикальному напрямках;

– Лагранжові моделі, у яких або відслідковуються процеси у масах повітря, що рухаються, або використовуються умовні частки для імітування процесів розсіювання.

До моделей забруднення атмосферного повітря також можна віднести:

– напівемпіричні моделі, які головним чином базуються на емпіричній параметризації;

– стохастичні моделі, що базуються на напівемпіричних чи статистичних методах, та орієнтовані на проведення аналізу співвідношення між якістю атмосферного повітря та вимірюваннями атмосферних параметрів або на прогнозуванні випадків підвищеного забруднення повітря;

– рецептурні моделі, що розглядають концентрації забруднювачів, які виміряні у рецепторні точці, й оцінюють відсотковий внесок різних джерел у цій концентрації.

Напівемпіричні моделі також можуть застосовуватися для опису процесів турбулентної дифузії в атмосфері у моделях розсіювання.

Моделі розсіювання можуть бути класифіковані за масштабами атмосферних процесів [75]:

– макромасштаб (протяжністю більше за 1000 км), при якому атмосферний потік асоціюється з синоптичними явищами;

– мезомасштаб (протяжністю більше за 1 км й менше 1000 км при якому повітряний потік почасти знаходиться у залежності від синоптичних явищ й почасти від гідродинамічних ефектів (наприклад, від шорсткості підстилаючої поверхні й перешкод) й від неоднорідностей енергетичного балансу;

– мікромасштаб (протяжність менше 1 км), при якому повітряний потік в основному залежить від характеристик поверхні.

З іншого боку, за даними з [77] класифікацію моделей розсіювання можна представити й іншим чином розподілив їх на локальні (при тривалості менше декількох хвилин), від локальних до регіональних (декілька годин), від

регіональних до континентальних (декілька днів) й від континентальних до глобальних (тиждень й більше).

Досвід побудови моделей розповсюдження різноманітних забруднювачів атмосфери свідчить про те, що розглянуті вище моделі є їх базисним математичним апаратом які з різними доповненнями у вигляді математичних рівнянь, що описують турбулентність, осадження тощо

Для фізичного моделювання атмосферних процесів використовуються рівняння неперервності та рівняння Навьє – Стокса.

Рівняння неперервності є висновком закону збереження маси стосовно рідини, що протікає скрізь фіксований безмежно малий об'єм, й має вигляд [198, 201:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho(\nabla \cdot v) = 0 \quad (2.33)$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $v$  – вектор швидкості.

Рівняння Навьє – Стокса має описуватися рівнянням [71,72,198]:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho g - \nabla \rho + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \quad (2.34)$$

де  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $x_i$  – координати;  $u_i$  – компоненти вектора швидкості;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;  $\rho$  – щільність середовища;  $g$  – прискорення сили тяжіння.

За допомогою рівняння (2.34) можна описати увесь спектр атмосферних процесів, але для розв'язання конкретних завдань необхідні спеціальні перетворення [72].

Зараз основний напрям застосування чисельних методів полягає у розв'язуванні усереднених рівнянь Навьє – Стокса, що також мають назву рівнянь Рейнольдса.

Для переходу до рівнянь Рейнольдса поля метеоелементів подають у вигляді суми середніх значень, які описують великомасштабну течію, та флуктуацій, які є течією більш дрібного масштабу. При цьому враховують й сили Кориоліса, тобто обертання Землі.

Моделі обов'язково доповнюють диференціальними рівняннями припливу тепла виду [199,201]:

$$c_p \frac{dT}{dt} \cdot \frac{ART}{p} \cdot \frac{dp}{dt} = \frac{\varepsilon}{p}, \quad (2.35)$$

де  $T$  – абсолютна температура повітря;  $c_p$  – питома теплоємність повітря при постійному тиску;  $A$  – термічний коефіцієнт роботи;  $R$  – газова стала величина повітря;  $\varepsilon$  – приплив тепла до одиничного об'єму повітря за одиницю часу.

Розглянемо більш детально математичні моделі викидів небезпечних речовин.

Гауссова модель звичайно використовується для аналізування розповсюдження дрібнодисперсної суміші повітря із забруднювачем. Вона заснована на принципі того, що забруднювач буде розповсюджуватися у відповідності із нормальним розподілом. Гауссове рівняння має вигляд [80,81]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{d}{dy} \left( K_y \frac{dc}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left( K_z \frac{dc}{dz} \right) + s, \quad (2.36)$$

де  $x$  – координата, яка виміряна від джерела вздовж напрямку вітру;  $y$  – координата, яка виміряна від джерела перпендикулярно напрямку вітру;  $z$  – вертикальна координата від ґрунта;  $C = C(x, y, z)$  – середня концентрація дисперсної речовини у точці  $(x, y, z)$ ;  $k_y, k_z$  – коефіцієнти турбулентності за напрямом вісей  $y$  та  $z$ ;  $U$  – середня швидкість вітру вздовж вісі  $x$ .

При реалізації моделі часто роблять деякі спрощення, а саме концентрації забруднюючих речовин не впливають на розріджений потік (пасивна дисперсія); молекулярна дифузія і повздовжна дифузія (вздовж напрямку вітру) незначні; турбулентні потоки є лінійними; викид є постійним і рівномірним, напрям вітру і швидкість осідання домішок є постійними тощо.

Така модель частіше за інших використовується для прогнозування розповсюдження безперервних викидів, які починаються на рівня землі або надземних джерел. Між тим, вона може використовуватися й для розрахунку переривистих викидів [81].

Модель Ейлера має у своїй основі рівняння збереження маси для даного забруднювача. Рівняння має такий вираз [9,10]:

$$\frac{\partial(c_i)}{\partial t} = -U \nabla(C_i') - \nabla(c_i') + D \nabla^2 \langle C_i' \rangle + \langle S_i \rangle, \quad (2.37)$$

$$U = \bar{U} + U';$$

де  $U$ - вектор швидкості переміщення атмосферних мас  $U(x,y,z)$ ;  $\bar{U}$  - вектор швидкості переміщення повітря;  $U'$  - вектор швидкості переміщення викиду;  $C$  – концентрація забруднюючої речовини,  $C = \langle C \rangle + C'$ ;  $\langle C \rangle$  - середня концентрація забруднювача в атмосфері;  $C'$  – концентрація забруднювача у викиді;  $D$  – молекулярний коефіцієнт дифузії;  $S_i$  – швидкість зміни концентрації у початковий момент часу.

Моделі Ейлера використовують фіксовану сітку (горизонтальну і вертикальну). При реалізації моделей розв'язують відповідні рівняння одночасно у всіх чарунках сітки, при чому враховується обмін забруднювачами між чарунками і хімічні реакції.

Звичайно кількість обчислень знижується при використанні різного масштабу сітки, наприклад, у сільських районах, де концентрації речовин достатньо гомогенні застосовують більш «грубі» сітки, на території міст з сильними градієнтами концентрацій речовин, використовують більш тонкі та комбіновані сітки.

Модель Лагранжа дає можливість прогнозувати розповсюдження забруднюючих речовин, враховуючи зміни базової сітки, що не прив'язана до географічних координат. Ці зміни в цілому залежать від того наскільки напрям вітру є близьким до напрямку руху забруднюючої хмари.

Модель Лагранжа може бути подана таким чином [199,202]:

$$\langle C(r,t) \rangle = \iint_{-\infty} p(r_1,t/r',t') S(r',t') dr' dt', \quad (2.38)$$

де  $\langle C(r,t) \rangle$  - середня концентрація забруднюючої речовини у точці з координатами у момент часу  $t$ ;  $S(r', t')$  – визначає джерело викиду;  $p(r, t | r', t')$  – функція імовірності переходу від точки та часу  $(r', t')$  до точки та часу  $(r, t)$ .

Функція імовірності повинна бути визначеною як функція повних метеорологічних даних, близьких до джерел забруднення. Якщо джерело викидів



містить у собі крім газу ще й механічний пил або аерозоль, то кількість рівнянь збільшується. Для кожного виду забруднення існує своє рівняння. Такий підхід дає ефективну обчислювальну систему. Проте важко певним чином описати фізичні і хімічні взаємодії великої кількості окремих видів забруднювачів між собою.

Фізичні рівняння побудовані таким чином, що дозволяють моделювати динаміку процесів у вузлах сітки. Урахування хімічних реакцій здійснюється шляхом додаткової зміни концентрації на кожному кроці розрахунку. Таким чином, модель Лагранжа дозволяє розглядати реакції у чарунці повітря, що переміщується. Цим вона відрізняється від моделі Ейлера, де нерухома сітка прив'язана до реальних географічних координат.

Оцінювання величини концентрації атмосферного забруднення здійснюється, як правило, у декілька етапів.

На першому етапі встановлюється сценарій розвитку аварійної ситуації і вибирається відповідна математична модель з урахуванням особливостей рельєфу місцевості і висоти викиду.

Другий етап присвячений визначенню класу стійкості (турбулентності) для конкретних умов аварійної ситуації за допомогою відповідних вимірів або візуально отриманих параметрів.

Визначення швидкості вітру на рівня викиду здійснюється на третьому етапі.

На четвертому етапі визначається ефективна висота викиду.

Розрахунок коефіцієнтів турбулентності на визначеній відстані, концентрацій і коефіцієнтів дисперсії згідно з моделлю здійснюється на п'ятому і шостому етапу відповідно.

У підрозділі 1.3 цієї роботи відмічалось, що для опису поведінки речовин з високою густиною, які викидаються, був введений спеціальний термін «важкий газ» та розроблені спеціальні математичні моделі.

Необхідність виділення у спеціальний клас моделей розрахунку процесів розсіювання «важкого газу» викликана тим, що більшість газових викидів при промислових аваріях у початковий момент мають більшу за повітря густину. Причини тому можуть бути різні [77]:

– висока молярна маса, більша за молекулярну масу повітря, яка дорівнює 29,5 г/моль, при нормальних умовах до «важких газів» відносяться пропан, бутан, пара нафти, бензина, хлор, сірковуглець і т.д.;

– низька температура (наприклад, метан при нормальних умовах має густину нижче за густину повітря, а при температурі, що дорівнює температурі кипіння ( $-161,5^{\circ}\text{C}$ ), його густина стає вище за густину повітря, й тоді метан вже є «важким газом», тому процес розсіювання метану від його розливу необхідно розраховувати по моделі «важкого газу»);

– наявність аерозолей (наприклад, аміак й при нормальних умовах, й при температурі кипіння є легким газом, тому при змішанні з повітрям суміші, що утворюються. Мають густину меншу за густину повітря, однак у випадку наявності у суміші крапель, вона стає «важким газом»);

– протікання у викиді хімічних реакцій, які призводять до утворення «важкого газу».

Викиди «важкого газу», які схильні до осаджування під дією сили тяжіння, утворюють невисокі, але протяжні (висота таких хмар сягає до декількох метрів, а поперечний переріз – до декількох десятків і навіть сотень метрів). У результаті площа землі, що застилається хмарою, на порядок більша за площу, яка могла би бути, якщо б густина хмари не була би більше за густину повітря. Більш того, при викидах «важкого газу» має місце явище розповсюдження хмари проти вітру, що є неможливим, коли густина газу не відрізняється від густини повітря.

Хмари «важкого газу» мають велику поверхню обміну з атмосферою (поверхню, через яку здійснюється підмішування повітря у дрейфуючий викид). У результаті, незважаючи на те, що питома швидкість підмішування повітря зменшується із збільшенням густини хмари, загальна маса повітря, яка залучається у хмару, суттєво зростає у порівнянні з хмарою нейтральної плавучості.

Необхідність урахування розглянутих ефектів з метою суттєвого покращення прогностичних можливостей методичного апарата (на сотні і навіть на тисячі відсотків) й стала причиною масового переходу за кордоном від гауссовських моделей до моделей «важкого газу».

Як і усі моделі, модель розповсюдження «важкого газу» має ряд обмежень. Наприклад, це пов'язане з необхідністю врахування рельєфу місцевості та наявності забудови.

Методи розсіювання важкого газу базуються на інтегральних законах збереження. Суть цього підходу полягає в наступному. Обирається деякий об'єм, який являє собою простір де розсіюється речовина (у газоподібному та крапельно-рідкому станах). При цьому не намагаються детально описати картину течії всередині цього об'єму й, відповідно, отримати детальний розподіл параметрів цієї течії. У рамках такої модулі відслідковуються зміни інтегральних характеристик середовища у межах цього об'єму (маса, імпульс потоку, енергія тощо), тобто залишається невідомим як зміниться, наприклад, густина у будь-якій точці, але можна розрахувати як змінилася маса середовища у всьому об'ємі, який розглядається; невідомо як змінилася енергія у будь-якій точці, але можна розрахувати як змінилася уся енергія системи у об'ємі, що розглядається, й т.д. Зрозуміло, що відслідковувати зміни інтегральних величин значно простіше і для цього не потрібно розв'язувати складні системи рівнянь у частинних похідних, а необхідно розрахувати лише потоки відповідних величин (маси, енергії й інших) через межі об'єму, що розглядається.

З інтегральних характеристик (маса, імпульс, енергія) можна отримати деяку інформацію про те, як відповідні параметри розподілені всередині даного об'єму. Для цього апріорі задається закон розподілу того чи іншого параметру всередині об'єма. Наприклад, можна припустити, що усі параметри розподілені рівномірно. У більш складному варіанті задається неоднорідний розподіл параметрів. Звичайно у якості таких розподілів обирають гауссові профілі, степеневі залежності тощо.

З метою опису  $c$  розподілу концентрації речовини всередині хмари з координатами  $x, y, z$ , яка утворюється при миттєвому викиді (залповий викид), у вибраних методиках використовується рівняння [77]:

$$c(x, y, z, t) = c_c(t) \exp \left[ - \left[ \frac{z}{S_z(t)} \right]^\beta \right].$$

$$\text{за } (x-x_c)^2 + y^2 < r^2; \quad (2.39)$$

$$c(x, y, z, t) = c_c(t) \exp\left[-\left[\frac{z}{S_z(t)}\right]^\beta\right] \cdot \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2 + y^2 - r^2(t)}{S_y^z(t)}\right]$$

$$\text{за } (x-x_c)^2 + y^2 \geq r^2;$$

де  $x_c$  – місцезнаходження центра хмари, м;  $r$  – радіус центральної частини (ядра) хмари, м;  $c_c$  – концентрація речовини у центрі (на вісі) хмари, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – час, с;  $S_z$   $S_y$  – дисперсія відповідно вертикальна і горизонтальна, м;  $\beta = 1 + \alpha$  ( $\alpha$  – показник степеневі залежності швидкості вітру від висоти).

Картина розсіювання при залповому викиді подана на рис. 2.14 [77].

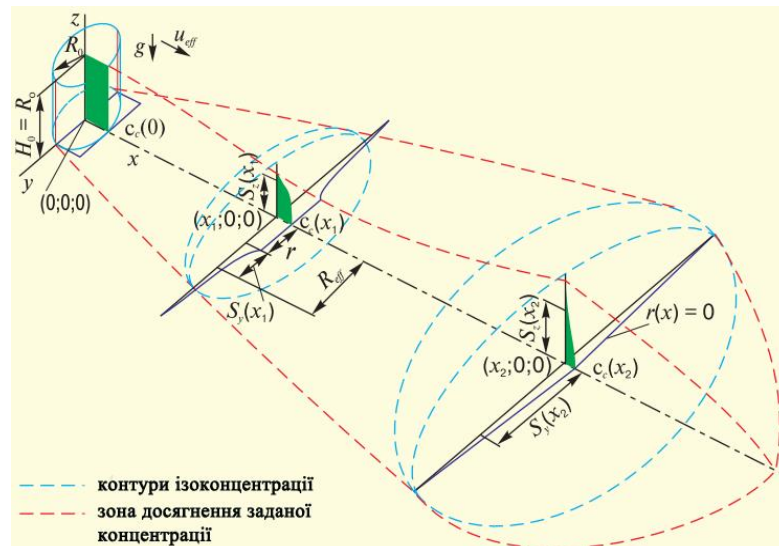


Рис. 2.14. Схема розсіювання «важкого газу» при залповому викиді

На рис.2.14:  $R_0$ ,  $H_0$  – початкові радіус та висота викиду.

Характерною особливістю розподілу концентрації, що описується рівнянням (2.39), й принципово відміною від розподілу, який використовується у гауссовій моделі, є наявність так званого ядра хмари. При залповому викиді всередині цього ядра у будь-якій горизонтальній площині, концентрація речовини є постійною. Наявність ядра з постійною концентрацією визначає факт того, що розмиття хмари по краях здійснюється поступово й необхідний час для дифундування газу від бокової поверхні до центру хмари.

Радіус ядра хмари може збільшуватися під дією сили тяжіння, що спричиняє гравітаційне розтікання хмари з густиною більше за густину повітря. В іншому цей розподіл відображує процеси, які притаманні гауссовому розподілу: перенесення у полі вітру, розсіювання у горизонтальному (експоненційні співмножники з просторовими змінними  $x$  і  $y$ ) і вертикальному (експоненційні співмножники з просторовою змінною  $z$ ) напрямках.

Крім параметрів  $c_c$ ,  $s_z$ ,  $s_y$ ,  $r$ ,  $x_c$  хмара речовини, що розсіюється характеризується також енергією у хмарі ( $Q_{eff}$ , Дж).

Знаючи ці параметри, й при припущенні того, що тиск у хмарі дорівнює тиску оточуючого середовища  $P_0$ , можна, розв'язуючи термодинамічну задачу з відповідними рівняннями стану, визначити густину середовища у хмарі  $P_m$  (кг/м<sup>3</sup>) або питомий об'єм середовища  $V_m$  (м<sup>3</sup>/кг) і температуру цього середовища  $T_m$  (к).

Розгляд типових залізничних аварійних ситуацій за участі небезпечних вантажів свідчить, що вихідними умовами розвитку таких ситуацій, зокрема є витікання, розливання газоподібних та рідких небезпечних речовин при розгерметизації залізничних цистерн або ємкостей, руйнування трубопроводів, відмова запірної арматури, виникнення пробоїн тощо [55, 60].

На формування зон вибухонебезпечних концентрацій при аварійних ситуаціях з такими небезпечними речовинами впливають два типи параметрів: параметри джерела витікання, метеорологічні і топографічні параметри [122 – 129].

Інтенсивність витікання газу, пари та рідини обумовлена такими властивостями джерела витікання як геометричний розмір, швидкість витікання горючої речовини, її концентрація, температура, тиск в середині ємкості, густина рідкої фази, кількість речовини, випаровування та ін.

Величина хмари, яка утворюється при витікання горючого газу або пари залежить від швидкостей їх витікання та розсіювання.

Інтенсивність витікання зростає із збільшенням швидкості витікання горючої речовини та із збільшенням концентрації горючого газу або пари у горючій речовині, яка вивільняється.

При високій швидкості витікання газу і пари утворюється конусоподібний струмінь, який, тягнучи за собою повітря, має здатність до «саморозбавлення». При цьому рівень вибухонебезпеки газової суміші, що утворюється, практично не залежить від швидкості вітру.

При низькій швидкості виходу струменя, або коли швидкість струменю зменшується за будь-якої перешкоди, що призводить до його «розбавлення», рівень вибухонебезпеки газової суміші стає залежним від швидкості повітря [129].

Випаровування горючої рідини залежить, в основному, від тиску насиченої пари і теплоти пароутворення горючої речовини.

Якщо тиск насиченої пари невідомий, то для визначення вибухонебезпечності суміші застосовують температури кипіння і спалаху. Вибухонебезпечна суміш не може існувати, якщо температура спалаху перебільшує максимальну температуру горючої речовини. Чим нижче температура спалаху, тим більші розміри вибухонебезпечної зони.

Необхідно відмітити, що температура спалаху не є точною фізичною величиною. Деякі рідини не характеризуються таким параметром як температура спалаху, хоча вони й можуть утворювати вибухонебезпечну газову суміш. У таких випадках порівнюють усталене значення температури рідини, що відповідає концентрації насиченої пари при нижній концентраційній межі спалаху (тобто при мінімальному вмісті горючої речовини у однорідній суміші з окислювачем, при якому можливе розповсюдження полум'я на будь-яку відстань від джерела запалювання) з максимальною температурою рідини.

Для певного об'єму витіку горючої речовини чим нижче нижня концентраційна межа розповсюдження полум'я, тим більші розміри вибухонебезпечної зони [129 – 131].

Дослідження процесів забруднення атмосфери, формування зон вибухонебезпечних концентрацій довели, що на такі процеси великий вплив чинять метеорологічні умови та топографічні характеристики місцевості, а саме: швидкість повітря, власна швидкість руху аварійних речовин щодо нерухомого повітря, густина, об'ємна концентрація газу (пари), напрямок вітру, вологість повітря,

атмосферні опади, тиск, рельєф місцевості тощо, які здатні або збільшити розміри зон вибухонебезпечних концентрації, або загальмувати процес їх утворення та зведення розмірів таких зон до мінімальних значень [121].

Досвід ліквідування аварійних ситуацій свідчить про те, що найбільшу загрозу для людей, рухомого складу, інфраструктури залізниць та природного середовища становлять ті з них, які супроводжуються пожежами небезпечних вантажів [55, 60].

Розглянемо основні фізико-хімічні процеси горіння і вибуху небезпечних вантажів різних агрегатних станів. Передусім слід відмітити, що горіння є складним, швидкоплинним хімічним перетворенням, яке супроводжується виділенням значної кількості тепла та яскравим свіченням. У більшості випадків горіння зчиняється у результаті екзотермічного окислювання речовини, здатного до горіння (палива), –окислювачем (киснем повітря, хлором та інше). До горіння належать й інші процеси, що пов'язані зі швидким перетворенням та тепловим або ланцюговим їх прискоренням: розкладання вибухових речовин, озону; взаємодія оксидів натру та барію з діоксином вуглецю; розкладання ацетилену тощо [132].

Горіння – це комплекс взаємопов'язаних хімічних та фізичних процесів, важливішими з яких є тепло- та масопереміщення [133]. Найбільш загальною властивістю горіння є здатність вогнища полум'я, яке виникло, переміщуватися по усій суміші, що горить, шляхом передавання тепла або дифузії активних часток із зони горіння у нову суміш.

У першому випадку реалізується тепловий, а у другому – дифузійний механізм розповсюдження полум'я. Як правило, горіння протікає по комбінованому тепловому дифузійному механізму. Важливим є те, що для процесів горіння характерна наявність критичних умов (за складом суміші, тиском, температурою, геометричними розмірами системи) виникнення і розповсюдження полум'я. У всіх випадках для горіння притаманні три типові стадії: виникнення, розповсюдження та згасання полум'я [125,126].

Залежно від агрегатного стану палива та окислювача розрізняють три види горіння:

– гомогенне горіння газів і пароподібних горючих речовин у середовищі газоподібного окислювача;

– гетерогенне горіння рідких і твердих горючих речовин у середовищі газоподібного окислювача (різновидом гетерогенного горіння є горіння рідких палив у рідких окислювачах);

– горіння вибухових речовин і пороху.

За швидкістю розповсюдження полум'я горіння підрозділяють на дефлаграційне, що протікає з дозвуковими швидкостями і детонацією, яка розповсюджується з надзвуковими швидкостями.

У свою чергу дозвукове горіння підрозділяється на ламінарне і турбулентне. Швидкість ламінарного горіння залежить від складу суміші, вихідних значень тиску і температури, а також від кінетики хімічних перетворень у полум'ї. Швидкість розповсюдження турбулентного полум'я, крім цих факторів, залежить й від швидкості потоку, ступеня і масштабу турбулентності [124].

Вибух – це процес швидкого виділення великої кількості енергії. У результаті вибуху вибухонебезпечна (або вибухова) суміш, заповнює об'єм, де зчинилося виділення енергії, перетворюється у дуже нагрітий газ з високим тиском. Цей газ з великою силою впливає на оточуюче середовище, викликаючи утворення вибухової хвилі. Руйнування, які викликані вибухом, обумовлені дією такої хвилі. У міру віддалення від місця вибуху механічна дія вибухової хвилі слабшає.

Розглянемо основні процеси горіння газів.

Перша стадія горіння – запалювання – це ініціювання початкового вогнища горіння у горючій суміші. Встановлено, що запалювання горючих газових сумішей може здійснюватися під час їхнього контакту з розжареними поверхнями (наприклад, вихід газу з пробіони цистерни, що знаходиться в зоні пожежі), при появі у середині суміші іскор або полум'я, що має місце у ситуації утворення зони витоку зріджених вуглеводневих газів з подальшою пожежею витоку.

Запалювання горючої газової суміші у результаті стикання з розжареною поверхнею ємкості здійснюється за умови, якщо температура цієї поверхні перевищує величину температури запалювання ( $T_{inf}$ ). Природа процесу така, що у



тому випадку, коли температура поверхні ( $T_{sur}$ ) недостатня для виникнення процесу прогресивного розігріву горючої суміші та самоприскорення реакції, теплота екзотермічного перетворення відводиться у холодну суміш. Якщо  $T_{inf} > T_{sur}$ , то у горючої суміші виникає прогресивне саморозігрівання й на деякій відстані від нагрітої поверхні температура горючої суміші стає більшою за  $T_{sur}$ , що призводить до формування початкового вогнища горіння.

Крім цього, температура запалювання суттєво залежить від природи поверхні матеріалу ємкості, з якою стикається газова суміш, бо при запалюванні газів розжареною поверхнею, виявляються каталітичні властивості цієї поверхні. Так, якщо каталітична дія виявляється у розгалуженні ланцюгової реакції, то критична температура запалювання знижується, й навпаки, коли взаємодія газу з поверхнею призводить до обривання ланцюгів у ланцюговій реакції, то для здійснення запалювання необхідна більша температура  $T_{sur}$ .

Температура запалювання змінюється й залежно від початкового значення тиску суміші – зниження тиску призводить до підвищення  $T_{inf}$  [124, 126].

Велику загрозу для рухомого складу, інфраструктури залізничного транспорту і довкілля викликає ситуація, коли утворюється зона витоку небезпечного вантажу у газовому агрегатному стані та в ньому виникає електричний розряд.

Виникнення електричного розряду у горючому газі призводить до іонізації газу і перетворення його у плазму. Цей процес супроводжується сильним розігріванням іонізованої зони. У каналі розряду температура перевищує 10000 °K [125].

Однак не будь-який електричний розряд призводить у горючому середовищі до виникнення вогнища полум'я. Полум'я виникає лише у тому разі, коли енергія, що виділилася під час розряду, перебільшує величину мінімальної енергії запалювання. У інших випадках вогнище полум'я не виникає.

Нагрівання електричним розрядом початкового об'єму горючої газової суміші викликає додаткове виділення тепла у результаті хімічного перетворення. При розповсюдженні теплового імпульсу по горючій суміші енергія хімічної реакції

сумується з енергією початкового імпульсу. Збільшення величини сфери нагрівання супроводжується зростанням сумарної кількості тепла, що виділилося, й частки у ньому енергії хімічної реакції.

Якщо дія електричної іскри на горючу суміш призвела до втягнення у хімічне перетворення достатню кількість горючої речовини та температура процесу із зростанням об'єму розігрітої суміші наближається до температури горіння, то в системі встановлюється стаціонарний режим.

Тепло, що відводиться із зони реакції у свіжу суміш, компенсується виділенням тепла під час реакції й виникає стійкий фронт полум'я.

Якщо фронт полум'я віддаляється від місця виникнення іскрового розряду вплив початкового імпульсу на процес, що розвивається, стає менш значущим.

Таким чином, стійкий фронт полум'я формується у тому разі, коли енергії розряду достатньо для нагрівання до температури горіння сферичного об'єму горючої суміші, критичний радіус якої  $r_{CR}$  повинен бути у декілька разів більше характерної ширини зони ламінарного полум'я  $\delta_{FL}$  [126, 128]:

$$r_{CR} \geq 3,7 \delta_{FL} . \quad (2.39)$$

За цієї умови шари суміші, що оточують сферу, яка горить, встигають запалитися раніше, ніж охолоне об'єм, нагрітий іскрою.

Якщо співвідношення (2.1) не виконується, то стаціонарний режим не встановлюється, бо тепловідвід з зони реакції перевищує тепловиділення, горюча суміш охолоджується, й реакція, що виникла в зоні розряду, припиняється.

Іншим поширеним явищем, яке супроводжує аварії за участю небезпечних вантажів під час їх перевезення залізничним транспортом, є самозаймання.

Сутність самозаймання полягає у різкому збільшенні швидкості екзотермічних реакцій, наслідком чого є виникнення горіння речовин при відсутності джерела запалювання.

Потрібно відмітити, що у багатьох теоретичних роботах, в яких досліджуються процеси горіння, часто не розрізняють терміни «займання» та «самозаймання». У роботах, присвячених пожежо- вибухонебезпеці поняття «займання» застосовується до процесів примусового запалення, тобто ініціювання

горіння високонагрітим джерелом запалювання, а поняття «самозаймання» – до процесів виникнення полум'я за відсутності таких джерел [129].

Умова теплового самозаймання зводиться до того, що початкове саморозігрівання горючої суміші у результаті реакції окислення повинне перевищувати деяке критичне значення [128, 129]:

$$\Delta T \geq RT_0 / E, \quad (2.40)$$

де  $R$  – універсальна стала величина;  $T_0$  – температура охолодженої суміші, °К;  
 $E$  – енергія активації.

Час, протягом якого у реагуючій системі досягається розігрівання, яке визначається співвідношенням (2.2), називається періодом індукції самозаймання. Період індукції залежить від складу суміші, її початкової температури і тиску. Період індукції має практичне значення при впливі на горючу суміш газу з повітрям малопотужного джерела займання (іскри). Іскра, потрапляючи у таку суміш, нагріває деякий об'єм суміші й одночасно у той же час відбувається охолодження іскри. При цьому, якщо час індукції більше часу охолодження, то займання не відбудеться.

Встановлено, що теплове самозаймання виникає тим легше, чим вище швидкість реакції й температура згоряння, й чим менше швидкість тепловіддавання та передвибухове розігрівання [128, 129].

Особливу увагу заслуговує залежність температури самозаймання від складу горючої суміші. Якщо суміш має малу кількість горючої речовини та існує надлишок повітря, то запалення такої суміші неможливе. Також наявність у складі суміші надлишку пального та нестача повітря, теж робить неможливим запалення цієї суміші.

Значну увагу до себе привертає процес розповсюдження полум'я. Ініціювання горіння газової суміші у одній точці призводить до нагрівання поближких шарів суміші, в яких починається хімічне перетворення. Згоряння цих шарів тягне за собою ініціювання горіння наступних шарів й так далі, аж до повного вигорання горючої суміші. Таким чином, при займанні горюча суміш згоряє шарами. Зона горіння переміщується по суміші, забезпечуючи розповсюдження полум'я.

Зона, у якій протікає хімічне перетворення й відбувається інтенсивне розігрівання газу, що згоряє, називається фронтом полум'я.

Перед фронтом полум'я, що розповсюджується, знаходиться свіжа суміш (що не згоріла), а позаду – продукти горіння.

Якщо свіжа суміш рухається назустріч фронту полум'я зі швидкістю, що дорівнює швидкості розповсюдження полум'я, то полум'я буде нерухомим [130, 131].

Оскільки швидкість хімічного перетворення дуже залежить від температури, згорання основної маси газу здійснюється у зоні, температура якої близька до температури горіння свіжої суміші ( $T_B$ ), то тривалість часу ( $\tau$ ) перебування суміші у зоні горіння дорівнює [128, 131]:

$$\tau = \tau_0 e^{E/RT_B}, \quad (2.41)$$

а швидкість розповсюдження полум'я визначається співвідношенням [128, 131]:

$$U = B_0 e^{E/RT_B}, \quad (2.42)$$

де  $B_0$  – величина, яка залежить від властивостей суміші.

При розповсюдженні полум'я тепло, що виділяється під час реакції, витрачається на нагрівання свіжої суміші та частково надходить у оточуюче середовищі. Якщо втрати тепла стануть вище за деяке критичне значення, то зчиниться прогресивне зниження температури та його затухання.

З урахуванням взаємного впливу втрати тепла з зони горіння та температури горіння, а також швидкості розповсюдження полум'я сформульовані основні положення теорії граничних значень розповсюдження полум'я. З цієї теорії випливає, що умовою можливості розповсюдження полум'я по горючій суміші є виконання співвідношення [131]:

$$T_{CR} = T_{TH} - (RT_{TH}^2 / E), \quad (2.43)$$

де  $T_{CR}$  – граничне значення  $T_B$ ;  $T_{TH}$  – теоретична температура горіння.

Граничне значення швидкості розповсюдження полум'я  $U$  визначається співвідношенням [131]:

$$U_{CR} = U_{MAX} / \sqrt{e}. \quad (2.44)$$

Формула (2.44) свідчить про те, що полум'я не може розповсюджуватися по горючій суміші, якщо його температура буде нижче за теоретичну на величину, що перебільшує  $(RT_{TH}^2 / E)$ .

Під час згоряння газів на відкритому просторі продукти реакції вільно розширюються й тиск залишається практично постійним. Згоряння у замкненому об'ємі супроводжується підвищенням тиску. Максимальний тиск вибуху у замкненому об'ємі визначається термодинамічними властивостями горючої суміші та втратами тепла із зони горіння.

Зважаючи на вищенаведене, можна зробити припущення про те, що природа явищ, які супроводжують горіння газів, має властивість інерційності, здатність повільно відгукуватись на зовнішні чинники, й за деяких умов може зовсім завадити цим факторам щодо розвитку процесу горіння, аж до його припинення.

Найбільшу кількість небезпечних вантажів, що перевозяться залізничним транспортом, складають вантажі, які є легкозаймистими рідинами.

Розглянемо основні процеси, які супроводжують горіння таких рідин.

Горіння рідин – це складний фізико-хімічний процес, який протікає при взаємному впливі кінетичних, теплових і гідродинамічних явищ. Горіння рідин відбувається у газовій фазі. У результаті випаровування, над поверхнею рідин утворюється паровий струмінь, змішування та хімічна взаємодія якого із киснем повітря забезпечує формування зони горіння.

Зоною горіння є тонкий світний шар газів, у який з поверхні рідини надходять горючі пари, а з повітря дифундує кисень. Стехіометрична суміш, що утворюється (тобто така, яка не має надлишку ані палива, ані окислювача), згоряє за частки секунди.

Форма й розміри полум'я рідин суттєво залежить від діаметра резервуара (приладу), у якому відбувається горіння. Висота полум'я зростає із збільшенням діаметра резервуара, пробоїни [127].

Полум'я над поверхнею горючої рідини стійке, якщо до нього з визначеною швидкістю надходять пари палива і кисню.

Швидкість надходження палива залежить від тиску його парів над поверхнею рідини, а отже й від його температури. Найменша температура рідини ( $T_B$ ) при якій полум'я, що виникло, не згасне, називають температурою займання.

Встановлено, що температура займання визначається залежністю [127]:

$$P_B = A/(D_0\beta T_B), \quad (2.45)$$

де  $P_B$  – тиск насичених парів рідини при температурі займання;  $A$  – постійна приладу;  $D_0$  – коефіцієнт дифузії пари у повітрі;  $\beta$  – стехіометричний коефіцієнт кисню.

Процес вигорання рідин характеризується швидкістю вигорання. Швидкість вигорання не є фізико-хімічною константою, вона залежить від властивостей легкозаймистих рідин, діаметра резервуара (пробоїни) та умов тепло- і масообміну у зоні пожежі.

Як й при процесах горіння газів, при горінні горючих рідин спостерігається схильність процесу такого горіння до уповільненої у часі реакції на зовнішні чинники, які спричиняють, за певних умов, до значного уповільнення й, навіть, до повного припинення горіння.

Значну частку вантажів, що перевозяться залізничним транспортом, складають тверді горючі матеріали.

Горіння твердих речовин відрізняється від горіння газів наявністю стадії розкладання та газифікації.

Горіння у середовищі газоподібного окислювача найчастіше зчиняється у результаті займання летючих продуктів піролізу. Перетворення твердої горючої речовини у продукти горіння не зосереджене тільки у зоні полум'я.

Горіння твердих речовин має багатостадійний характер. Під впливом зовнішнього тепла відбувається нагрівання твердої фази, яке супроводжується розкладанням і виділенням газоподібних продуктів. Потім ці продукти займаються

й згоряють. Тепло від факела, що утворився, впливає на поверхню твердої речовини, викликаючи надходження у зону горіння нових порцій горючих газів.

Модель горіння твердої речовини передбачає наявність таких зон [128]:

- прогрівання конденсованої фази. У термопластичних речовин у цій зоні відбувається плавлення. Товщина цієї зони визначається співвідношенням коефіцієнтів температуропровідності та швидкості горіння й складає близько 3 мм;
- піролізу, або реакційної зони у конденсованій фазі, в якій утворюються газоподібні горючі речовини;
- передполум'яної зони у газовій фазі, де відбувається утворення горючої суміші;
- полум'яної або реакційної зони у газовій фазі, де відбувається перетворення продуктів піролізу у газоподібні продукти горіння;
- продуктів горіння.

Інтенсивність реакцій, що відбуваються у поверхневому шарі твердої речовини, та умови теплообміну газоподібних продуктів розкладання з оточуючим середовищем визначають режими протікання процесів горіння – самозаймання або займання.

У режимі самозаймання тепло, що надходить до поверхні твердої речовини від джерела нагрівання, рівномірно розподіляється по усій товщині приповерхневого шару, яка відповідає характерному розміру матеріалу. У режимі примусового запалювання зовнішнім джерелом є товщина прогрітого шару, у якому відбувається гетерогенна реакція, суттєво менша за характерний розмір матеріалу.

Таким чином, як й у процесах горіння газів та рідин, під час горіння твердих речовин також спостерігаються явища інерційності процесів горіння, прагнення, за певних умов, системи «твердий матеріал, що горить – оточуюче середовище», до гальмування процесів горіння, аж до їх припинення.

Деякі класи небезпечних вантажів, що перевозяться залізничним транспортом, при аваріях за їх участю можуть утворювати пил.

Процес горіння газосумішей суттєво визначається механізмом теплопередавання у фронті полум'я. Існують декілька теорій, які пояснюють закономірність розповсюдження полум'я по газосуспензіях з позицій кондуктивного, радіаційного та кондуктивно-радіаційного теплопередавання із зони горіння у свіжу суміш.

Для органічних систем теплопередавання, в основному, здійснюється шляхом кондуктивно-конвентивного теплообміну. Внаслідок низьких температур газифікації палива, а також вузьких зон горіння переважним механізмом теплопередавання є теплопровідність по газу. Вплив гравітації на горіння газосумішей виявляється в осіданні часток під дією сили тяжіння, що призводить до появи відносної швидкості фаз у свіжій суміші, розігріті продукти горіння зазнають впливу архимедової сили.

Модель фронту полум'я у цьому разі можна приблизно подати таким чином. Під дією теплового потоку з високотемпературної зони хмари пилу, що горить, частки встигають випаровуватися до займання. Фронт полум'я розповсюджується по однорідній газоподібній суміші пару палива з повітрям.

Реакція взаємодії палива з окислювачем протікає у кінетичній області, підпорядковуючись відомим з теплової теорії закономірностям.

Рух фронту полум'я призводить до часткового розсіювання свіжої суміші поблизу ведучих точок полум'я. При цьому газова фаза (окислювач) розсіюється у більшому ступені, ніж конденсована (паливо), у результаті чого фази отримують відносну швидкість й відповідно змінюється співвідношення паливо-окислювач у фронті полум'я.

Збільшення концентрації палива супроводжується зростанням швидкості полум'я у цих областях, що викликає подальше зростання опуклих ділянок фронту полум'я і відставання угнутих областей.

Прояв такого ефекту призводить до того, що полум'я здатне розповсюджуватися по газосуспензії зі середньою концентрацією палива нижче концентраційної межі розповсюдження полум'я плаского фронту полум'я газової суміші. Орієнтовні оцінки свідчать, що мінімальний вміст палива у однорідній



суміші з окислювачем, при якому можливе розповсюдження полум'я по суміші на будь-яку відстань від джерела запалення, у газосуспензій, приблизно, у два рази менше за аналогічний мінімальний вміст палива газових сумішей самих речовин. Така властивість газосуспензій органічних речовин виявляється, починаючи з діаметра часток 10 мкм [129].

Особливої уваги заслуговують процеси горіння газосуспензій природного палива, які складають значну частку вантажів, що перевозяться залізничним транспортом (вугілля, торф, деякі мінеральні добрива).

Тверде природне паливо відрізняється від більшості хімічних речовин наявністю трьох складових: летючої частки, коксу і золи. Процеси займання і розповсюдження полум'я кожної з цих часток мають певні особливості.

Летюча частка палива – це газоподібні компоненти, які виділяються з палива при нагрівання без участі окислювача. Кокс за своїм складом близький до вуглецю. Швидкість горіння коксу у багато разів нижче швидкості горіння летючих часток.

У зв'язку з цим участь коксу у пилових вибухах натуральних палив є незначною. У золі, яка складає мінеральну частину палива, містяться певні компоненти, які можуть брати участь у горінні (лужні метали, пірити й колчедани), але зола, у цілому, відіграє роль інертного матеріалу.

Вибухи газосуспензій твердого палива є типовими тепловими вибухами. Розповсюдження полум'я по суміші здійснюється у результаті передавання тепла від продуктів горіння у свіжу суміш. Тепло може передаватися за різними механізмами залежно від розмірів часток, їх концентрації, складу і параметрів газового середовища та інших чинників [129, 130].

На відміну від горіння газових сумішей процеси у газосуспензіях природного палива ускладнюються через тривалість прогрівання часток й можливості протікання реакції окислення палива як у кінетичній, так й у дифузній області. У загальному випадку температура часток відрізняється від температури оточуючого газу як у зоні хімічної взаємодії, так й у зоні прогрівання [129, 130].

Найбільше визначення отримала модель розповсюдження полум'я по газосуспензії часток природного палива, яка запропонована у роботі [128].

Згідно з цією моделлю, максимальна швидкість розповсюдження полум'я  $U_{FL}$  при достатньо великій товщині фронту дорівнює:

$$U_{FL} = \frac{\sigma T_E^4}{c\rho\mu(T_S - T_0)}, \quad (2.46)$$

де  $T_E$  – ефективна температура випромінювання фронту полум'я;  $\sigma$  – стала величина (постійна Стефана – Больцмана);  $c$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  – відповідно об'ємна теплоємність; щільність і концентрація твердої фази;  $T_S$  – температура самозаймання;  $T_0$  – початкова температура суміші.

Початковий період розповсюдження полум'я по газосуспензії характеризується стрибкоподібною зміною швидкості, що обумовлено розмірами первісно запаленої зони, тривалістю підігрівання до температури самозаймання, яка залежить від товщини фронту полум'я, що випромінює, та згоряння частки пилу.

З огляду на вищенаведене, цілком природно припустити, що явище горіння пилу супроводжується процесами інерційності, здатними, за певних умов, загальмувати процес горіння, або повністю його припинити.

Таким чином, з розглянутих процесів розвитку аварій з небезпечними вантажами різного агрегатного стану можна зробити висновок про те, що навколишнє природне середовище має деяку інерційність реагування на зовнішню дію небезпечних чинників аварії, протидіє ним щодо зміни свого стану і поведінки, тобто має властивості самопідтримання і саморегуляції, що, за певних умов, може призвести до гальмування катастрофічних процесів, аж до їх припинення.

Для побудови теоретичних моделей впливу наслідків процесів горіння та вибуху на стаціонарні виробничі об'єкти застосовують системи диференціальних рівнянь, які описують різноманітні фізико-хімічні процеси розповсюдження забруднення продуктами горіння та вибуху атмосфери, ґрунту, річок і водойм за різних граничних умов, що враховують поширення таких забруднень при заданих метеорологічних умовах, потужність джерел забруднень і фізичні властивості підстилаючої поверхні (її рельєф, забудови, лісопаркові зони та ін.). Широко також застосовуються методи лінійного регресійного аналізу, розпізнавання образів, послідовної графічної регресії та інші [131, 132].

На наш погляд, поруч з розглянутими вище моделями, для прогнозування наслідків залізничних аварійних ситуацій за участю небезпечних вантажів доцільно

застосовувати математичні моделі теорії масового обслуговування. При цьому, як довело дослідження, ці моделі потребують суттєвої адаптації до специфічних умов залізничної аварійної ситуації. Лише така адаптація дозволить практично застосовувати ці моделі для ліквідації наслідків таких ситуацій. У роботах [105,116] розглянуто екологічну систему «аварійний рухомий склад – навколишнє середовище» як марковську систему масового обслуговування (СМО), що дало змогу виявити співвідношення між параметрами цієї СМО, які призводять до катастрофічного наслідку. Детально дослідження функціонування такої СМО подано у Додатка Б.

## **2.6. Визначення еквівалентної кількості сильнодіючих отруйних речовин у первинній та вторинній хмарах**

Для прогнозування масштабів зараження сильнодіючими отруйними речовинами при аваріях на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті широко застосовуються штатні моделі служб Цивільного захисту. Стандартна методика [190] оснований на емпіричних моделях і дозволяє визначити максимально можливу зону ураження при викидах отруйних речовин. Модель зазначає не реальне положення хмари викиду у той чи інший момент часу, а визначає межі, в яких концентрація отруйних речовин може досягти небезпечні для здоров'я людей значень при несприятливих метеоумовах. Структурно-аналітична модель визначення еквівалентної кількості сильнодіючої отруйної речовини у первинній та вторинній хмарах подана на рис. 2.15.

При визначенні еквівалентної кількості СДОР у вторинній хмарі необхідно враховувати наявність найменування аварійної небезпечної речовини у довідниках. При наявності найменування СДОР у довідниках коефіцієнти  $K_7$ , що враховує вплив температури повітря та  $K_2$ , який залежить від фізико-хімічних властивостей СДОР, визначаються з довідникових таблиць [107, 185, 190].

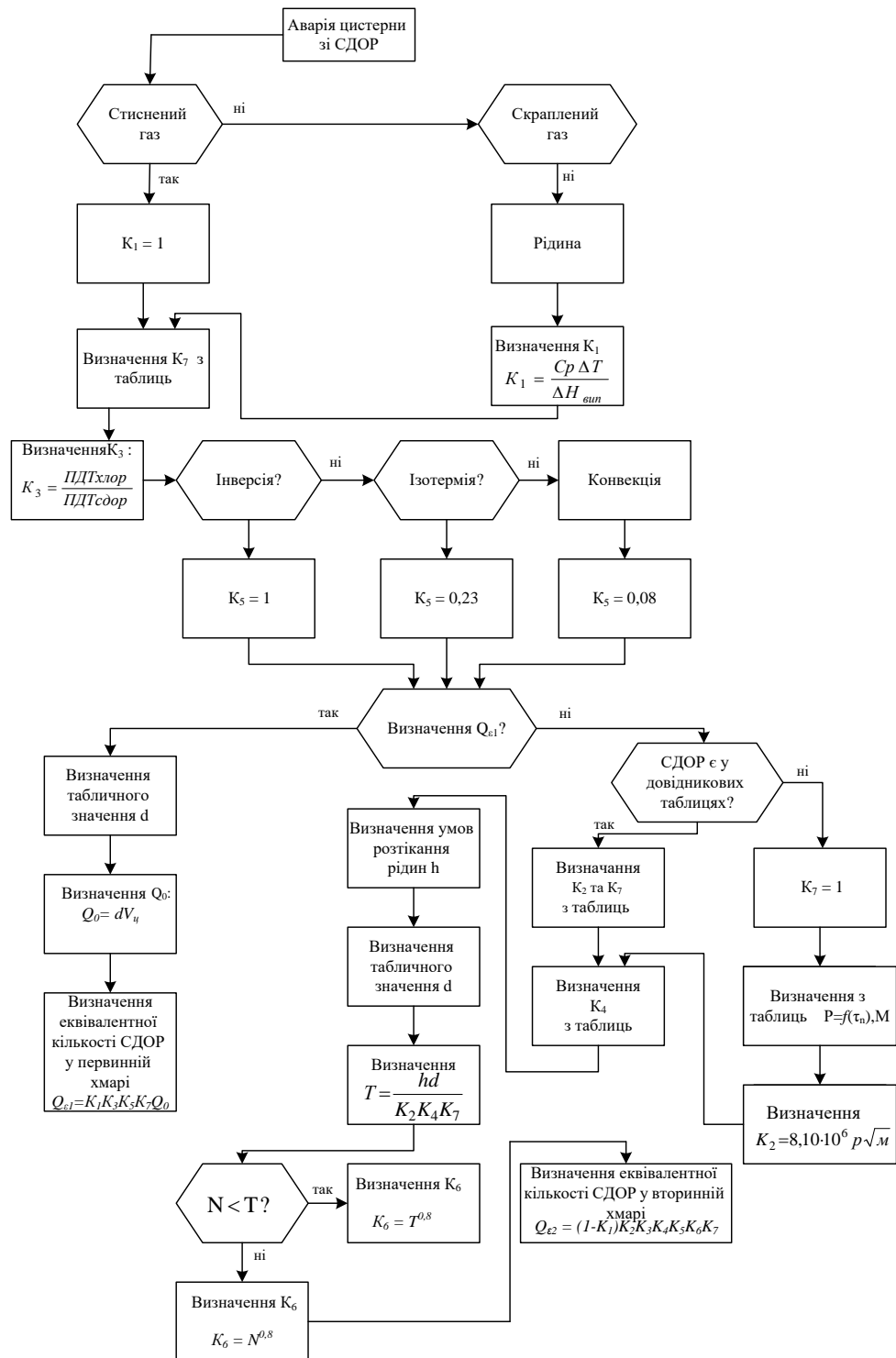


Рис. 2.15. Структурно-аналітична модель метода визначення еквівалентної кількості СДОР у первинній та вторинній хмарах

Розрахунок максимальної глибини зони зараження первинною ( $\Gamma_1$ ) та вторинною ( $\Gamma_2$ ) хмарою СДОР, де глибина такої зони (км) є функцією швидкості вітру (м/с) та відповідної кількості СДОР (т).

Повна глибина зони  $\Gamma$  (км), обумовленої впливом первинної та вторинної хмари СДОР, визначається  $\Gamma = \Gamma' + 0,5 \Gamma''$ , де  $\Gamma'$  – найбільший,  $\Gamma''$  – найменший з розмірів  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$ .

Отримане значення порівнюється з гранично можливим значенням глибини переносу повітряних мас  $\Gamma_{\text{п}}$ , яке визначається за формулою [107, 185, 190]:

$$\Gamma_{\text{п}} = Nv \quad (2.47)$$

де  $N$  – час від початку аварії, год;

$v$  – швидкість переносу переднього фронту зараженого повітря при визначеній швидкості повітря і ступеня стійкості повітря, км/год.

За підсумковою розрахунковою глибину зони зараження приймається менше з двох значень, що порівнюється між собою.

Площа зони можливого зараження для первинної (вторинної) хмари СДОР визначається співвідношенням:

$$S_{\text{в}} = 8,72 \cdot 10^{-3} \Gamma_{\phi}^2, \quad (2.48)$$

де  $\Gamma$  – глибина зони зараження, км;

$\phi$  – кутові розміри зони можливого зараження, ...° (табл.2.7).

Таблиця 2.7

### Кутові розміри зони можливого зараження СДОР

Швидкість повітря, км/с	< 0,5	0,6 - 1	1,1 – 2	> 2
Кутові розміри зони можливого зараження $\phi^0$	360	180	90	45

Площа зони фактичного зараження  $S_{\phi}$  (км<sup>2</sup>) розраховується за формулою:

$$S_{\phi} = K_8 \Gamma^2 N^{0,2} \quad (2.49)$$

де  $K_8$  – коефіцієнт, який залежить від ступеня вертикальної стійкості повітря, який приймається таким, що дорівнює 0,081 при інверсії; 0,133 при ізотермії; 0,235 при конвекції;

$N$  – час, який пройшов після початку аварії, год.

Час підходу хмари СДОР до певного об'єкта залежить від швидкості переносу хмари повітряним потоком і визначається співвідношенням:

$$t = \frac{x}{v}, \quad (2.50)$$

де  $x$  – відстань від джерела зараження до певного об'єкта, км;

$v$  – швидкість переносу фронту хмари зараженого повітря, км/год.

Усі шкідливі речовини за ступенем небезпеки для людини поділені на чотири класи. Як показник небезпеки, прийнятий коефіцієнт можливого інгаляційного отруєння – КМІО [185, 190]:

$$\text{КМІО} = \frac{C_{20}}{C_{50}}, \quad (2.51)$$

де  $C_{50}$  – концентрація речовини, що викликає загибель 50 % піддослідних тварин при 2–4 г інгаляційної речовини (мг/м<sup>3</sup>);

$C_{20}$  – насичена концентрація при  $t = 200\text{С}$ .

Даний коефіцієнт залежно від числового значення дозволяє поділити хімічні речовини за інгаляційною небезпекою на чотири класи:

1-й (надзвичайно небезпечні) КМІО = 300;

2-й (дуже небезпечні) КМІО = 30–300;

3-й (помірно небезпечні) КМІО = 3–30;

4-й (малонебезпечні) КМІО = < 3.

Серед небезпечних хімічних речовин виділяється особлива група речовин, що є найбільш небезпечними для людей у разі потрапляння у природне середовище. Речовини цієї групи називаються сильнодіючими отруйними речовинами (СДОР).

Прийняті два критерії добору в групу СДОР: перший – належність токсичної речовини до 1–2 класу небезпеки за КМІО; другий – імовірність і масштаби можливого зараження повітря, води, місцевості при виробництві, транспортуванні та зберіганні НХР.

Введення другого критерію зумовлене тим, що з досить великої кількості відомих і запланованих на майбутній випуск хімічних сполук, віднесених за величиною КМІО до 1–2 класу небезпеки, реальну загрозу масового ураження людей становить лише та їх частина, яка характеризується великим масштабом виробництва, споживання, зберігання і транспортування.

Потрапляючи в організм, шкідливі речовини переносяться кров'ю до всіх органів та тканин. Тому порушення процесів обміну в будь-якому органі призводить, як правило, до порушення інших функцій організму

Залежно від ділянки в ланцюгу обміну речовин, в якому під дією тієї чи іншої токсичної сполуки відбувається порушення нормальних процесів, ступінь її токсичності буває більшим або меншим. Найбільш токсичними є ті хімічні сполуки, які впливають на найважливіші ферментні системи організму.

Отруйні речовини потрапляють у шлунково-кишковий тракт завдяки невиконанню правил особистої гігієни, наприклад, харчування або куріння без попереднього миття рук. Ці речовини відразу можуть потрапити у кров із ротової порожнини. До таких речовин, наприклад, належать жиророзчинні сполуки, феноли, ціаніди. Кисле середовище шлунку і слаболужне середовище кишечника можуть призводити до підсилення токсичності деяких сполук (н-8,  $PbSO_4$  переходить у більш розчинну сполуку  $PbCl_4$ ). Потрапляючи у шлунок, такі отруйні речовини як, наприклад, ртуть, мідь, церій, уран можуть викликати подразнення його слизової оболонки

Розчиняючись у шкіряному жирі та потових залозах, речовини можуть потрапляти у кров. До них належать легкорозчинні у воді і жирах вуглеводні, ароматичні аміни, бензол, анілін тощо. Ураження шкіри, безумовно, прискорює проникнення отруйних речовин в організм.

Дуже негативні наслідки виникають із впливом отруйних речовин на живі організми, повітря, ґрунт, воду тощо. Своєю дією ці речовини призводять до критичного стану навколишнього середовища (знищення людей, тварин, рослин), впливають на здоров'я та працездатність людей, на їхнє майбутнє покоління. Отже, отруйні речовини – це токсичні хімічні сполуки, які призводять до ураження всіх живих організмів, особливо людей та тварин, а також до забруднення місцевості. Ступінь ураження отруйними речовинами залежить від їхньої токсичності, вибіркової дії, тривалості, а також від їхніх фізико-хімічних властивостей.

За токсичністю отруйні речовини можна поділити на [185, 190]:

– нервово-паралітичної дії (наприклад, зарин-СВ, зоман-СД)

- виклик бронхоспазмів, задухи, паралічу;
- загальнотоксичної дії (наприклад, синильна кислота, хлорціан)
- набрякання, кома, параліч, судоми, прискорене серцебиття;
- подразнюючої дії (Сі-Ар, Сі-Ес) – подразнення слизових оболонок носа, ротової порожнини;
- шкірно-наривної дії (наприклад, іприти) – місцеві запалення та некротичні зміни у поєднанні із загальнотоксичними резорбтивними явищами.

За вибірковою дією отруйні речовини можна поділити на [185, 190]:

- серцеві – кардіотоксична дія: ліки, рослинні отрути, солі барію, калію, кобальту, кадмію;
- нервові – порушення функцій нервової системи (чадний газ, аміак, вуглеводні, фосфорорганічні сполуки, алкогольні вироби, наркотичні засоби, снотворні ліки та ін.);
- печінкові – хлоровані вуглеводні, альдегіди, феноли, фосфор, селен та ін.;
- ниркові – сполуки важких металів, етиленгліколі, щавлева кислота та інші;
- кров'яні – похідні аніліну, анілін, нітрити;
- легеневі – оксиди азоту, озон, фосген.

За тривалістю дії отруйні речовини можна поділити на три групи [185, 190]:

- летальні, що призводять або можуть призвести до смерті (у 5 % випадків): термін дії до 10 діб;
- тимчасові, що призводять до нудоти, блювоти, набрякання легенів, болі у грудях: термін дії від 2 до 5 діб;
- короткочасні – тривалість декілька годин. Призводять до подразнення у носі, ротовій порожнині, головного болю, задухи, загальної слабкості, зниження температури.

Для послаблення впливу шкідливих речовин на організм людини, для визначення ступеня забрудненості довкілля та впливу на рослинні та тваринні організми, проведення екологічних експертиз стану навколишнього середовища або окремих об'єктів чи районів нині в усьому світі користуються таким поняттям, як якість природного середовища. Нормативи якості виражаються у гранично



допустимих концентраціях (ГДК) шкідливих речовин (полютантів), гранично допустимих викидах (ГДВ), гранично допустимих екологічних навантаженнях (ГДЕН), максимально допустимому рівні (МДР), тимчасово погоджених викидах (ТПВ) та орієнтовно безпечних рівнях впливу (ОБРВ) забруднюючих речовин у різних середовищах.

Мета нормативів якості – забезпечити науково обґрунтоване поєднання екологічних і економічних інтересів як основи суспільного прогресу. Це свого роду вимушений компроміс, що дозволяє розвивати господарство, охороняти життя і благополуччя людини. В основі нормативів якості лежать три показники: медичний, технологічний, науково-технічний. Медичний показник установлює граничний рівень загрози здоров'ю людини.

Технологічний показник оцінює рівень встановлених меж техногенного впливу на людину і середовище існування. Науково-технічний показник оцінює можливість науково-технічних засобів контролювати дотримання меж впливу за всіма необхідними характеристиками.

Гранично допустимі концентрації (ГДК) належать до показників якості навколишнього середовища стосовно здоров'я людини. ГДК вмісту шкідливих речовин, а також шкідливих мікроорганізмів та інших біологічних речовин належать до нормативів санітарно-гігієнічного характеру

Гранично допустима концентрація (ГДК) (норматив) – кількість шкідливої речовини в навколишньому середовищі, яка при постійному контакті або взаємодії за певний проміжок часу не впливає на здоров'я людини і не викликає небажаних наслідків у майбутніх поколіннях

Нормативи ГДК в Україні єдині і обов'язкові для усіх підприємств і структур, незалежно від форм власності й підпорядкованості. Під час визначення ГДК враховують не лише ступінь впливу на здоров'я людини, але і їх дію на диких та свійських тварин, рослини, гриби, мікроорганізми й природні угруповання в цілому.

Результати найновіших досліджень свідчать, що нижніх безпечних меж впливів канцерогенів та іонізуючої радіації не існує. Будь-які дози, що перевищують звичайний природний фон, є шкідливими. За наявності в повітрі чи

воді кількох забруднювачів їх сумарна концентрація не повинна перевищувати 1.

Приблизний розрахунок:

$$C_1 / \text{ГДК}_1 + C_2 / \text{ГДК}_2 + \dots + C / \text{ГДК} = 1,$$

де  $C_1, C_2, \dots, C$  – фактичні концентрації забруднювачів, мг/м<sup>3</sup>;

ГДК<sub>1</sub>, ГДК<sub>2</sub>, ..., ГДК – ГДК забруднювачів, мг/м<sup>3</sup>.

Дуже шкідливою є сумарна дія таких поллютантів, як сірчаний газ, діоксид азоту, фенол, аерозолі, сірчана H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> та фтористоводнева HF кислоти.

Якщо сумарна концентрація забруднювачів більша за 1, то кажуть, що санітарний стан не відповідає нормативним вимогам. Для різних середовищ ГДК одних і тих самих токсикантів різняться. Під час визначення ГДК речовин природних вод поділяються на: ГДК вод господарсько-питного призначення; ГДК вод рибного господарства (тут ГДК тих самих речовин мають різне значення)

У ґрунтах ГДК речовин визначають переважно для одного шару. Речовини не повинні шкідливо впливати на якість продукції, що вирощується людиною для споживання, а також на здатність ґрунту до самоочищення.

Оцінювання збитків від наслідків залізничних аварійних ситуацій здійснюється згідно з відповідною методикою [190].

## **2.7. Оцінювання наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами**

Вище був розглянутий порядок визначення небезпечних чинників аварійної ситуації з небезпечними вантажами, які не мають отруйних властивостей. Між тим, велика кількість небезпечних вантажів є отруйними, тому їхні викиди в атмосферу можуть призвести до отруєння людей і тварин.

Проведемо, як приклад, розрахунок небезпечних для довкілля чинників аварійної залізничної ситуації пов'язаною з витіканням легкозаймистої речовини (бензину АІ-95) через пошкоджений зливний пристрій ( $S_0 = 78,5$  см) стандартної цистерни об'ємом  $V_{\text{ц}} = 61,2$  м<sup>3</sup> на одній із залізничних станцій Південно-Західної залізниці з нахилом місцевості менше 1% ( $f = 5$ ), температура повітря  $t_{\text{п}} = 28^{\circ}\text{C}$ ,

швидкість повітряного потоку  $V_{\text{п}} = 0$  м/с; площа зливного пристрою  $S_0 = 78,5$  см<sup>2</sup>, внутрішній діаметр цистерни  $H = 2,8$  м, ступінь заповнення цистерни  $\epsilon = 0,85$ .

Як це було показано вище, аналогічні ситуації трапляються на залізницях України частіше за інші аварійні ситуації.

Характеристики аварійної ситуації при витіканні усієї маси бензина ( $M = 42000$  кг) продовж повного часу витікання ( $\tau_{\text{пв}} = 50$  хв) подані у табл.2.8.

Таблиця 2.8

### Характеристики аварійного витікання бензина з цистерни

Час ( $\tau$ ), хв	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Площа розлиття ( $S_{\text{р}}(\tau)$ ), м <sup>2</sup>	26,25	52,5	78,75	105	131,25	157,5	183,75	210	236,25	262,5
Маса розлиття ( $M(\tau)$ ), кг	4200	8400	12600	16800	21000	25200	29400	33600	37800	42000
Маса випаровування ( $M_{\text{р}}(\tau)$ ), кг	2,4	9,6	21,6	38,4	60,0	86,5	117,7	153,7	194,6	240,2
Маса всмоктування ( $M_{\text{в}}(\tau)$ ), кг	0,01	0,04	0,09	0,14	0,23	0,33	0,46	0,61	0,77	0,96
Маса на поверхні ґрунта ( $M_{\text{п}}(\tau)$ ), кг	4197,6	8390,4	12578,3	16761,5	20939,8	25113,2	29281,8	33445,7	37604,6	41758,2
Радіус зони загазування ( $R(\tau)$ ), м	12,8	20,2	26,4	31,9	36,9	41,7	46,1	50,4	54,5	58,4

Дані табл.2.8 свідчать про те, що у штильових умовах, які є найнебезпечнішими навколо аварійної цистерни [337], найбільш негативний вплив на довкілля за цей період розвитку аварійної ситуації становлять випари легкозаймистої речовини у повітря, накопичення її на поверхні ґрунта із збільшенням площі розливу і радіуса зони загазування. З цієї таблиці видно, що скорочення часу проведення ліквідаційних заходів, наприклад з 35-ї хвилини, тільки на 5 хвилин призведе до зменшення площі розлиття на 26,25м<sup>2</sup>, маси випаровування бензина у навколишнє середовище на 40,9 кг, маси легкозаймистої рідини на поверхні ґрунта на 415,9 кг та радіусу зони загазування більше ніж на 4 м.

Характеристики подальшого розвитку аварійної ситуації після розливу усієї кількості легкозаймистої речовини надані на графіку (рис. 2.16).

Подальший розвиток аварійної ситуації залізничної цистерни з бензином характеризується великою кількістю пари бензину, яка надходить у навколишнє середовище. Маса бензину, що всмоктується у баластну призму залізничного

полотна є незначною: на 60-й хв. – 1,2 кг, на 100-й хв. – 1,9 кг, на 140-й хв. – 27 кг; на 240-й хв. – 4,42 кг. Маса легкозаймистої рідини на поверхні ґрунта знижується з 41,2 т на 60-й хв. до 40,3 т на 240-й хв., а радіус зони загазування збільшується відповідно з 62 м до 98 м.

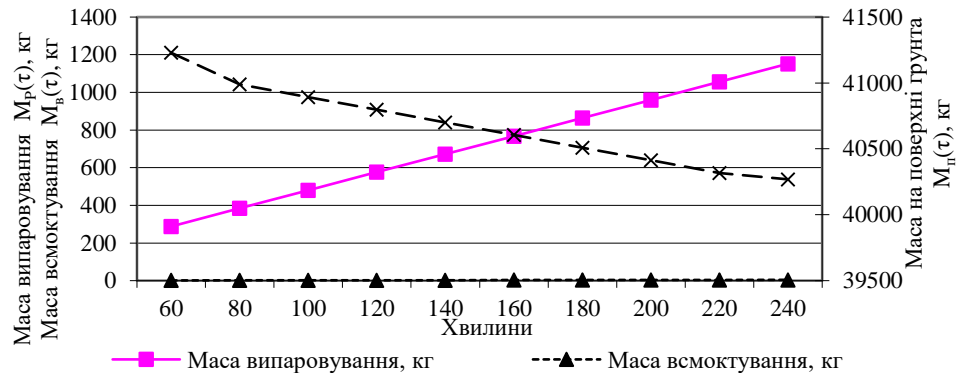


Рис.2.16. Залежності маси випаровування  $M_p(\tau)$ , маси всмоктування  $M_v(\tau)$  і маси бензина на поверхні ґрунта  $M_n(\tau)$  від часу

До недоліків структурно-аналітичної моделі, яка використовується для визначення величин небезпечних для довкілля чинників залізничних аварійних ситуацій з отруйними легкозаймистими речовинами є відсутність можливості визначення параметрів забруднення атмосфери в результаті викиду таких речовин, а також обмеження на величину швидкості вітру ( $U_v \leq 1$  м/с).

Нині є велика кількість методів і створених на їхніх основах програмних комплексів, які дозволяють моделювати розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері.

Однією з таких моделей є модель CALPUFF, яка прийнята Агенством з охорони довкілля США, визнана за кращу перед аналогічними моделями для оцінювання переносу забруднювачів та їхнього впливу на довкілля, й є добре верифікованою. Тому для моделювання розповсюдження пари бензину у безвітряних умовах, які були задані у прикладі, що розглядається, й використано цей метод.

Для моделювання розповсюдження пари бензину у безвітряних умовах використана стандартна методика лагранжево-ейлерових моделей атмосферного переміщення небезпечних речовин, які у світовій літературі також називають

моделями гауссових «клубів» («puffs»). До моделей такого класу належать такі відомі моделі як DIPCOT і RIMPUFF, що є складовими системи Євросоюзу з ядерного аварійного реагування РОДОС, модель CALPUFF та деякі інші. Модель CALPUFF, яка прийнята Агентством з охорони довкілля США, визнана за кращу серед аналогічних моделей для оцінювання переносу забруднювачів та їхнього впливу на довкілля, вона є добре верифікованою. Розрахунок тривалого викиду здійснено шляхом розрахунків послідовності миттєвих викидів – так званих лагранжево-ейлерових частинок, центри мас яких рухаються за вітром. Відмінність лагранжево-ейлерових частинок від звичайних лагранжевих частинок нескінченно малого розміру є те, що у даному випадку частинки характеризуються розмірами та розподілом концентрації у частинці. У системі координат, пов'язаній з центром мас, поле концентрації у кожній частинці розподілено у відповідності до поля концентрації миттєвого викиду, яке розраховується за гауссовою формулою.

Таким чином концентрація  $C$  речовини у точці  $(x,y,z)$  у момент часу  $t$  обчислюється як сума внесків усіх частинок:

$$C(x,y,z,t) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2}} \sum_{p=1}^N \frac{q_p \tau \cdot H(t - \tau \cdot p)}{\sigma_{xp} \sigma_{yp} \sigma_{zp}} \times \exp \left[ -\frac{(x_p - x)^2}{2\sigma_{xp}^2} \right] \times \exp \left[ -\frac{(y_p - y)^2}{2\sigma_{yp}^2} \right] \times \left\{ \exp \left[ -\frac{(z_p - z)^2}{2\sigma_{zp}^2} \right] + \exp \left[ -\frac{(z_p + z)^2}{2\sigma_{zp}^2} \right] \right\}, \quad (2.52)$$

де використана Декартова система координат: вісь  $z$  спрямована вертикально вгору, рівень  $z = 0$  співпадає з рівнем поверхні Землі;  $\tau$  - тривалість інтервалу часу;  $p\tau$  - момент появи  $p$ -ї частинки  $H(t-p\tau)$  - функція Хевісайда, за рахунок використання якої у розрахунку враховується вплив тільки тих частинок, що встигли з'явитися до моменту часу  $t$ ;  $N$ - сумарна кількість частинок, що встигла з'явитись до часу  $t$ ,  $q_p$ - середня потужність викиду за час  $\tau$ ;  $\sigma_{xp}, \sigma_{yp}$  - параметри, які характеризують розподіл речовини у частинці по горизонталі та вертикалі. У формулі (2.52) поверхня Землі вважається пласкою і не враховує вплив кінцевої глибини проміжного шару хмари, що припустимо при розрахунку розповсюдження на відстані меншої за характерні розміри такої глибини, тобто до 2-х км [203].

Також зроблене стандартне припущення про повне відбиття хмари від поверхні Землі.

Для  $\sigma_{xp}$ ,  $\sigma_{zp}$  використовувались співвідношення McElroy & Pooler [203] з моделі CALPUFF, які придатні для використання у тому числі й в умовах міської забудови. Оскільки розрахунки проводились для випадку умов нейтральної стратифікації (категорія стійкості C), наведемо відповідні співвідношення для даної категорії стійкості:

$$\begin{aligned}\sigma_{xp} &= \sigma_{x0} + 0,22u_0t(1+u_0t)^{-1/2} \\ \sigma_{zp} &= \sigma_{z0} + 0,24u_0t\end{aligned}\quad (2.53)$$

де  $l_p = \sqrt{x_p^2 + y_p^2}$  - шлях, яка пройшла частинка, а  $\sigma_{x0}$ ,  $\sigma_{z0}$  описують початкову дисперсію хмари, яка щодо горизонтального розміру у розрахунках покладалася рівною характерному середньому розміру розливу ( $\sigma_{x0} = 10$  м), а вертикальний початковий розмір покладалася рівним  $\sigma_{z0} = 1$  м.

Зрозуміло, що для розрахунку у штильових умовах  $l_p = 0$ , а координати центрів мас частинок не змінюються і співпадають з координатами центра джерела:  $x_p = x_s = const$ . Тоді для врахування того, що навіть у таких умовах хмара підлягає дії турбулентної дифузії (в атмосфері завжди є пориви вітру), формула (2.53) переводиться у часову залежність шляхом введення характерної швидкості поривів вітру  $u_0$ , яке коливається від 0,5 до 1,0 м/с. Тоді формули (2.53) можна переписати у вигляді наступної часової залежності:

$$\begin{aligned}\sigma_{xp} &= \sigma_{x0} + 0,22u_0t(1+u_0t)^{-1/2} \\ \sigma_{zp} &= \sigma_{z0} + 0,24u_0t\end{aligned}\quad (2.54)$$

У розрахунках використовувалось значення  $u_0 = 0,5$  м/с.

Описана вище методика моделі CALPUFF широко використовується за кордоном, зокрема на даних натурних вимірювань під час реальних викидів забруднюючих речовин [76–78].

У розрахунках нехтувалося ефектами "важкого газу". Виходячи з положень теорії турбулентної дисперсії "важких газів", даним ефектом можна нехтувати якщо значення параметра Бріттера II задовольняє умові:

$$\Pi = \frac{1}{u_0} \left( \frac{g}{D_0} \left( \frac{\rho_g - \rho_a}{\rho_a} \right) \left( \frac{Q}{\rho_g} \right) \right)^{1/3} \leq 0,15. \quad (2.55)$$

Для обраних параметрів ( $u_0 = 0,5$  м/с, інтенсивність викиду  $Q = 0,08$  кг/с, діаметр розливу  $D_0=10$  м, початкова густина газу  $\rho_{g0} = 1,2\rho_a$ , густина атмосферного повітря  $\rho_a = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>) отримаємо значення  $\Pi_0 \approx 0,4$ . Отже, на початковій стадії (близько до джерела), ефекти важкого газу за даним сценарієм важливі.

Але при розповсюдженні газ розбавляється оточуючим повітрям, і вже на відстані  $r_1 = 10$  м від джерела розливу початкова концентрація речовини зменшується у 10 разів. Це відбувається за рахунок гравітаційного руху «важкого газу», який генерує інтенсивне початкове перемішування.

Тоді густина газової суміші буде значно меншою:

$$\rho_g 0,9\rho_a + 0,1\rho_{g0} = 0,9\rho_a + 0,1 \cdot 0,2\rho_a = 0,02\rho_a. \quad (2.56)$$

Відповідне значення параметра  $\Pi$  стає:

$$\Pi = \frac{1}{u_0} \left( \frac{0,02g}{D_0 + 2r_1} \left( \frac{Q}{\rho_{g0}} \right) \right)^{1/3} \approx 0,14, \quad (2.57)$$

що дозволяє для даного сценарію нехтувати ефектами «важкого газу» на відстанях понад 10 м від джерела газу.

У результаті проведених розрахунків отримані залежності величини концентрації пари бензину ( $C$ , мг/м<sup>3</sup>) на різних відстанях ( $10\text{м} < r < 1000\text{м}$ ) через кожні 10 м від аварійного отвору при певних значеннях часу  $t$  від початку витoku кожні 10 хв. й до 24 год.

Це дасть змогу встановити рівень небезпеки для працівників залізниці у парку станції з аварійною цистерною і пасажирів на перонах вокзального комплексу. Отримані дані дозволять керівнику ліквідації аварії визначити засоби індивідуального захисту для працівників залізниці і аварійних підрозділів Державної служби з надзвичайних ситуацій, які беруть участь у ліквідуванні наслідків аварійної ситуації, час початку і тривалість аварійно-відновних робіт щодо евакуації персоналу і пасажирів, надання їм, при необхідності, першої долікарської та медичної допомоги.

Розглянемо залежність концентрації ( $C$ ,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ) пари бензину у доквіллі від часу  $t$  на відстанях  $R_1=10\text{м}$  (радіус розлиття речовини) і  $R_2=100\text{м}$  (межа вибухонебезпечної зони). Дані щодо значень концентрацій на вказаних відстанях при різних значеннях часу надані у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9

**Значення концентрацій пари бензину ( $C$ ,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ) у доквіллі на відстанях  
 $R_1=10\text{м}$ ,  $R_2=100\text{м}$**

$t, \text{сек} / \text{хв}$	600	1200	1800	2400	3000	4200	14400	15000	15600	16800
$R, \text{м}$	10	20	30	40	50	70	240	250	260	280
10	333	785	1240	1690	2260	1140	1130	6,29	2,7	0,982
100	0,51	2,93	6,24	9,88	14,7	11,1	10,2	6,29	2,7	0,982

Графіки залежності величини концентрації пари бензину у доквіллі на відстанях  $R_1=10\text{м}$ ,  $R_2=100\text{м}$  від часу у логарифмічному масштабі представлені на рис. 2.17.

Графіки (рис. 2.17) свідчать про те, що за період з 10-ої та 50-ту хвилину значення концентрації збільшуються з  $333\text{мг}/\text{м}^3$  до  $2260\text{мг}/\text{м}^3$  для відстані  $R_1=10\text{м}$ , й від  $0,51\text{мг}/\text{м}^3$  до  $14,7\text{мг}/\text{м}^3$  для відстані  $R_2=100\text{м}$ . За період з 50-ої хвилини, на якій здійснилося повне витікання речовини з цистерни, й до 70-ї хвилини значення концентрації знизилося від  $2260\text{мг}/\text{м}^3$  до  $1140\text{мг}/\text{м}^3$  (відстань  $R_1=10\text{м}$ ), за цей же період часу концентрація пари на відстані  $R_2=100\text{м}$  знизилася від  $14,7\text{мг}/\text{м}^3$  до  $11,2\text{мг}/\text{м}^3$ . Більш стрімке падіння концентрації відстані  $R_1=10\text{м}$  у порівнянні із зниженням концентрації на відстані  $R_2=100\text{м}$  можна пояснити тим, що швидкість падіння концентрації тим більша, чим менша відстань до джерела викиду. На значних відстанях від джерела, деякий час після припинення його дії, падіння концентрації у повітрі сповільнюється впливом хмари, яка встигла утворитися до припинення дії джерела. При цьому розмір хмари, яка впливає на концентрацію у даній точці після припинення дії джерела, визначається відстанню від даної точки до джерела. Тому для точок, що знаходяться поблизу джерела, лише незначна частина хмари впливає на величини концентрації, що призводить до надзвичайно швидкого падіння рівня забруднення. У точках, які знаходяться на відстані,



швидкість падіння забруднення сповільнюється, і може навіть зростати деякий час після припинення дії джерела.

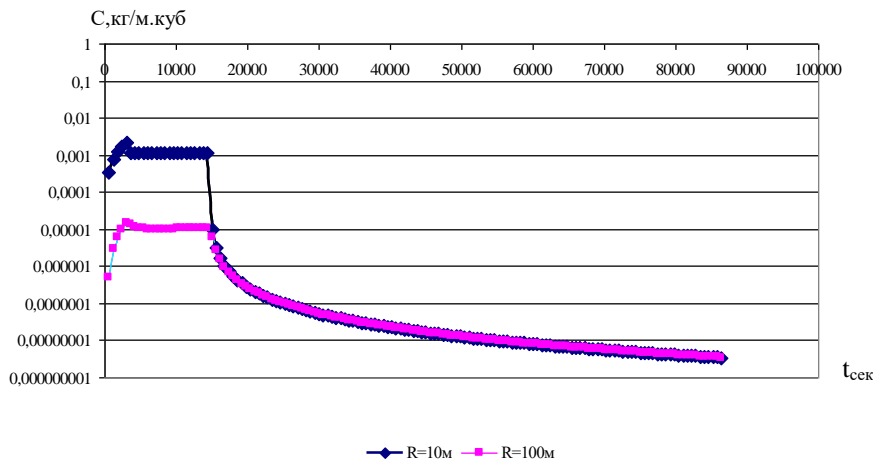


Рис. 2.17. Графіки залежності величини пари бензину на відстанях  $R_1=10\text{м}$ ,  $R_2=100\text{м}$  від часу

З 70-ої хвилини і до повного випаровування рідини з проливу концентрація пари змінюється з  $1140 \text{ мг/м}^3$  до  $1130 \text{ мг/м}^3$  й від  $11,1 \text{ мг/м}^3$  до  $10,2 \text{ мг/м}^3$  на відстанях  $R_1=10\text{м}$ ,  $R_2=100\text{м}$  відповідно. Починаючи з 250-ї хвилини середнє значення пари в атмосфері швидко вирівнюється і стає однаковою на усіх відстанях, що розглядаються.

Розглянемо залежність концентрації пари бензину у доквіллі на різних відстанях від джерела викиду при певних значеннях часу. Дані щодо залежності концентрації пари бензину у доквіллі від джерела викину при різних значеннях часу подані у таблиці 2.10.

Таблиця 2.10.

**Дані щодо залежності концентрації пари бензину у доквіллі на різних відстанях від джерела викину при певних значеннях часу**

$t, \text{хв}$ $R, \text{м}$	10	50	60	240
0	0,000466780529	0,003150208387	0,001585422472	0,001578912154
10	0,000333658701	0,002262158959	0,001141345457	0,001134878023
20	0,000136808623	0,000948176872	0,000484198992	0,000477858485
30	0,000046256980	0,000341950863	0,000180831925	0,000174697348
40	0,000017829665	0,000149243363	0,000084133004	0,000078275352

## Продовження табл. 2.10

50	0,000008692812	0,000084783761	0,000051477441	0,000045957293
60	0,000004618526	0,000053993564	0,000035589182	0,000030454988
70	0,000002569391	0,000036847873	0,000026471010	0,000021758143
80	0,000001470896	0,000026339730	0,000020635817	0,000016366396
90	0,000000858340	0,000019457544	0,000016594270	0,000012777689
100	0,000000510490	0,000014753325	0,000013637910	0,000010271963
110	0,000000307183	0,000011410006	0,000011371986	0,000008444430
120	0,000000186485	0,000008973342	0,000009580834	0,000007071237

Графіки залежності концентрації пари бензину у довкіллі на різних відстанях від джерела викиду при різних значеннях часу наведені на рис. 2.18.

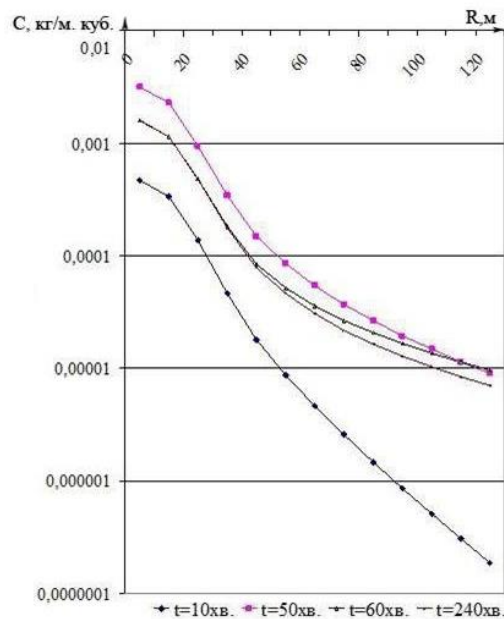


Рис. 2.18. Графіки залежності концентрації парів бензину на різних відстанях у визначені моменти часу

З рис. 2.18 можна зробити висновки про те, що на 10-ту хвилину концентрація парів зменшується від 467 мг/м<sup>3</sup> до 137 мг/м<sup>3</sup> на відстані до 20м. У цей період перевищення концентрації у порівнянні з ГДК=100 мг/м<sup>3</sup> дорівнює від 4,67 разів до 1,37 разів.

На 50-й хвилині рівень концентрації перевищує ГДУ у 31,5 рази на місці викиду і 1,49 рази на відстані 40м. Концентрація стає нижчою за ГДК на відстані 50м.

На 60-й хвилині рівень концентрації парів з проливу рідини перевищує ГДК від 15,87 разів до 1,81 рази (30м). На відстані 40м концентрація стає меншою за ГДК ( $C=84,1 \text{ мг/м}^3$ ).

На 240 хвилині значення концентрацій на відстані до 40м практично співпадає із значенням концентрації для 60-ї хвилини, після чого здійснюється її різке падіння.

При значеннях концентрацій парів більших за ГДК, ліквідування наслідків аварійних ситуацій повинно здійснюватися лише у засобах індивідуального захисту, визначених відповідною аварійною карткою.

Багаторічне використання розглянутої вище структурно-аналітичної моделі дозволяє відзначити, що за її допомогою можливо визначати основні параметри залізничних аварійних ситуацій з легкозаймистими вантажами, що не є отруйними.

Для оцінювання небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій другого і третього класів безпеки необхідно створити в Україні методику, яка б дозволяла:

*враховувати:* особливості залізничного транспорту (одночасно наявність у парках станції великої кількості рухомого складу з небезпечними вантажами, які мають різноманітні фізико-хімічні, пожежовибухові та аварійно хімічно небезпечні властивості); стан стійкості атмосфери, температури повітря і ґрунту, рельєф місцевості та його забудову, наявність і розміри водойм і селітебної зони;

*визначати:* кількість газу і пари легкозаймистих речовин у довкіллі; просторово-часове поле концентрації отруйних речовин в атмосфері; розміри зон хімічного забруднення; розміри зон дрейфу пожежовуховонебезпечних хмар, в межах який зберігається здатність до займання, розміри зон розповсюдження пожежі (пожежі – спалаху) або детонації, появи горілих продуктів, а також часу підходу зон до визначених об'єктів; кількість отруйних речовин у хмарах, обмежених концентраційними межами запалення; значення виражальних чинників вибуху; наслідків впливу ударно-хвильових навантажень на людей і об'єкти залізничної інфраструктури.

Створені на базі такого методу програмні комплекси для реалізації відповідних математичних моделей повинні мати зручний інтерфейс для роботи користувачів середньої кваліфікації у стресових умовах аварійних ситуацій.

## **Висновки до розділу 2**

У другому розділі дисертаційної роботи на підставі аналізу існуючої системи залізничних перевезень небезпечних вантажів, керівних документів щодо запобігання і реагування на залізничні аварійні ситуації техногенного та природного характеру, заходів безпеки та порядку ліквідації залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, норм та вимог, що забезпечують безпеку перевезення таких вантажів, а також на підставі аналізу існуючих математичних моделей прогнозування розвитку небезпечних чинників таких ситуацій отримано такі результати:

1. На основі статистичних даних Укрзалізниці результатів вантажних перевезень небезпечних вантажів залізничним транспортом України проаналізована динаміка транспортування таких вантажів за період 2006р.-2017р. Встановлена відносна кількість небезпечних вантажів різних класів безпеки транспортування яких здійснювалось за цей період.

2. Визначено, на підставі основних і вибухо-пожежних властивостей, відносну кількість небезпечних вантажів різних класів безпеки, яким притаманні певні види небезпек для рухомого складу, об'єктів залізничної інфраструктури і людей, що утворюються у залізничних аварійних ситуаціях при взаємодії таких вантажів з повітрям, водою, кислотами, лугами, нафтопродуктами, а також під час їх нагрівання, горіння та вибуху, що дає можливість визначити негативні наслідки таких ситуацій, а відтак найбільш ефективно забезпечити пожежні та відбудовні підрозділи залізниць засобами реагування на такі ситуації.

3. Визначені основні ймовірні процеси типових сценаріїв розвитку аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, що дало можливість виявити причинно-наслідкові зв'язки розвитку процесів у цих ситуаціях з характеристиками їхніх наслідків та вперше створити теоретичну основу побудови бази знань систем

підтримки прийняття рішень (СППР) керівників пунктів управління ліквідацією наслідків аварійних ситуацій.

4. Розроблені структурно-аналітичні моделі визначення величин небезпечних для довкілля і людини чинників залізничних аварійних ситуацій при транспортуванні газів і легкозаймистих речовин, що не є отруйними.

5. Проаналізовані існуючі математичні моделі прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері та основні фізико-хімічні процеси горіння і вибуху небезпечних вантажів різних класів небезпеки щодо створення програмного комплексу прогнозування розвитку небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій для СППР керівника ліквідації аварії. Проведеним модельним експериментом розрахунку небезпечним для довкілля і людини чинників залізничної аварійної ситуації, пов'язаної з витіканням автомобільного бензину, встановлено необхідність створення в Україні методи з відповідними математичними моделями визначення небезпечних чинників таких ситуацій, та на її основі, програмних комплексів для реалізації у СППР пунктів управління ліквідації наслідків таких ситуацій.

### РОЗДІЛ 3

## НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ РЕАГУВАННЯМ НА ЗАЛІЗНИЧНІ АВАРІЙНІ СИТУАЦІЇ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ

Ліквідація наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами є взаємопов'язаними процесами, що потребують проведення комплексу заходів, спрямованих на запобігання загрозі людям, захист природного середовища, збереження вантажу, рухомого складу, об'єктів залізничної інфраструктури, відновлення руху поїздів і маневрової роботи у можливо короткий термін. При цьому важливе значення має й раціональне використання різноманітних ресурсів, необхідних для виконання цих заходів. Отже, збалансовані терміни відновлення руху поїздів (працездатності транспортної системи) і необхідні для цього ресурси є критеріями ефективності системи ліквідування наслідків залізничної аварійної ситуації при перевезенні небезпечних вантажів.

### 3.1. Особливості реагування на залізничні аварійні ситуації

Реагування на залізничну аварійну ситуацію розпочинається з отримання інформації, як правило, від машиніста локомотива чи його помічника про характер такої ситуації, наявність потерпілих, найменування вантажу, його кількість тощо [9].

Згідно із схемою оповіщення, яка встановлена в Укрзалізниці, причетні посадові особи уточнюють дані про транспортну подію і надають відповідну інформацію керівному складу дирекцій залізниці, залізниць та Укрзалізниці.

Для оперативного керівництва реагуванням на аварійну ситуацію в публічному акціонерному товаристві «Українська залізниця», регіональних філіях залізниць та дирекціях залізничних перевезень створюються оперативні штаби [2, 57].

Слід зазначити, що чинними нормативними документами передбачено лише порядок оповіщення про настання залізничної аварійної ситуації, але не визначено

порядок реагування на такі ситуації. Таке положення нібито можна пояснити тим, що подібні ситуації є дуже різноманітними як за характером, масштабом, так і способами реагування. Однак тим більш нагальною є необхідність певної класифікації, типізації способів реагування на них (оскільки типізацію самих ситуацій вже виконано у попередньому розділі). У зв'язку з викладеним запропоновано концептуальну схему організації реагування на залізничну аварійну ситуацію (рис. 3.1) [16].

Багаторічні дослідження роботи оперативних штабів регіональних філій залізниць і дирекцій залізничних перевезень доводять, що ефективність роботи такого органу управління цілком залежить від рівня підготовки його працівників, наявності необхідних засобів зв'язку та обчислювальної техніки з відповідним математичним і програмним забезпеченням.

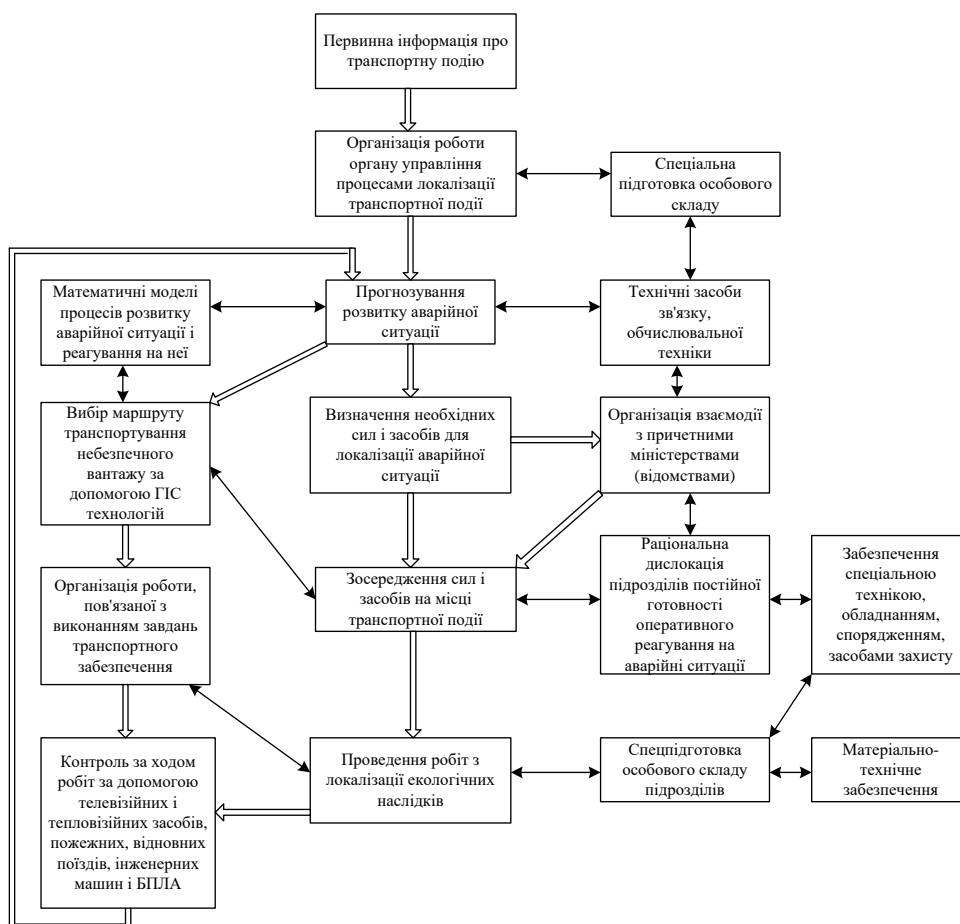


Рис. 3.1. Концептуальна модель процесів та чинників ефективного реагування на залізничну аварійну ситуацію

На підставі здійсненого за допомогою цього математичного і програмного забезпечення прогнозу розвитку залізничної аварійної ситуації визначається, зокрема, оптимальний маршрут прямування поїздів, особливо з небезпечними вантажами, та необхідна кількість сил і засобів для проведення робіт, а також, за необхідності, організується взаємодія з підрозділами причетних відомств.

Очевидно, що маршрут прямування і технології перевезення небезпечних вантажів обираються такі, які б зводили до мінімуму час знаходження небезпечного вантажу у зоні можливого ураження.

Після визначення переліку необхідних для проведення робіт локалізаційних підрозділів, здійснюється їх зосередження на місці виникнення транспортної події.

Швидкість зосередження сил і засобів багато в чому залежить від оптимальності дислокації підрозділів постійної готовності оперативного реагування на залізничні аварійні ситуації на мережі залізничного транспорту, а також забезпечення таких підрозділів ефективною спеціальною технікою, обладнанням, спорядженням і засобами захисту.

Готовність підрозділів оперативного реагування до виконання завдань за призначенням визначається справністю техніки та рівнем спеціальної підготовки особового складу, а також відповідним матеріально-технічним забезпеченням.

Проведення робіт з локалізації залізничних аварійних ситуацій та ліквідації їх наслідків передбачає моніторинг обстановки, яка склалася, вибір ефективного способу дії з урахуванням усіх застережень та виконанням встановлених заходів безпеки.

На успішність проведення робіт впливає також укомплектованість підрозділів особовим складом і технікою.

Розглянемо запропоновану схему управління ліквідацією наслідків аварійної ситуації з небезпечними вантажами (рис. 3.2), яку можна вважати універсальною в тому сенсі, що вона враховує попередню типізацію залізничних аварійних ситуацій та способів реагування на них.



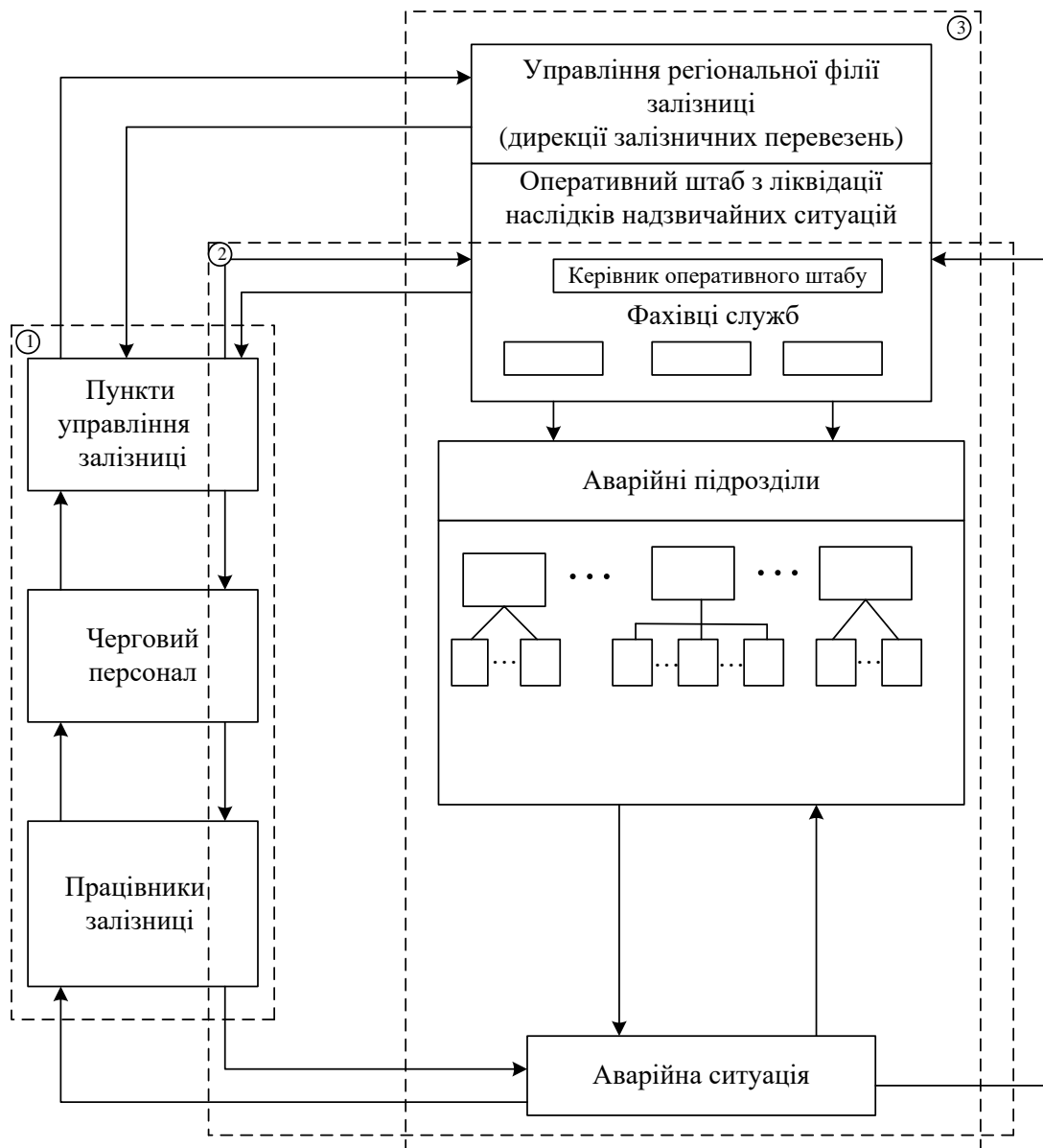


Рис. 3.2. Схема управління ліквідацією наслідків залізничної аварійної ситуації

Особливістю збирання інформації та оцінювання обстановки, яка склалася на місці виникнення аварійної ситуації, є те, що ці процеси здійснюються в умовах дефіциту часу, безперервного зростання негативного впливу на природне середовище і збитків від порушення графіка руху поїздів, наявності загрози людям, недостатньої інформації про стани вантажу, рухомого складу і об'єктів інфраструктури залізниці тощо.

Для ефективного розв'язування завдань, пов'язаних з виробленням раціонального та своєчасного рішення керівника оперативного штабу, потрібно

мати чітко побудовану систему управління, організувати на науковій основі роботу оперативного штабу з використанням сучасних інформаційних технологій, серед них й інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Робота оперативного штабу носить багат шаровий характер, при якому слід враховувати матеріально-технічні, людські та інші ресурси, застосовувати засоби зв'язку, оповіщення та інформаційного забезпечення.

До складу оперативного штабу входять фахівці різних служб залізниці, представники територіальних служб з питань аварійних ситуацій, цивільного захисту, охорони здоров'я, представники підприємств, міністерств і відомств, сили і засоби яких залучаються до вжиття заходів з ліквідації наслідків аварійної ситуації.

Кожен з цих фахівців та представників має свої окремі завдання у межах загального завдання, тому перед керівником оперативного штабу виникає проблема координації роботи штабу за рахунок узгодження інтересів сторін. Ця проблема є надзвичайно гострою, аж до конфліктних ситуацій в практичному аспекті, але вона має й глибокий та досі недостатньо опрацьований науково-методичний аспект.

З науково-методичної точки зору, під способом координації мають на увазі правило, яке регламентує взаємовідносини між координатором і виконавцями. Виділяють п'ять основних способів координаційного керування [34, 37]:

- 1) координація шляхом прогнозування суперечностей;
- 2) координація шляхом прямого регулювання суперечних взаємовідносин;
- 3) координація шляхом розв'язування суперечностей;
- 4) координація шляхом наділення відповідальністю;
- 5) координація шляхом створення коаліцій.

У екстремальних ситуаціях, як правило, використовується координація шляхом прямого регулювання.

У межах кожного способу координації можливі специфічні модифікації, які розрізняються не тільки за формальними, а й за змістовими ознаками. Зокрема виділяють цільову, ресурсну, часову, просторову координації, а також координацію на об'єктах впливу, та координацію дій, які при цьому виконуються.

Комбінуючись, ці модифікації утворюють практично безліч можливих варіантів здійснення координації.

Дослідженню процесів прийняття рішень у екстремальних, суперечливих (конфліктних) ситуаціях присвячено багато робіт [12, 28, 34, 38, 39, 142 – 151]. Усі автори погоджуються з тим, що процес вироблення і прийняття рішення людиною складається з кількох етапів. Перший етап, етап факторизації, на якому виділяються головні, визначальні ознаки ситуації (чинники). Брак таких чинників може надолужуватися досвідом особи, яка приймає рішення. На другому етапі здійснюється розпізнавання ситуації шляхом співставлення чинників між собою й з чинниками тих ситуацій, які були відомі раніше, або за рахунок перетворення нових чинників у вид, що допускає порівняння. Третій етап пов'язаний з прогнозуванням ситуації і виробленням варіантів рішення на підставі передбачення ходу зміни чинників. Четвертий етап полягає у виробленні та оцінюванні варіантів рішення на підставі концептуальних критеріїв. Заключний етап – етап прийняття рішення, вибір одного варіанта з кількох конкуруючих, що найліпше за інших задовольняє прийнятим критеріям.

Усі ці етапи повторюються багаторазово, заново виділяються фактори, по-різному здійснюється їх комбінації, виробляються нові та відкидаються старі варіанти рішення, тобто *процес вироблення рішення носить ітеративний характер.*

Ситуації, які виникають у результаті настання залізничних аварійних ситуацій, характерні тим, що у них не тільки не є можливим коректно визначити поняття оптимальності, але навіть й на вербальному рівні задати достатньо повну модель події. Насправді, для будь-якої нової системної проблеми притаманним є відсутність будь-якої моделі, що встановлює вичерпним чином причинно-наслідкові зв'язки між її компонентами, а про існування критеріїв оптимальності можна казати лише після розв'язання проблеми.

Умовність оптимального варіанта розв'язування проблеми, пов'язаної з ліквідацією залізничної аварійної ситуації та ліквідації її наслідків, як й будь-якої іншої значущої практичної проблеми, є загальновизнаним фактом. Це обумовлене тим, що завжди можна знайти обставини, які не були враховані під час його

обґрунтування, й тим самим продемонструвати умовність такої оптимальності. Тобто зробити висновок про те, що даний варіант можна визначити оптимальним за умови виконання низки обмежень і припущень, які дозволили звести реальну проблему до оптимізаційної математичної задачі.

Звичайно, можна модифікувати метод та зняти ряд обмежень і припущень, але низку тоді виникнуть нові, не враховані, обставини. Такий процес можна повторювати необмежено довго, кожний раз демонструючи умовну оптимальність. Слід зазначити, що у практичній діяльності умовна оптимальність виявляється у вигляді хибних рішень і дій.

Традиційно вважалося, що усі негаразди оптимального підходу до розв'язування практичних проблем пов'язані з недостатнім розвитком математичних методів оптимізації, або обумовлені неадекватністю математичної моделі об'єкта дослідження. Але виявляється, що справа не у математиці та не у способах моделювання, а у принципі: у людській діяльності не існує оптимальних (абсолютно правильних) рішень, й навпаки – не існує нерозв'язних проблем (абсолютно тупикових ситуацій).

Теорія системного аналізу виходить з відсутності оптимального, абсолютно найкращого варіанта розв'язування проблем будь-якої природи. При цьому, замість практично безплідних спроб знайти деякий глобальний оптимум, пропонується інтерактивний пошук реально прийняттого (компромісного) варіанта розв'язання проблеми, коли бажаним можна поступитися заради можливого, а межі можливого можуть бути суттєво розширені за рахунок прагнення досягти бажане.

Тим самим передбачається використання ситуативних критеріїв переваг, тобто критеріїв, які не є вихідними настановами, а виробляються у процесі розв'язування проблеми.

Крім цього, у рамках системного аналізу встановлюється пріоритет суті проблеми над методами математичної оптимізації, які повинні застосовуватися як робочій інструмент для розв'язування окремих, добре структурованих задач [116, 149 – 154, 155, 156].

Світовий досвід розв'язування складних проблем людиною свідчить, що вона здатна приймати досить складні та відповідальні рішення ще й керуючись інтуїцією, тобто не використовуючи логічні та інші обґрунтування. У цьому разі теорія системного аналізу може бути корисною як стимулятор інтуїтивного акту і постачальник необхідних для цього вихідних даних.

Залежно від механізмів, які використовуються для реалізації управління ліквідацією наслідків небезпечної аварійної ситуації, розрізняють такі схеми вироблення варіантів рішення [12, 34, 36, 40]:

– перевірка придатності одного з рішень, яке приймається у типовій ситуації. Не можна ігнорувати того факту, що у типових ситуаціях типове рішення є єдино вірним, принаймні у перший момент.

З огляду на казуїстичну теорію цінності, – цінність рішення не залежить від часу у тому сенсі, що при розгляді ситуацій, які були у минулому, існує ситуація ідентична з поточною, – рішення, що було прийняте у минулій ситуації, можна прийняти й зараз [40];

– синтез рішення із стереотипних елементів. Застосування цієї схеми базується на розумінні того, що якою б не була складною нова ситуація, вона завжди має деякі складові частини відомих проблем, бо іноді новизна міститься в об'єднанні старих проблем. Компоненти рішень, з яких комбінується нове рішення, повинні бути піддані перевірці на самостійність: необхідно встановити, як діє кожне з них окремо й чого їм не вистачає. Доповнюючи такі компоненти елементами, взятими з інших компонент, синтезується нове рішення.

Процедура формування рішення містить первинний відбір компонент рішення, кожне з яких розв'язує частину завдань проблеми.

Підготовчий етап відбору компонент закінчується формуванням доповнюючих та несумісних груп компонент. Особливу увагу заслуговують компоненти, на підставі яких можливе висунення раціональної ідеї, для чого розглядаються суть та причини несумісності, проводиться аналіз часу та обстановки, знаходяться фактори, що викликають несумісність, і здійснюється їхнє усунення. Потрібно звернути увагу на обставини та умови, які дозволяють усунути

несумісність, оцінити їхню роль і значення у системній моделі ситуації, визначити область взаємного підсилення компонент, стимулювання корисних процесів і відібрати комбінації, які обіцяють успіх;

– пошук рішення з іншої сфери, – суміжної або віддаленої. Основою пошуку є асоціація. Суть асоціативного мислення полягає у виявленні подібності, аналогії, близькості (толерантності) якій-небудь ознаці (групі ознак) у процесах (подіях), які у конкретному прояві різні. Процес утворення асоціацій складається з виділення та зіставлення суттєвих ознак. За наявності подібності робиться оцінювання по групі ознак, які відображають певну грань сутності різнорідних об'єктів чи явищ. Після чого використовується подібність ознак для відбору чинників, які можуть бути покладені в основу рішення. Іноді достатньо знайти одну характерну ознаку, щоб виникла асоціація;

– синтез рішення з елементів, кожний з яких побудований за асоціацією. Зміст способу полягає у виявленні певної ознаки розрізнених явищ (об'єктів, процесів), що містили б елементи, які давали б матеріал для рішення, причому кожне явище мало б подібність з ситуацією по одній ознаці (групі ознак);

– еволюційний спосіб вироблення рішення. При такому способі базовий варіант рішення близької більш простої проблеми, яка має інше діалектичне протиріччя, використовується один з вищенаведених способів. Удосконалення базового варіанта здійснюється шляхом його поступової (еволюційної) або стрибкоподібної (мутаційної) зміни: нарощування додатковими елементами, відсікання непотрібних або шкідливих елементів, розвитку перспективних чинників, у основі яких лежать асоціації. В результаті цілеспрямованих еволюцій та мутацій є можливість дійти до гіпотези, яка розв'язує проблему;

– пошук оригінального, принципово нового рішення, заснованого на новій ідеї.

Наведений вище короткий огляд підходів [12, 34, 36, 40] до опрацювання управлінського рішення свідчить, що в конкретних ситуаціях ліквідуванням наслідків залізничних аварійних ситуацій не може бути раз і назавжди визначених

критеріїв оптимальності рішення, а можуть бути лише ситуативні, якими й слід керуватися особі, що приймає рішення.

Практично це відбувається таким чином: на підставі отриманої інформації оперативним штабом здійснюється оцінювання обстановки, що склалася, прогнозується найбільш імовірний стан розвитку такої ситуації, її фінальний стан, межі небезпечних зон, виявляються об'єкти, що потрапили у такі зони, приймається рішення на вжиття заходів, необхідних для ліквідування залізничної аварійної ситуації [34, 36, 55, 60].

Рішення керівника оперативного штабу є результатом його складної розумової діяльності та волі, наслідком розміркувань, пошуків, здогадок, що ґрунтується на глибоких знаннях, передбаченні, досвіді, інтуїції та розрахунках.

Таке рішення є підґрунтям для планування заходів щодо ліквідування наслідків залізничної аварійної ситуації, вжиття заходів щодо створення організаційної структури з ліквідаційних підрозділів та відповідних органів управління з метою ефективного виконання передбачених прийнятим рішенням завдань.

Велике значення для складання ефективного плану реагування на залізничну аварійну ситуацію, особливо з небезпечними вантажами відіграє прогнозування її подальшого розвитку. Для такого прогнозування застосовуються різні методи, які, зокрема, дають можливість визначити межі небезпечних зон дії чинників аварійної ситуації.

На залізничному транспорті розроблені правила безпеки та порядок ліквідації аварійних ситуацій, які містять рекомендації щодо ведення аварійно-відновних робіт, особливостей ліквідації наслідків аварійних ситуацій залежно від класу небезпечного вантажу, при виникненні радіоактивного забруднення, при гасінні пожеж, локалізації забруднень, нейтралізації і дегазації небезпечних вантажів, а також вжитті заходів медичного захисту та забезпеченні санітарного та епідемічного благополуччя [57].

З метою складання плану реагування на аварійну ситуацію з небезпечним вантажем, що не горить, потрібно у небезпечних зонах *виявити* [57]:

– об'єкти і рухомий склад з людьми;

– потенційно небезпечні об'єкти та рухомий склад з небезпечними вантажами;

– ступінь ушкодження аварійного рухомого складу і об'єктів інфраструктури та обсяг необхідних робіт для проведення аварійно-відновлювальних робіт.

На підставі отриманих даних:

*визначити:*

- необхідну кількість сил і засобів для ліквідації наслідків аварійної ситуації, порядок їх використання та надання інформації;

- порядок оповіщення та евакуації людей з об'єктів, які знаходяться у небезпечних зонах;

- порядок евакуації рухомого складу з людьми та небезпечними вантажами;

- схему відновлювальних робіт й установа черговості їхнього виконання;

- обсяг аварійно-відбудовних робіт та послідовність їх здійснення;

- порядок матеріально-технічного забезпечення, забезпечення залучених осіб засобами індивідуального захисту;

- порядок забезпечення підрозділів засобами нейтралізації, дезактивації і дегазації;

*організувати:*

- проведення санітарно-хімічної (у разі потреби – біологічної) розвідки на місці транспортної події та території у межах небезпечних зон;

- виявлення людей, що зазнали дії отруйних (токсичних), їдких і радіоактивних речовин, біологічно небезпечних препаратів, надання їм медичної допомоги в необхідному обсязі;

- проведення динамічного контролю вмісту небезпечних речовин у довкіллі;

- інженерну розвідку місця транспортної події;

- проведення аварійно-відбудовних робіт;

- контроль за повнотою нейтралізації (дезактивації, дегазації, знезараження) місцевості, об'єктів довкілля, техніки, транспорту, спецодягу;

- медичне забезпечення працюючих;

- вжиття необхідних заходів безпеки;

- вжиття необхідних заходів пожежної безпеки;



- охорону й огороження місць роботи;
- розроблення оперативного плану аварійно-відновлювальних робіт;
- узгодження окремих планів реагування на аварійну ситуацію служб залізниці (дільниць залізниці);
- оцінювання результатів виконання заходів плану з урахуванням шкоди, завданої довкіллю.

У разі виникнення залізничної аварійної ситуації, яка супроводжується пожежею небезпечного вантажу, додатково керівником гасіння пожежі *виявляється* [57]:

- наявність загрози людям, потенційно небезпечним об'єктам і рухомому складу з небезпечним вантажем від небезпечних чинників пожежі;
- розмір і місце, шляхи розповсюдження вогню;
- можливі шляхи та напрямки введення сил і засобів з урахуванням руху поїздів і необхідності виведення рухомого складу, що горить, у безпечне місце;
- властивості речовин, що горять, їх пожежо- та вибухонебезпеку, можливість руйнування конструкцій об'єктів і руйнування рухомого складу;
- рухомий склад, який потребує евакуації;
- найближчі джерела водопостачання та способи їх використання.

Бойові дії пожежних підрозділів на пожежах організує і керує ними керівник гасіння пожежі, який має орган управління – штаб на пожежі [3, 157 – 159].

Досвід ліквідування пожеж небезпечних вантажів свідчить про те, що для їх ліквідації залучаються декілька пожежних частин і пожежних поїздів, для керівництва якими створюється відповідна ієрархічна система управління [156 – 158].

На підставі виявлених даних, керівник гасіння пожежі розробляє план бойових дій пожежних підрозділів, який доводиться ним у вигляді наказів і розпоряджень до керівників бойових секторів і дільниць, тилу, груп газодимозахисників та інших пожежних і спеціальних підрозділів.

Докладно дії керівника гасіння пожежі на залізничному транспорті розглянуті у роботах [107,155 – 164].

У разі виникнення залізничної аварійної ситуації, що викликала радіоактивне забруднення, встановлюється наявність у складі аварійного поїзда вантажів з радіоактивними матеріалами, інформуються причетні служби і відповідні фахівці.

На підставі первинного повідомлення про аварійну ситуацію, стан метеоумов та характер місцевості *встановлюються*:

- радіаційна обстановка і межі небезпечних зон транспортної події;
- рівні радіаційного забруднення території, транспортних засобів, вантажів тощо;
- об'єкти і рухомий склад з людьми у небезпечних зонах;
- потенційно небезпечні об'єкти у різних зонах радіаційного забруднення.

На підставі отриманих даних прогнозування радіаційної обстановки *визначаються*:

- сили і засоби, що залучаються до проведення аварійно-відбудовних робіт, проведення евакуації, дезактивації, інших невідкладних робіт;
- кількість груп для проведення розвідки і маршрути їх руху;
- порядок оповіщення і заходи щодо евакуації людей, техніки і рухомого складу;
- маршрути виведення пасажирського рухомого складу з небезпечних зон;
- заходи безпеки, спрямовані на усунення можливого загоряння, вибуху, токсичного впливу інших небезпечних вантажів, що розміщені в зоні аварійної ситуації;
- заходи щодо забезпечення радіаційного дозиметричного контролю, дезактивації небезпечних зон, рухомого складу, вантажів, устаткування, спецодягу, збирання і видалення радіоактивних відходів;
- заходи щодо огороження небезпечних зон попереджувальними знаками та їх охорона;
- заходи щодо надання потерпілим необхідної медичної допомоги.

У всіх випадках виникнення аварійних ситуацій здійснюється розслідування причин і оформлення необхідних документів.

Дослідження наслідків аварійних ситуацій, які призвели до руйнування елементів транспортної інфраструктури, дозволили виявити найчастіші випадки розташування рухомого складу, що зійшов з рейок, види пошкоджень контактної

мережі, пристроїв СЦБ і зв'язку, верхньої будови колії, розробити рекомендації щодо відновлення нормальної роботи транспорту.

Зокрема, вибір варіанта постановки на рейки або збирання рухомого складу, що зійшов із рейок, а також визначення необхідних для цього технічних засобів, здійснюється залежно від характеру сходження рухомого складу, виду вантажу та його видів небезпеки, рельєфу місцевості, метеоумов, будівель і споруд, енергомереж тощо.

Проведенню відновних операцій передують обстеження ділянки на якій виникла аварійна ситуація, визначаються ушкоджені пристрої, необхідність в матеріалах, механізмах, транспортних засобах і робочій силі, а також організується телефонний і радіозв'язок з місцем відновних робіт.

Операції з ліквідування наслідків залізничної аварійної ситуації повинні бути організовані з врахуванням максимального скорочення часу перерви руху поїздів [9, 57].

За обсягами й характером завалів рухомого складу, відновлення колії, контактної мережі, засобів СЦБ і зв'язку визначається час відновлення руху. Цей час складається з ряду складових, зокрема із часу на оцінювання обстановки, що склалася на місці аварійної ситуації, вироблення рішення на проведення відновних операцій, збору і зосередження необхідних сил і засобів, ступеня спеціальної підготовки особового складу, оснащеності підрозділів технікою та її станом тощо. Тому велике значення має прийняття обґрунтованого рішення й ефективна організація проведення аварійно-рятувальних операцій та мінімізація наслідків залізничних аварійних ситуацій.

Таким чином, при організації ліквідування наслідків залізничної аварійної ситуації з небезпечними вантажами керівник оперативного штабу здійснює управління складною ієрархічною системою, яка складається з пунктів управління проведенням аварійно-відновних робіт, штабу пожежогасіння, керівників ділянок аварійно-відновних робіт, секторів і ділянок пожежогасіння, керівників робіт з локалізації забруднень, нейтралізації, дегазації, а також з відповідних підрозділів, що діють за їх функціональними призначеннями.

Зважаючи на вищевикладене, для ефективного реагування на залізничну аварійну ситуацію, на наш погляд, у першу чергу потрібно:

- оптимально розташувати підрозділи постійної готовності оперативного реагування на аварійні ситуації на мережі залізниць;

- мати систему моніторингу за розвитком залізничної аварійної ситуації з небезпечним вантажем, інтелектуальну систему підтримки прийняття рішень керівника оперативної штабу для прогнозування розвитку такої ситуації, вироблення необхідних рішень щодо ліквідації аварійної ситуації та організації перевізного процесу в нових умовах;

- організувати спеціальне навчання особового складу підрозділів постійної готовності щодо виконання завдань за призначенням, а також проводити спільні навчання з підрозділами інших міністерств і відомств;

- оснастити підрозділи постійної готовності ефективною спеціальною технікою, спорядженням, засобами захисту, а також здійснювати їх належне матеріально-технічне забезпечення.

Значну роль в успішності проведення робіт з ліквідування залізничних аварійних ситуацій відіграє вибір адекватних дій з урахуванням класу небезпечного вантажу.

Дослідження залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами свідчать, що саме на період залучення сил і засобів припадає найбільша частка збитків, бо термін часу залучення співпадає з періодом вільного розвитку, зростання площі та інших параметрів такої ситуації [163 – 167].

У зв'язку з цим виникає потреба у розв'язанні проблеми визначення успішності (ефективності) проведення локалізаційних дій аварійних підрозділів залежно від місць їх постійної дислокації та продуктивності функціонування таких сил та засобів.

Застосування інтелектуальних СППР дозволить керівнику оперативного штабу здійснювати інформаційне, технологічне, аналітичне й організаційне забезпечення ітеративного процесу аналізу ситуації, яка склалася на місці аварійної ситуації, підготовку і оцінювання варіантів рішень та вибір остаточного рішення

щодо локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків, що не можливо без відповідних математичних моделей [105, 110, 112, 146, 147, 151 – 154].

### **3.2. Математична модель реагування на аварійну ситуацію під час транспортування небезпечних вантажів**

Надійність залізничної транспортної системи під час перевезення пасажирів і вантажів слід розуміти як її здатність забезпечувати своєчасну і безпечну доставку пасажирів і вантажів до місця призначення без погіршення з вини цієї системи здоров'я пасажирів і товарних якостей вантажів.

Важливою складовою надійності є безпечність залізничної транспортної системи щодо зниження впливу небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій на здоров'я людей, транспортну роботу і довкілля за рахунок проведення скоординованих дій ліквідаційних підрозділів з локалізації таких аварійних ситуацій та ліквідації їх наслідків [120, 156, 157].

Особливої уваги заслуговує перевезення небезпечних вантажів різних класів безпеки з різноманітними фізико-хімічними та пожежо– вибухонебезпечними властивостями. Аварійні ситуації з такими вантажами супроводжуються дією небезпечних чинників, шкідливих для людей, довкілля, вантажів і об'єктів залізничного транспорту та потенційно небезпечних об'єктів інших міністерств і відомств країни. До таких ситуацій належать: вибухи, пожежі, розсипання твердих, витіки рідких і викиди в атмосферу газоподібних небезпечних речовин, що перевозяться залізничним транспортом.

Інакше кажучи, надійність залізничної транспортної системи при перевезеннях небезпечних вантажів можна трактувати як її здатність у визначені терміни часу із заданою ймовірністю відновлювати своє безпечне функціонування після аварійних ситуацій, що супроводжуються дією небезпечних чинників, шкідливих для людей, довкілля, вантажів та об'єктів залізничного транспорту.

Дослідженню проблем безпеки та надійності таких перевезень присвячено чимало наукових праць, зокрема й роботи [120, 156 – 159], у яких розглядалися відповідні теоретичні моделі та окремі практичні аспекти цих проблем.

На рис. 3.3 наведена графічна модель функціонування і станів транспортної системи при перевезеннях небезпечних вантажів, яка в подальшому використовуватиметься для побудови відповідних математичних моделей [70, 159].

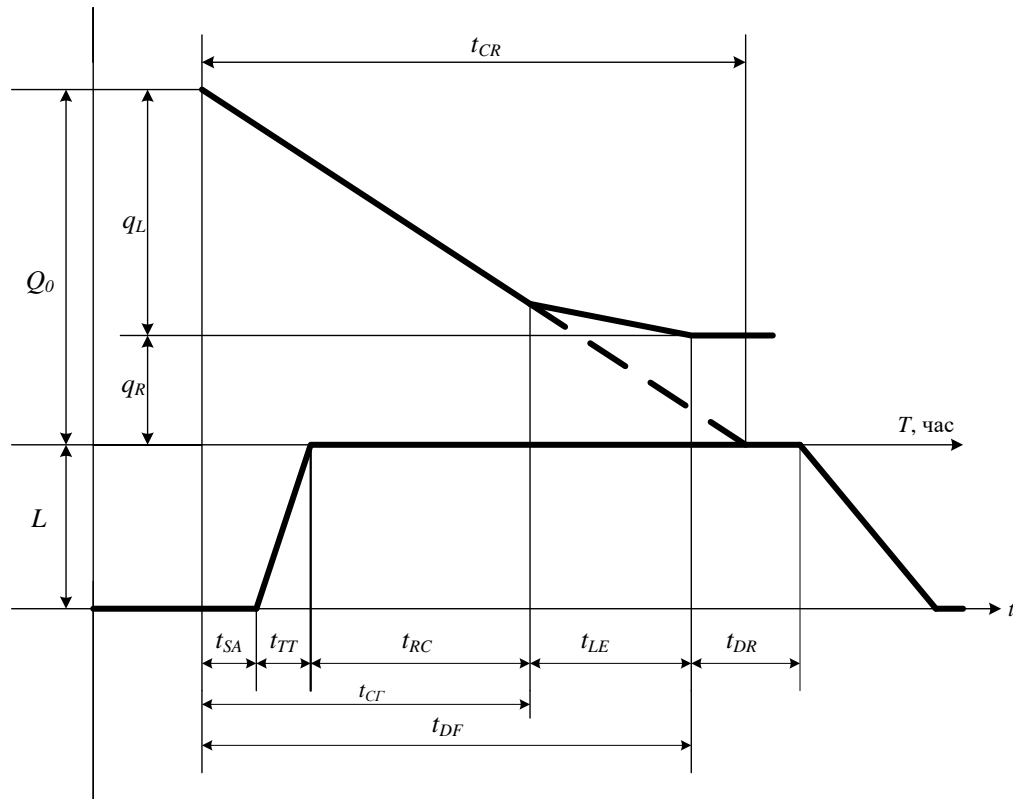


Рис. 3.3. Графічна модель функціонування транспортної системи при ліквідуванні аварійної ситуації

Модель відображає найпоширенішу аварійну ситуацію, пов'язану з витіканням небезпечного вантажу із залізничної цистерни, та реагування на таку ситуацію локалізаційних підрозділів.

Умовні позначення, які подані на рис. 3.3:  $t_{SA}$  – час оцінювання первинної інформації про аварійну ситуацію, визначення переліку ліквідаційних підрозділів, підготовки їх до виїзду (збір бойових обслуг, перевірка рухомого складу, подача локомотивів тощо);  $t_{TT}$  – час руху ліквідаційних підрозділів до місця аварійної ситуації;  $t_{RC}$  – час проведення розвідки на місці аварійної ситуації, визначення

черговості проведення робіт, розгортання ліквідаційних підрозділів для проведення дій за їхнім призначенням;  $t_{LE}$  – час локалізації аварійної ситуації;  $t_{DR}$  – час ліквідації наслідків аварійної ситуації;  $t_{DF}$  – час припинення дії небезпечних чинників аварійної ситуації;  $t_{CR}$  – «критичний» час;  $L$  – відстань від місць постійної дислокації ліквідаційних підрозділів до місця аварійної ситуації;  $V$  – швидкість руху ліквідаційних підрозділів;  $Q_0$  – початкова вага вантажу;  $q_L$  – втрата вантажу;  $q_R$  – залишки вантажу [159].

Поняття «критичний час» – це час, протягом якого відбудеться повна втрата вантажу за умови, що не будуть вживатися ніякі ліквідаційні заходи згідно із регламентами (алгоритмами дій), встановленими відповідно до чинних нормативних документів [57, 95, 96, 169–180].

Визначимо стани транспортної системи при перевезеннях небезпечних вантажів:

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

$S_2$  – стан дії небезпечних чинників аварійної ситуації тривалістю  $t_{DF}$ , який закінчується, коли зникає «джерело» потоку небезпечних чинників (наприклад, весь вантаж згорає ще до того як встигають прибути сили та засоби ліквідування аварійної ситуації, тобто час зосередження цих сил та засобів  $t_{CF}$  більше за «критичний час» для даної аварійної ситуації, 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 аварійної ситуації,  $0 < t_{CF} < t_{CR}$ , з рис. 3.3

ВИДНО, ЩО  $t_{CF} = t_{SA} + t_{TT} + t_{RC} = t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC}$ .

$S_3$  – стан локалізації аварійної 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 ліквідування наслідків аварійної ситуації тривалістю  $t_{DR}$ , яка залежить від того, якої тривалості роботи належить для цього виконати.

Уявимо функціонування залізничної транспортної системи у вигляді графу станів (рис. 3.4).

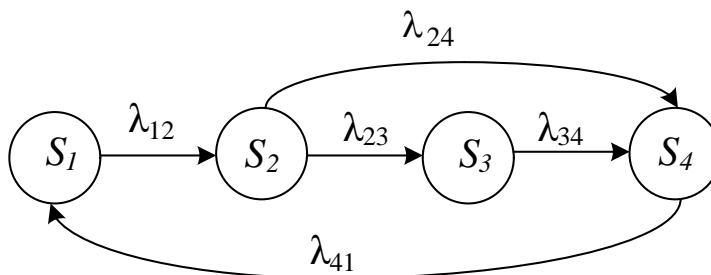


Рис. 3.4. Граф станів транспортної системи під час перевезення небезпечних вантажів

Розглянемо поданий на рис 3.4 граф станів транспортної системи під час перевезення небезпечних вантажів, що може супроводжуватися транспортними подіями, як схему марковського випадкового процесу з дискретними станами і безперервним часом.

Система рівнянь Колмогорова для такого графу має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -\lambda_{12}P_1 + \lambda_{41}P_4, \\ \frac{dP_2}{dt} &= -(\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2 + \lambda_{12}P_1, \\ \frac{dP_3}{dt} &= -\lambda_{34}P_3 + \lambda_{23}P_2, \\ \frac{dP_4}{dt} &= -\lambda_{41}P_4 + \lambda_{34}P_3. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Початкові умови:

$$\text{За } t = 0, P_1 = 1, P_2 = P_3 = P_4 = 0.$$

Для сталого режиму система рівнянь фінальних імовірностей станів системи буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{12}P_1 &= \lambda_{41}P_4 \\ (\lambda_{23} + \lambda_{24})P_2 &= \lambda_{12}P_1 \\ \lambda_{34}P_3 &= \lambda_{23}P_2 \\ \lambda_{41}P_4 &= \lambda_{24}P_2 + \lambda_{34}P_3 \end{aligned} \right\}, \quad (3.2)$$



за умови  $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$

В останнє рівняння системи (3.2) 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 (3.2). Отримаємо рівняння (3.3):

$$p_1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23} + \lambda_{24}} p_1 + \frac{\lambda_{23}}{\lambda_{34}} \cdot \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{23} + \lambda_{24}} p_1 + \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{41}} p_1 = 1. \quad (3.3)$$

Інтенсивності відповідних потоків подій  $\lambda_{ij}$  слід виразити через введені вище технологічні часові параметри моделі, наведеної на рис. 3.4:

$$\lambda_{12} = \frac{1}{t_{SS}}; \quad (3.4)$$

$$\lambda_{23} \frac{1}{t_{CF}} = \frac{1}{t_{SA} + t_{TT} + t_{RC}} = \frac{1}{t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC}}; \quad (3.5)$$

$$\lambda_{24} = \frac{1}{t_{CR} + t_{CF}}; \quad (3.6)$$

$$\lambda_{34} = \frac{1}{t_{LE}} = \frac{1}{t_{SL} + t_{QCR}}; \quad (3.7)$$

$$\lambda_{41} = \frac{1}{t_{DR}}, \quad (3.8)$$

З рівняння (3.3) легко знайти його корінь  $p_1$ , а підставивши значення  $\lambda_{ij}$  з формул (3.4) – (3.8), отримаємо формулу (3.9), за якою можна розрахувати ймовірність безпечного та надійного функціонування транспортної системи  $p_{SS}$  (протягом якого не відбувається аварійних ситуацій за час  $t_{SS}$ , а їх наслідки локалізуються та ліквідуються за час  $t_{SL} + t_{QCR} + t_{DR}$ ):

$$p_{SS} = p_1 = \frac{t_{SS}}{t_{SS} + \frac{t_{CR} + t_{CF}}{t_{CR} + 2t_{CF}} (t_{CF} + t_{LE}) + t_{DR}}. \quad (3.9)$$

Проведений аналіз формули (3.9) свідчить, що вона вірно відображає характер впливу усіх змінних, які до неї входять, на величину  $p_1$ .

До формули (3.9) входить комплекс величин  $\frac{t_{CR} + t_{CF}}{t_{CR} + 2t_{CF}}$ , 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. 3.1 та на рис. 3.5.

Таблиця 3.1

**Аналіз комплексу величин  $\frac{t_{CR} + t_{CF}}{t_{CR} + 2t_{CF}}$ , що впливає на надійність транспортної системи**

$t_{CR}$ , ГОД.	$t_{CF}$ , ГОД.					
	0	0,5	1	1,5	2	2,5
0		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

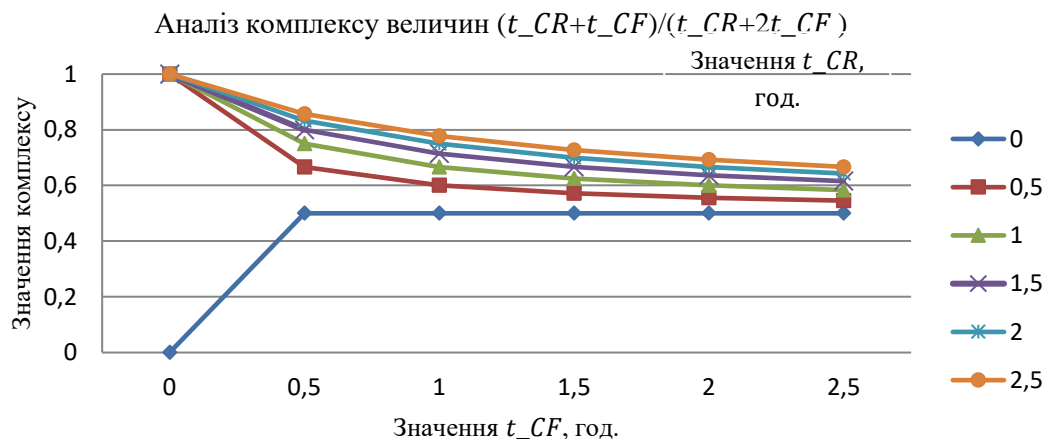


Рис. 3.5. Аналіз комплексу величин  $\frac{t_{CR} + t_{CF}}{t_{CR} + 2t_{CF}}$ , що впливає на надійність транспортної системи

Табл. 3.1 та рис. 3.5 демонструють, 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  $\frac{t_{CR} + t_{CF}}{t_{CR} + 2t_{CF}}$  завжди дорівнює 0,5. Таке сполучення змінних ( $t_{CR} = 0$  та  $t_{CF} > 0$ ), що може відповідати певним реальним ситуаціям, названо випадком «нетерплячого вантажу», тобто такого, який за своїми фізико-хімічними властивостями має на місці аварійної ситуації дуже короткий час перебування у незмінному стані.

Натомість протилежну ситуацію, коли  $t_{CR} > 0$ , а  $t_{CF} = 0$ , тобто коли ліквідаційні сили та засоби прибувають миттєво, названо ситуацією «швидкої допомоги» і відзначимо, що в цьому випадку величина комплексу  $\frac{t_{CR} + t_{CF}}{t_{CR} + 2t_{CF}}$  завжди дорівнює 1.

Таким чином, для випадку «нетерплячий вантаж» маємо формулу:

$$P_1 = \frac{t_{SS}}{t_{SS} + \frac{t_{CF} + t_{LE}}{2} t_{DR}}, \quad (3.10)$$

а для випадку «швидка допомога» – формулу:

$$P_1 = \frac{t_{SS}}{t_{SS} + t_{LE} + t_{DR}}. \quad (3.11)$$

Очевидно, що ці два крайні випадки в реальності у чистому вигляді не трапляються, а формула (3.9) по суті є інтерполяцією між ними, що враховує ненульові додатні значення ( $t_{CR} > 0$ , та  $t_{CF} > 0$ ).

Щоб зробити формулу (3.9) більш придатною для практичних технологічних (а згодом й економічних) розрахунків, застосуємо такі допоміжні формули:

$$t_{CF} = t_{SA} + t_{TT} + t_{RC} = t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC}, \quad (3.12)$$

де усі складові визначені вище (див. рис. 1.5 та пояснення до нього);

$$t_{LE} = t_{RC} + \frac{D_{LE}}{\mu_{LE}}, \quad (3.13)$$

де  $\mu_{LE}$  – продуктивність робіт, які проводяться під час локалізації аварійної ситуації, у тому числі для збереження залишків вантажу, у кількості  $D_{LE}$ , яка вимірюється у тих самих величинах, що й  $\mu_{LE}$ , за одиницю часу (наприклад, як  $\mu_{LE}$  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);

$$t_{DR} = \frac{D_{DR}}{\mu_{DR}}, \quad (3.14)$$

де  $D_{DR}$  – обсяг робіт, що їх необхідно виконати для ліквідації наслідків залізничної аварійної 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 залізничної аварійної ситуації, у тих же одиницях виміру за одиницю часу.

Очевидно, що величини  $\mu_{LE}$  та  $\mu_{DR}$ , які використовуються у формулах (3.11) та (3.12), залежать від тактико-технічних характеристик сил та засобів, що використовуються для локалізації та ліквідації наслідків залізничної аварійної ситуації, тому за величиною  $p_{SS} = p_1$ , отриманою за формулою (3.9), можна оцінити ефективність застосування цих сил та засобів.

Аналізуючи формулу (3.10), бачимо, що до неї входить комплекс змінних  $t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC}$  (рис.3.5), 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 аварійної 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  $t_{TT} = \frac{L}{V}$ .

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 аварійної ситуації.

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

$$t_{SS} = \frac{T}{n_{SF}} . \quad (3.15)$$

Під відмовою у безпечному функціонуванні транспортної системи слід розуміти будь-яку транспортну подію, внаслідок якої може трапитися залізнична аварійна ситуація за участю небезпечних вантажів. Аналіз статистики вантажних перевезень небезпечних вантажів залізницями України за останні десять років

дозволив встановити, що кількість таких транспортних подій з небезпечними вантажами залежить від загального тоннажу всіх вантажів, перевезеного залізницями, що подано на рис. 3.6.

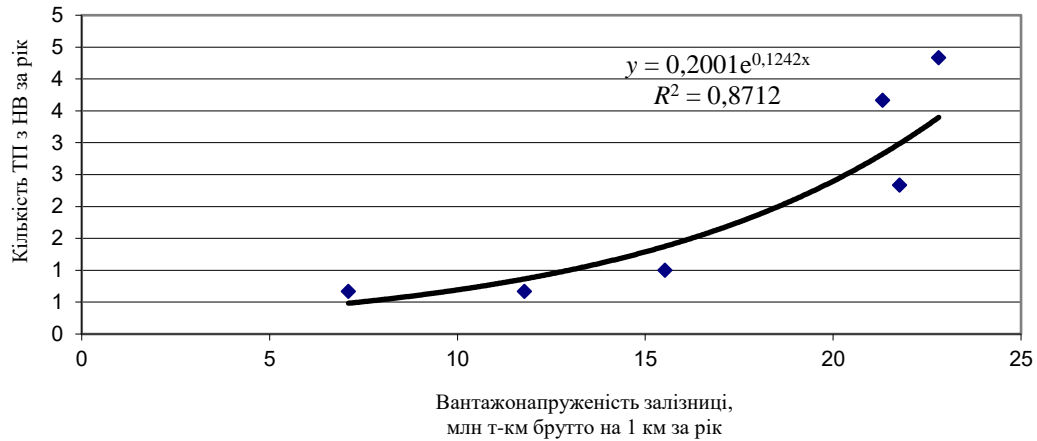


Рис. 3.6. Кількість транспортних подій з небезпечними вантажами в середньому за рік залежно від вантажонапруженості залізниці

Наведені на рис. 3.6 шість точок відповідають узагальненим даним по шести регіональних філіях залізниць України за згаданий період. Залежність кількості транспортних подій з небезпечними вантажами від вантажонапруженості залізниці 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 філії залізниці, а й до будь-якої залізничної лінії, мережі залізничних ліній («умовної залізниці»), якими пропускається відповідний тоннаж [172].

Наведена на рис. 3.6 залежність  $y = 0,2001e^{0,1242x}$  може бути подана у більш простому вигляді, придатному для необхідних у даній моделі розрахунків

$$y = \frac{1}{5} \exp\left\{\frac{1}{8}x\right\} \quad (\text{враховуючи те, що } 0,2001 \approx 0,2 = \frac{1}{5}, \text{ а } 0,1242 \approx 0,125 = \frac{1}{8}).$$

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

$$n_{SF} = \frac{1}{5} \exp\left\{-\frac{365 \cdot N \cdot G}{8 \cdot 10^6}\right\}, \quad (3.16)$$

де  $N$  – середньодобова кількість поїздів, що пропускаються лінією («умовною залізницею»), в обох напрямках;

$G$  – середня маса поїзда брутто, тонн.

З урахуванням формул (3.12) та (3.13), прийнявши період часу  $T=365$  діб, отримаємо значення середньої тривалості стану безпечного функціонування транспортної системи  $t_{SS}$  (у добах):

$$t_{SS} = \frac{T}{n_{SF}} = 5 \cdot 365 \exp \left\{ -\frac{365 \cdot N \cdot G}{8 \cdot 10^6} \right\}. \quad (3.17)$$

Тепер формулу (3.9) можна видозмінити, використовуючи в ній, якщо це необхідно, часові (формула (3.18)) або технологічні параметри (шляхом підстановки величин, визначених формулами (3.12) – (3.14)):

$$p_1 = \left\{ 1 + \frac{\exp \left\{ -\frac{365 \cdot N \cdot G}{8 \cdot 10^6} \right\}}{5 \cdot 365} \left[ \frac{t_{CR} + t_{CF}}{t_{CR} + 2t_{CF}} (t_{CF} + t_{LE}) + t_{DR} \right] \right\}^{-1}, \quad (3.18)$$

де всі параметри визначені вище (див. рис. 3.3, пояснення до нього та формули (3.12) – (3.14)).

З практики відомо, що запізнення прибуття ліквідаційних сил та засобів і неефективне їх застосування завжди призводять до більш тяжких наслідків залізничної аварійної ситуації та більш тривалої їх ліквідації. Причому найбільш стрімко аварійна ситуація розвивається у небезпечному 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 такій спосіб, взявши за основу формулу (3.14) нашої моделі:

$$t_{DR} = \frac{D_{DR}^{max}}{\mu_{DR}} \left[ 1 - \exp \left\{ -\frac{t_{CF} + t_{LE}}{t_{CR}} \right\} \right], \quad (3.19)$$

де  $D_{DR}^{max}$  – максимально можливий обсяг робіт, що їх потрібно виконати для ліквідації наслідків аварійної 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 самих одиницях виміру за одиницю часу.

З формули (3.19) видно, що при  $t_{CR} \rightarrow 0$ , коли повна втрата вантажу відбувається практично миттєво (наприклад, вибух), обсяг ліквідаційних робіт прагне до максимально можливого (оскільки  $\exp\left\{-\frac{t_{CF} + t_{LE}}{t_{CR}}\right\} \rightarrow 0$ , 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 ліквідування аварійної 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 аварійної 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 (3.18) 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 подати 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 аварійної 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 аварійну ситуацію та прийнято управлінське рішення щодо вибору, зосередження та бойового розгортання адекватних ситуації сил та засобів у необхідній кількості, тим швидше аварійна ситуація буде локалізована, менш важкими будуть її наслідки і вони швидше будуть ліквідовані. В термінах нашої моделі це означає, що її математичні параметри  $t_{CF} = t_{SA} + t_{TT} + t_{RC} = t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC}$ , а також  $\mu_{DR}$  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 БПЛА та СППР для розвідки, оцінювання обстановки та прийняття рішення на місці залізничної аварійної ситуації. Таким чином, може бути забезпечено максимальну ефективність проведення локалізації та ліквідації аварійної 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:

$$P_{SS} = P_1 = \frac{1}{1 + \frac{\exp\left\{-\frac{365 \cdot N \cdot G}{8 \cdot 10^6}\right\}}{5 \cdot 365 \cdot 24} \left\{ \frac{t_{CF} + 3t_{LE}}{4} + \frac{D_{DR}^{max}}{\mu_{DR}} \left[ 1 - \exp\left\{-\frac{t_{CF} + t_{LE}}{t_{CR}}\right\} \right] \right\}} \quad (3.20)$$

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

$$t_{CF} = t_{min} + \frac{t_{CR} - t_{CF}}{t_{CR} - t_{max}} (t_{CR} - t_{max}). \quad (3.21)$$

Рівняння (3.21) 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 (3.21) отримаємо квадратне рівняння відносно  $t_{CF}$ , єдиним коренем якого при  $t_{min} \leq t_{CF} \leq t_{max}$  буде

$$t_{CF} = t_{CR} + \sqrt{t_{CR}^2 + \left(t_{SA} + \frac{L}{V}\right) \left(t_{CR} - \left(t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC}\right)\right)}. \quad (3.22)$$

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

$$t_{CF} = \sqrt{\left(t_{SA} + \frac{L}{V}\right) \left(t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC}\right)}, \text{ котре, як відомо, є ближчим до меншого значення.}$$

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 ліквідування наслідків залізничної аварійної ситуації є тим меншою, чим швидше зосереджені відповідні до ситуації та її масштабів сили та засоби. З огляду на це припущення та на підставі наведених вище формул промодельюємо 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. 3,2, що відрізняються різними значеннями критичного часу ( $t_{CR, \text{год.}}$ ), 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  $\mu_{DR}$ ).

Таблиця 3.2

**Вихідні дані та результати розрахунків за математичною моделлю  
можливого розвитку залізничної аварійної ситуації**

Постійні	$t_{SA}$ , год.	$t_{CR}$ , год.	$L$ , км	$V$ , км/год	$D^{max}$ , од.
		0,50	0,25	90	60
Змінні	Величина змінної				
$t_{CR}$ , ГОД.	0,05	0,45	0,85	1,25	1,65

Продовження табл.3.2

$t_{CF} = t_{CR} + \sqrt{t_{CR}^2 + \left(t_{SA} + \frac{L}{V}\right) \left(t_{CR} - \left(t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC}\right)\right)}$	2,15	2,40	2,73	3,14	3,63	
$D_{LE}^{max} = \frac{t_{CR} D^{max}}{t_{CR} - t_{CF}}$ , 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	
$t_{LE} = \frac{t_{CR} - t_{CF}}{1 + \frac{t_{CR}}{t_{RC} + \frac{D_{LE}^{max}}{\mu_{LE}}}}$ , год.	1,88	1,57	1,46	1,42	1,43	
$D_{DR}^{max} = \frac{(2t_{CR} - 2t_{CF}) D^{max}}{t_{CR} - t_{CF}}$ , 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	
$t_{SA} = t_{CF} + t_{LE} + t_{DR}$ , 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

Результати моделювання наведені на рис. 3.7.

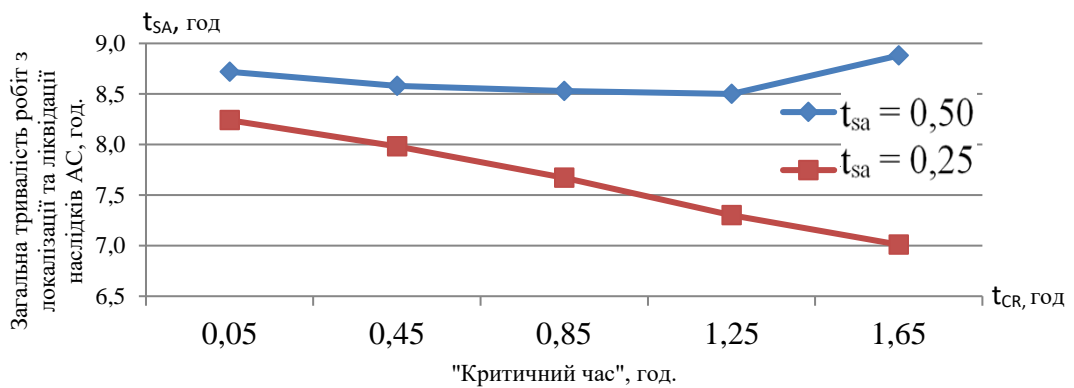


Рис. 3.7. Результати моделювання загальної тривалості локалізаційних та ліквідаційних робіт залежно від часу необхідного для прийняття рішення ( $t_{SA}$ ), та «критичного часу» вантажу ( $t_{CR}$ )

З рис. 3.7 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, негативним впливом на природне середовище та прямими й непрямими економічними втратами [158], то очевидно є необхідність якнайшвидшого оцінювання обстановки, що склалася, та прийняття своєчасного обґрунтованого рішення з ліквідування залізничної аварійної ситуації. Це можливо за рахунок застосування новітніх технічних засобів моніторингу розвитку такої ситуації, наприклад, використання БПЛА, а також застосування інформаційних технологій та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

Враховуючи те, що перебування системи перевезень небезпечних вантажів у кожному із станів (рис.3.7), 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.

### **3.3. Особливості процесу прийняття рішень щодо ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій**

Прийняття керівником оперативного штабу рішень щодо локалізації залізничної аварійної ситуації з небезпечними вантажами та ліквідації її наслідків є найважливішою функцією діяльності цього органу управління.

Наведений вище аналіз дій оперативного штабу в типових ситуаціях свідчить, що основними стадіями підготовки рішення є отримання інформації про транспортну подію; збір даних про обстановку, її аналізування та оцінювання; організація постійного моніторингу за зміною обстановки; підготовка пропозицій членів оперативної штабу та фахівців організацій, які беруть участь у проведенні ліквідаційних та локалізаційних заходів; всебічний аналіз інформації та пропозицій; прийняття рішення; доведення завдань до виконавців; організація взаємодії між різнорідними силами і засобами; всебічне забезпечення визначених дій підрозділів; контроль за виконанням.

Рішення керівника оперативного штабу складається з елементів, які визначають заходи управління діями підрозділів з боку самого керівника, а також елементів, що визначають дію підрозділів.

Досвід ліквідування аварійних ситуацій з небезпечними вантажами свідчить про те, що термін часу, призначений на збирання інформації, є тривалим й оцінка обстановки на місці транспортної події, як правило, має суб'єктивний характер.

Крім того не завжди є можливість оцінити обстановку на місці транспортної події, наприклад, з причини інтенсивної пожежі, дії негативних властивостей небезпечного вантажу, вибуху тощо.

У таких ситуаціях керівнику оперативного штабу найперше треба визначити істинність прийнятої інформації та визначити її достатність для оцінювання обстановки.

Питання оцінювання обстановки у аварійних ситуаціях приділяється значна увага. Оцінювання обстановки пов'язане з побудовою її моделі з певною орієнтацією і ступенем деталізації, встановленням суттєвих ознак у ситуації, що сталася [12, 15, 16, 22, 28, 34, 55, 68, 178].

Оцінювання ситуації передбачає узагальнення і перетворення інформації у форму, яка найбільш відповідає конкретній ситуації управління діями підрозділів функціональної підсистеми «Сили і засоби реагування на надзвичайні ситуації на залізничному транспорті», зведених у спеціальне тимчасове формування.

Достовірність оцінки обстановки досягається проведенням розвідки місця аварійної ситуації, або адекватним моделюванням процесів розвитку такої ситуації.

Для проведення розвідки необхідними є певні сили і засоби та резерв часу. Але в ситуаціях, пов'язаних з витіканням (розливанням) небезпечного вантажу, його горінням (вибухом) умови для проведення розвідки є дуже складними, а термін часу обмеженим.

У таких ситуаціях для проведення розвідки доцільно використовувати БПЛА, які дають можливість дистанційно з визначеною деталізацією здійснювати моніторинг обстановки, що склалася, у реальному масштабі часу передавати

зображення рухомого складу і об'єктів, які знаходяться у небезпечних зонах аварійної ситуації [155].

Велике значення для успішності проведення ліквідаційних та локалізаційних заходів відіграють процеси визначення необхідної кількості сил і засобів, створення організаційної структури спеціального формування для проведення узгоджених взаємозв'язаних дій підрозділів, які входять до його складу.

Основною вимогою для такої тимчасової організаційної структури є ефективне виконання нею функцій, які визначені метою створення такої структури щодо проведення робіт у складній обстановці і дефіциті часу. Процес розробки організаційної структури складається з процесів визначення функцій і складу підрозділів та функцій посадових осіб, встановлення підпорядкованості та схеми спілкування. Необхідною властивістю організаційної структури є здатність продуктивно діяти у будь-якій обстановці та стійкість при ускладненні негативних умов функціонування [12, 15, 34, 36, 40].

Найскладнішими і відповідальними є рішення, що пов'язані із способами дій підрозділів, які приймаються на основі всебічного аналізу фактів, шансів, та поглядів. У деяких випадках первісна добре обґрунтована мета зазнає суттєвих змін під час підготовки оперативного рішення, з'являються нові цілі та підцілі, розв'язування яких є домінуючим.

Сукупність рішень керівника оперативного штабу, керівника гасіння пожежі, керівників підрозділів, секторів (ділянок) проведення робіт складає ієрархію рішень, яка визначає структурні зв'язки між рішеннями.

У процесі утворення ієрархії рішень існують різні спрямування процесу їх вироблення [12, 34, 40] :

– знизу вверх, коли рішення на більш високих рівнях ієрархії приймається на підставі рішень прийнятих на нижчих рівнях, що є характерним для оцінювання обстановки;

– зверху вниз, що характерно при створенні структури тимчасового ліквідаційно-локалізаційного формування;

– назустріч, коли рішення на нижніх рівнях розвивають, стосовно своїх умов, й реалізують рішення верхніх рівнів, а рішення на верхніх рівнях приймаються з урахуванням раніше прийнятих рішень на нижніх рівнях. Це є характерним для оперативних рішень.

У середині ієрархії рішень циркулюють потоки інформації, які забезпечують надходження та узгодження вхідної інформації. Функціонування ієрархії рішень з причинними зв'язками між ними утворює логічну основу діяльності створеного тимчасового спеціального формування. Необхідно відмітити й той факт, що кожне рішення нижнього рівня, яке приймається на підставі рішення верхнього рівня, має певні обмеження, які забезпечують узгодженість рішень на цьому рівні ієрархії. Але наявність тільки обмежень не є достатньою умовою для узгодженості рішень, необхідними є й цілеспрямована, узгоджена сукупність прийомів діяльності, методів роботи керівників різних рівнів ієрархії. Крім цього, велике значення має зміст рішень верхніх рівнів та організація контролю виконання, зокрема й затвердження рішень нижніх рівнів на верхніх рівнях.

Для того, щоб рішення було ефективним та забезпечувало досягнення цілей діяльності створеного тимчасового спеціального формування, воно повинно задовольняти низці вимог [12, 34, 36, 40]:

– чітка цільова спрямованість, тобто чітка орієнтація на досягнення окремої цілі або системи цілей з метою максимального наближення результату реалізації рішення до поставленої цілі;

– всебічна обґрунтованість, яка полягає в обґрунтуванні вибору окремої альтернативи і окремих компонент самої альтернативи. В умовах аварійної ситуації керівник оперативного штабу приймає рішення, як правило, в умовах недостатньої інформації, що зумовлює велике значення його досвіду, інтуїції і професіоналізму;

– адресність, тобто чітка орієнтованість на конкретний об'єкт управління і конкретних виконавців, на їх можливості, кваліфікацію та компетентність;

– узгодженість з раніше прийнятими та іншими рішеннями, які приймаються;

– правомочність, що полягає у збалансованості прав та відповідальності керівників (органів управління) усіх рівнів управління. Порушення цієї вимоги для рішень суттєво впливає на ефективність їх утілення як у разі завищення своїх повноважень керівником, так й у разі підміни ним виконання обов'язків керівників нижніх рівнів управління;

– вимога ефективності є мінімальною потребою у ресурсному забезпеченні при виробленні рішення та його втілення для досягнення потрібного результату;

– своєчасність полягає у тому, що рішення приймається не раніше, але й не пізніше необхідного строку;

– повнота, стислість, чіткість є необхідними компонентами складових, що охоплюють усі сторони впливу рішення на об'єкт управління (мета, сили і засоби, які застосовуються для досягнення мети; основні шляхи і способи досягнення мети; організація виконання робіт та керування ними на усіх етапах реалізації рішень). Рішення повинні виключати зайві, другорядні деталі, які не стосуються суті справи. Чіткість у рішенні виключає неоднозначність трактування, невизначеність стану виконавців, їхніх прав та обов'язків; компромісність, що передбачає певний баланс між позитивним та негативним результатами рішення.

При прийнятті рішень щодо вжиття заходів, спрямованих на ліквідування наслідків аварійної ситуації та локалізацію її впливу на об'єкти залізничної інфраструктури, рухомий склад і природне середовище, керівник оперативного штабу стикається з необхідністю приймання як одноособових (індивідуальних) рішень, так й колективних рішень (після обговорення з членами оперативної штабу, керівниками гасіння пожежі, іншими фахівцями, які беруть участь у таких заходах).

Індивідуальні рішення, які приймає керівник оперативного штабу, потребують менше часу на їх вироблення, характеризуються більш високим рівнем творчості, але й високим рівнем помилок, більшою ймовірністю прийняття неприйняттого рішення.

Однак, проблеми організації локалізаційних та ліквідаційних робіт, які проводяться у складній динамічній обстановці, де необхідно враховувати велику кількість чинників негативного впливу на об'єкти різних господарств залізниці та



навколишнє природне середовище, потребує залучення до процесу вироблення рішення фахівців цих господарств та фахівців організацій, які беруть участь у проведенні робіт.

Колективне (групове, колегіальне) рішення має, як правило, більш високу якість, при його розробленні висувається множина різних варіантів рішення, які розглядаються більш різнобічно та обґрунтовано, що у свою чергу, зменшує можливість прийняття неприйняттого рішення. Крім цього, при прийнятті колективного рішення відбувається розподілення відповідальності між особами, які залучаються до його вироблення, таке рішення може бути більш ризикованим, але найбільш прийнятним.

Суттєвим недоліком колективного рішення є його порівняно низька оперативність, бо необхідно більше часу на його вироблення. Проте потрібно відмітити, що колегіальність прийняття рішення ні в якому разі не знімає персональної відповідальності керівника оперативного штабу за прийняте рішення. Особливу увагу заслуговує класифікація рішень за ступенем формалізації, що дозволяє розглянути різні способи формалізації процедур їх вироблення та прийняття.

Запрограмовані рішення (рутинні рішення), приймаються, як правило, у стандартних ситуаціях, які мають деякий набір варіантів їх вирішення. Ситуація, як й рішення, що приймається у такій ситуації, є структурованим й формалізованим. Такі рішення приймаються на нижніх рівнях ієрархії, наприклад, для вибору схеми відбудови контактної мережі керівником групи з ліквідації аварії електропостачання. Головне завдання такого керівника ідентифікувати ситуацію та діяти визначеним керівником, чи відповідним документом чином [16, 55, 163, 169].

Незапрограмовані рішення приймаються у погано структурованих ситуаціях, поєднаних з невідомими факторами, чи неповною інформацією. Вибір рішення здійснюється з неповної множини варіантів, що не дозволяє знаходити рішення за допомогою адекватних моделей та потребує розроблення відповідних процедур для розв'язування проблеми. У цьому випадку значну роль відіграють кваліфікація, досвід, інтуїція та творчий потенціал керівника.

Спосіб обґрунтування рішення характеризується співвідношенням інтуїції та логіки у процесі його прийняття та відображує психологічні особливості керівника.

В основі інтуїтивного рішення керівника, як правило, вищого рівня ієрархії лежать значний особистий досвід, правильне розуміння ситуації та глибокі професійні знання.

Рішення, які засновані на міркуванні – це вибір, обумовлений знаннями і накопиченим досвідом. Такі рішення іноді можуть удаватися як інтуїтивні, бо логіка їх прийняття не очевидна. При прийнятті таких рішень керівник оперативного штабу використовує свій досвід та досвід інших працівників, набутий при розв'язуванні аналогічних ситуацій у минулому (так званих типових ситуаціях), знання про поточну ситуацію та її відміну від типових ситуацій, і вибирає альтернативу, яка вже призводила до успіху, або видозмінює її відповідно існуючих відмін.

Однак лише одного міркування буде недостатньо для прийняття рішення у новій чи складній ситуації за браком особистого досвіду, або недостатньої чи недостовірної інформації про ситуацію, що може призвести до пропуску нового, більш ефективного рішення.

На відміну від рішень, заснованих на міркуванні, раціональні рішення не залежать від минулого досвіду. Вони обґрунтовуються за допомогою об'єктивних аналітичних дій з використанням повної інформації про ситуацію та наслідки альтернативних варіантів рішення. Такі рішення, як правило, є запрограмованими і можуть розроблятися за допомогою технічних засобів автоматизованої обробки інформації.

Істотно, що при прийнятті рішень керівником оперативного штабу, керівником гасіння пожежі, керівниками інших спеціалізованих підрозділів використовуються комбінації розглянутих вище підходів. Умови, в яких приймаються такі рішення, характеризуються ступенем визначеності аварійної ситуації, тобто повнотою і доступністю інформації про ситуацію.

В умовах визначеності рішення приймаються, коли є повна і достовірна інформація про проблемну ситуацію, цілі, обмеження та наслідки рішення. Сама проблема і ситуація, в якій вона виникла, точно описуються сукупністю відповідних характеристик. Цілі та обмеження формально визначаються у вигляді

цільових функцій та нерівностями (рівностями). Критерій вибору рішення визначається мінімумом чи максимумом цільової функції. Все це дозволяє побудувати формальну математичну модель задачі прийняття рішення, алгоритмічно знайти оптимальне рішення за допомогою різних методів оптимізації. Рішення, які приймаються в умовах визначеності, ще називають детермінованими, для яких розроблені алгоритми прийняття оптимальних рішень, й які засновані на методах математичного програмування (задачі розміщення виробництв, розподілу ресурсу і робіт, управління запасами, транспортні задачі тощо). Потрібно відмітити, що деякі елементи складних рішень можна розглядати як визначені.

Прийняття рішень в умовах імовірної невизначеності здійснюється у випадках, коли відсутня достовірна інформація про обстановку, що склалася, а кожне рішення у такій ситуації може призвести до одного з множини можливих наслідків з певною імовірністю, яка може бути розрахованою за допомогою ймовірнісних характеристик. Такі імовірнісні характеристики є вже не випадковими, тому з ними можна оперувати щодо знаходження рішення, як з детермінованими характеристиками. Розв'язування таких задач базується на теорії статистичних рішень. У цьому випадку керівник ризикує отримати неочікуваний ним результат, на який він орієнтується, вибираючи оптимальне рішення з осереднених статистичних характеристик випадкових чинників аварійної ситуації. Тому таке рішення називається також рішенням, яке приймається в умовах ризику.

Роль людини при розв'язуванні завдань методами статистичних рішень, як й в умовах визначеності полягає у приведенні реальної задачі до відповідної типової, у визначенні ймовірностей подій на основі статистичних даних, а також у затвердженні отриманого оптимального результату.

Для рішень, які приймаються в умовах невизначеності, характерними є неповнота і недостовірність вихідної інформації, різноманітність та складність впливу різних чинників на розвиток аварійної ситуації. При цьому керівник не має змоги оцінити імовірність потенціальних результатів з достатнім ступенем достовірності. Ці обставини не дозволяють побудувати адекватні математичні моделі задач визначення оптимального рішення. Основну роботу щодо пошуку прийнятного рішення виконує людина за допомогою обчислювальної техніки, завдяки чому процес носить інтерактивний характер.

В умовах невизначеності керівник оперативної штабу може скористатися такими можливостями:

– по-перше, організувати розвідку місця аварійної ситуації за допомогою спеціальних підрозділів, або за допомогою БПЛА. Застосування БПЛА надасть значну економію часу на добування необхідної інформації для представників усіх господарств залізниці, керівника гасіння пожежі та інших зацікавлених фахівців, не наражаючи особовий склад розвідувальних підрозділів впливу небезпечних чинників аварійної ситуації. Це дасть можливість зменшити невизначеність ситуації та складність проблеми. Поєднуючи цю додаткову інформацію з аналізом, накопиченим досвідом, здатністю до розмірковувань або інтуїцію, керівник може надати низці параметрів ситуації суб'єктивну імовірність;

– по-друге, діяти відповідно до минулого досвіду, розмірковуванням або інтуїцією та зробити припущення щодо імовірності параметрів ситуації. Це необхідно за умови, коли не достаньо часу на збирання додаткової інформації або витрати на це дуже великі.

Враховуючи специфічні умови залізничного транспорту, можна стверджувати, що прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо локалізації аварійних ситуацій з небезпечними вантажами та ліквідації їх наслідків повинно здійснюватися за допомогою системи підтримки прийняття рішень. Для створення таких СППР слід використовувати математичні моделі прогнозування розвитку таких ситуацій та структурно-логічні схеми у різних аварійних ситуаціях.

### **3.4. Раціональні способи реагування на аварійні ситуації з небезпечними вантажами та організації ліквідаційних робіт**

Обсяг аварійно-відновних робіт, а відповідно і час на ліквідацію наслідків транспортних подій визначаються кількістю рухомого складу, що зійшов із рейок, ступенем його руйнуванні, характером нагромадження, станом колії, контактної мережі, засобів зв'язку й СЦБ, характером вантажу і його розташуванням, метеоумовами, а також відстанню від місця події до відновного поїзда, часом його просування.

Трудомісткість відновних робіт значно зростає, якщо сходження рухомого складу з рейок відбувається в тунелях, глибоких виїмках, на мостах (особливо з їхнім руйнуванням); при знаходженні у вагонах, що зійшли, небезпечних і горючих вантажів, виникненні пожеж і вибухів; при сходженні з рейок рухомого складу поблизу населених пунктів, відкритих і закритих складів з легкозаймистими й горючими рідинами й іншими небезпечними матеріалами, скельних масивів, боліт і водойм. При найбільш важких випадках, коли є постраждалі, обсяг і характер відновних робіт докорінно змінюються, тому що всі сили й засоби в цьому разі спрямовані, насамперед, на ведення рятувальних робіт [10, 13 – 15, 55 – 57, 60, 172 – 180].

Головним завданням відновних робіт є відновлення руху поїздів або маневрової роботи у можливо короткий термін при мінімальних затратах матеріальних цінностей і збереженні життя, здоров'я людей [2, 9, 57]. Зважаючи на це завдання й будується організація таких робіт.

Аналіз залізничних транспортних подій показує, що випадки сходження з рейок рухомого складу за своїми характеристиками один на інший не схожі. Проте при ліквідації наслідків залізничних транспортних подій вироблені певні загальні принципи організації відновних робіт. На їхній основі увесь процес відновлення руху можна розділити на такі основні етапи: збирання інформації про подію, збір і доставка відновних засобів до місця події; організація відновних робіт на місці події.

Інформація про подію повинна мати відомості про наявність потерпілих, знаходження у складі поїзда небезпечних вантажів і вогнищ пожежі; характер сходження, рельєф місцевості і профіль колії; ступінь пошкодження рухомого складу, колії, контактної мережі, засобів СЦБ і зв'язку; розташування й тип рухомого складу, що зійшов з рейок, стан і розташування вантажу; наявність габариту на сусідній колії.

Виклик і доставка відновних засобів здійснюється згідно з відповідними положеннями [57, 173 – 180].

Організація відновних робіт містить: визначення обсягів цих робіт; вибір схеми й установлення черговості їхнього виконання, розробку планів щодо організації відновлення; забезпечення необхідними людськими й матеріально-

технічними ресурсами; керування всіма підрозділами, що беруть участь у відновлювальних роботах; забезпечення охорони й огороження місць виконання робіт (вантажів), пожежної безпеки й охорони природного середовища. У цілому процес відновлювальних робіт повинен забезпечити розгортання й виконання робіт з мінімальною витратою часу, ведення робіт цілодобово, позмінно, широким фронтом з таким розрахунком, щоб всі засоби механізації використовувалися ефективно протягом усього періоду відновлення руху.

У всіх випадках відправлення відновного поїзда до місця робіт за наявності пошкоджених вагонів і таких, що зійшли з рейок із легкозаймистими вантажами організується відправлення пожежного поїзда і сповіщаються територіальні пожежно-рятувальні частини. Відновні роботи в цьому випадку проводяться з особливою обережністю і під наглядом пожежної охорони залізниці [57, 176].

Роботи з локалізації забруднень (заражень), проведення нейтралізації (дегазації) небезпечних речовин на залізничній колії, у випадку потрапляння на рухомий склад небезпечних речовин проводиться згідно з вимогами, наведеними у відповідних розділах правил ліквідації аварійних ситуацій [57, 176]. Такі роботи проводять відповідно до рекомендацій, які містяться в розділах аварійної картки щодо дотримання заходів пожежної і особистої безпеки були розглянуті вище.

Особливості ліквідації аварійних ситуацій з різними класами небезпечних вантажів надані у розділі В.1 Додатка В.

Велике значення під час ліквідування наслідків аварійних ситуацій відіграє організація дій локалізаційних підрозділів при просипанні (проливанні, розливанні) небезпечних вантажів.

Як це було подано вище, розливання (просипання) небезпечного вантажу здійснюється внаслідок другої фази розвитку аварійної ситуації, коли відбулося руйнування рухомого складу (пакування) й небезпечна речовина вийшла за межі захисної оболонки, але ініціювання вибухових та пожежонебезпечних перетворень всередині небезпечної речовини не відбулося, що в свою чергу, не спричинило небезпечного явища пожежі чи вибуху.

Розгляд характеру взаємодії небезпечних вантажів різних класів безпеки з водою, повітрям, елементами місцевості, проведений у попередньому розділі цієї роботи, дає підставу стверджувати, що при таких взаємодіях можливе хімічне,

радіоактивне, біологічне забруднення місцевості та створення умов щодо самонагрівання небезпечних вантажів або створення умов для подальшого ініціювання вибуху.

Рекомендації щодо дій у разі витоків, розливу та розсипу небезпечного вантажу, для вибухових вантажів – у разі руйнування, а також при пожежі містяться у розділі «Необхідні дії» аварійних карток [57].

Аналіз змісту аварійних карток дозволив виявити відносну кількість вантажів різних класів небезпеки до яких застосовуються рекомендовані аварійними картками дії.

Найпоширеніми рекомендаціями є ті, що спрямовані на запобігання виникнення пожежі та вибуху: припинення руху поїздів, автотранспорту, маневрової роботи в зоні аварії, усунення джерел вогню та іскроутворення, віддалення горючих речовин від розсипів та проливів.

Особлива увага приділяється діям щодо недопущення потрапляння небезпечної речовини у водойми, підвали, каналізацію, огороження місць розливів або розсипів ґрунтовими валами, перекачування вмісту аварійної цистерни у справну.

Певна увага приділяється осаджуванню пари (течі газу) тонкорозпиленою водою, проливанню розливів водою тощо. Значне місце у рекомендованих аварійними картками діях посідають заходи щодо усунення течі небезпечних вантажів або перекачування їх у цілі ємкості з додержанням запобіжних заходів. Детально дані про рекомендовані дії щодо локалізації залізничних аварійних ситуацій та ліквідації їх наслідків подані у роботах [55, 60 – 62].

Дані про інтенсивності та тривалості витоків зрідженого (скрапленого) вуглеводневого газу (ЗВГ) скрізь пробоїни у верхній та нижній частинах казана цистерни надані у табл. В.1 Додатка В.

Враховуючи те, що тиск газу у цистерні протягом 5 – 10 хв. падає від величини тиску насиченої пари (наприклад, для пропану від 800 кПа до величини 120 – 150 кПа) тобто у 6 – 7 разів, то середня інтенсивність буде у 2,5 рази менше у порівнянні з початковою інтенсивністю.

Як правило, при отриманні пробоїни витік починається у рідкій фазі, а потім по мірі зниження рівня рідини, переходить у витік пароподібної фази. Тому часові

терміни часу витоку у пароподібній фазі та рідкій фазі, які подані у табл. Б1 Додатка Б, треба приймати як максимальні і мінімальні відповідно. Тому можна приймати, що реальний термін витоку дорівнює середній величині цих значень [60].

Залежність втрат вантажу та терміни часу витікання легкозаймистих рідин (ЛЗР) з аварійної цистерни від площі пробоїни та універсального зливного пристрою надані у табл. В.2 Додатка В.

Рекомендовані дії щодо локалізації наслідків залізничних аварійних ситуацій з вантажами першого класу небезпеки надані у табл. Б.3, а рекомендовані дії щодо локалізації наслідків залізничних аварійних ситуацій з вантажами 2 – 9 класів небезпеки у табл. В.4 Додатка В.

Проведені розрахунки щодо визначення радіуса вибухонебезпечної зони при аварійній розгерметизації стандартної цистерни ємкістю 54 м<sup>3</sup>, наприклад, із скрапленим пропаном, при пробоїні у 25 см<sup>2</sup> в умовах миттєвої розгерметизації свідчать, що радіус вибухонебезпечної зони становить приблизно 240 м. Радіус вибухонебезпечної зони розливу ЛЗР при аварійній розгерметизації універсального зливного пристрою площею 78,5 см<sup>2</sup> становить на 10 хвилині – 58 м, на 30-й хвилині – 83 м, а на 50-й хвилині 98 м, площа розливу вантажу – 262,5 м<sup>2</sup> [55, 60].

Тобто, чим швидше буде припинена течя, тим менша площа розливу і розміри вибухонебезпечної зони, тим менші втрати вантажу і негативний вплив на природне середовище.

### **3.5. Ситуативні критерії ефективності дій оперативного штабу при ліквідуванні наслідків залізничних аварійних ситуацій**

Основні процеси розвитку типових залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, аналіз яких проведений у попередніх розділах цієї роботи показує, що наслідками таких ситуацій можуть статися: ушкодження вагонів без впливу на небезпечний вантаж; ушкодження вагону з утворенням виливання (висипання) небезпечного вантажу; ушкодження вагону з утворенням розливання (розсипання) небезпечного вантажу на рельєф місцевості; ушкодження вагонів з пожежею чи вибухом небезпечного вантажу [7].



Виливання (висипання) небезпечного вантажу за певних умов може закінчитися пожежею або вибухом, пожежа чи вибух небезпечного вантажу може статися й при розливанні (розсипанні) небезпечного вантажу.

Виходячи з цього, основним завданням оперативної штабу з ліквідації наслідків таких аварійних ситуацій є керівництво діями сил і засобів реагування на аварійні ситуації залізничного транспорту та підрозділів інших організацій, які залучаються до проведення ліквідаційних робіт, надання невідкладної допомоги потерпілим, усунення загрози життю та здоров'ю людей, негативного впливу чинників аварійної ситуації на довкілля і відновлення нормального перевізного процесу. Проведення заходів реагування здійснюється у відповідності з планом дій уточнених в умовах конкретної обстановки.

При виникненні пожежі, дії оперативної штабу ускладнюються, бо заходи ліквідації наслідків сходу чи зіткнення рухомого складу, необхідно узгоджувати з керівником гасіння пожеж.

### **3.5.1. Типові ситуації дій оперативного штабу пункту управління при ліквідуванні наслідків залізничних аварійних ситуацій**

Розглянемо порядок дій оперативного штабу в аварійних ситуаціях, пов'язаних зі сходом ушкодженого рухомого складу з рейок та розливанням (розсипанням) небезпечного вантажу (рис. 3.8).

Після отримання первинної інформації від локомотивної бригади та її уточнення черговим персоналом пунктів управління різних господарств залізниці, проводиться аналіз основних властивостей, вибухо- та пожежонебезпеки небезпечних вантажів та їх безпеки для людини.

З метою запобігання виникненню пожежі керівником оперативного штабу приймається рішення щодо припинення руху поїздів у небезпечній зоні, встановлюється протипожежний режим та сповіщаються підрозділи Цивільного захисту, Державної служби з аварійних ситуацій, санітарно-епідеміологічної служби (СЕС), медичної допомоги та місцеві органи влади.

Приймається рішення щодо розвідки місця скоєння транспортної події за участі начальника найближчої станції, що обмежує аварійний перегін та інших працівників залізниці відповідно до вимог чинних керівних документів [2, 9].

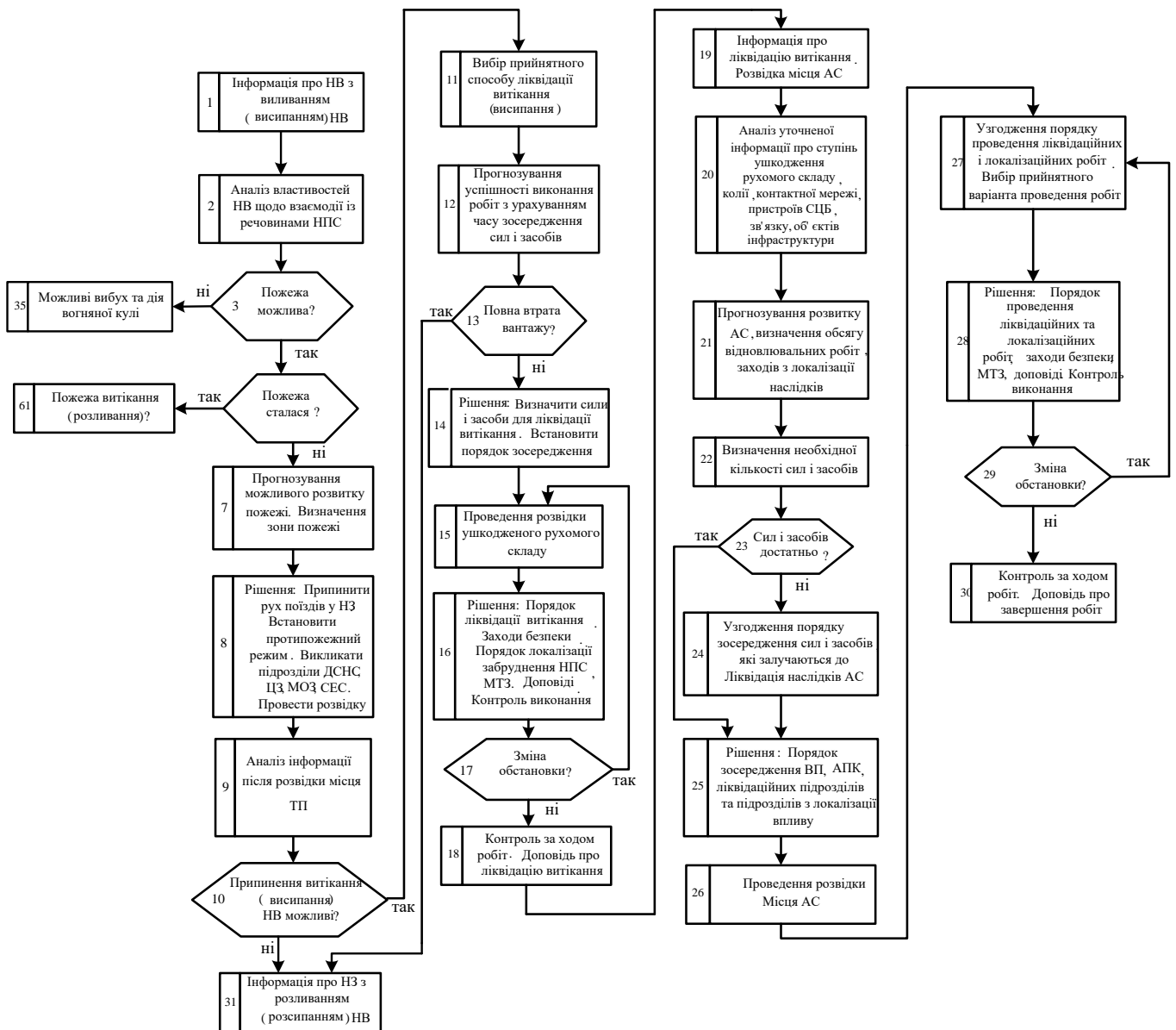


Рис. 3.8. Структурно-логічна схема дій оперативної штабу у аварійній ситуації, пов'язаній з розливанням (розсипанням) небезпечного вантажу

Своєчасна і повна інформація про залізничну аварійну ситуацію дає можливість правильно оцінити обстановку, що склалася, визначити обсяги і умови виконання невідкладних робіт, потребу у силах та засобах для цих робіт та

послідовність їх зосередження у зоні такої ситуації. Кожна неточність інформації, зволікання у її добуванні та передачі для аналізу призводить до затримки прийняття рішення й, отже, до втрат вантажу і забруднення довкілля.

При визначенні можливості припинення витікання (висипання) небезпечного вантажу, аналізуються варіанти проведення цього заходу та вибирається найбільш прийнятний спосіб ліквідації витікання.

Враховуючи те, що сили й засоби, які повинні взяти участь у ліквідаційних роботах, знаходяться у місцях постійної дислокації й потрібний час щодо їх зосередження, здійснюється прогнозування успішності проведення робіт з урахуванням часу зосереджених підрозділів та часу їх підготовки до проведення необхідних робіт.

Якщо за цей проміжок часу витрати вантажу не є критичними, тобто, наприклад, вартість залишку вантажу набагато більша за витрати на зосередження та проведення необхідних заходів силами і засобами, то приймається рішення щодо зосередження ліквідаційних підрозділів у прийнятому порядку.

Якщо за встановлений проміжок часу вантаж повністю розливається на рельєфі місцевості, тобто відбувається повна втрата вантажу, то діяльність оперативної штабу організовується за відповідним алгоритмом, який буде розглянутий нижче.

Із прибуттям визначених підрозділів на місце залізничної аварійної ситуації проводиться розвідка з метою уточнення обставин щодо організації проведення ліквідації витікання вантажу.

На підставі інформації розвідки приймається рішення щодо ліквідації витікання, встановлюються заходи безпеки і попередження, порядок проведення локалізації забруднення довкілля, порядок надання доповідей про хід робіт, матеріально-технічного забезпечення.

При зміні поточної обстановки, надається відповідна доповідь, у разі необхідності проводиться додаткова розвідка та уточнюється порядок проведення робіт.

Із закінченням робіт з ліквідації витікання (висипання) небезпечного вантажу, здійснюється розвідка місця сходу (зіткнення) рухомого складу з рейок та його ушкодження.

Аналіз інформації, отриманий за результатами такої розвідки, дає можливість уточнити стан аварійного рухомого складу та об'єктів інфраструктури залізниці, визначити обсяги відновних робіт та додаткових заходів щодо проведення локалізаційних робіт.

Відповідно до встановленого обсягу робіт визначається необхідна кількість ліквідаційних підрозділів. Якщо таких підрозділів залізничного транспорту недостатньо, то узгоджується порядок зосередження підрозділів сторонніх організацій, які залучаються до проведення робіт. За умови, що рельєф місцевості не є прохідним, то ці підрозділи зосереджуються за допомогою залізничного транспорту.

Порядок зосередження відновних поїздів, аварійно-польових команд, летючок зв'язку, інших підрозділів теж визначається відповідним рішенням.

Після зосередження підрозділів на місці проведення робіт, здійснюється розвідка з метою узгодження порядку проведення робіт залізничними ліквідаційними підрозділами, час і місце проведення спільних з підрозділами інших організацій робіт, встановлюється система обміну даними про хід робіт і зміни обстановки та порядок надання взаємної допомоги.

Розглянемо порядок дій оперативної штабу у залізничній аварійній ситуації, коли ушкодження рухомого складу, який зійшов з рейок, спричинило розливання (розсипання) небезпечного вантажу на рельєф місцевості і є можливість вибуху (рис. 3.9).

При отриманні первинної інформації від локомотивної бригади чи інших працівників залізниці, що перебувають на місці транспортної події, про те що трапилося, проводиться аналіз властивостей небезпечного вантажу щодо характеру його взаємодії з речовинами природного середовища. За умови, що взаємодія небезпечного вантажу з довкіллям може призвести до вибуху, здійснюється

прогнозування розмірів зон розливу небезпечного вантажу (зон можливої пожежі), наявності у цих зонах рухомого складу і об'єктів інфраструктури залізниці.

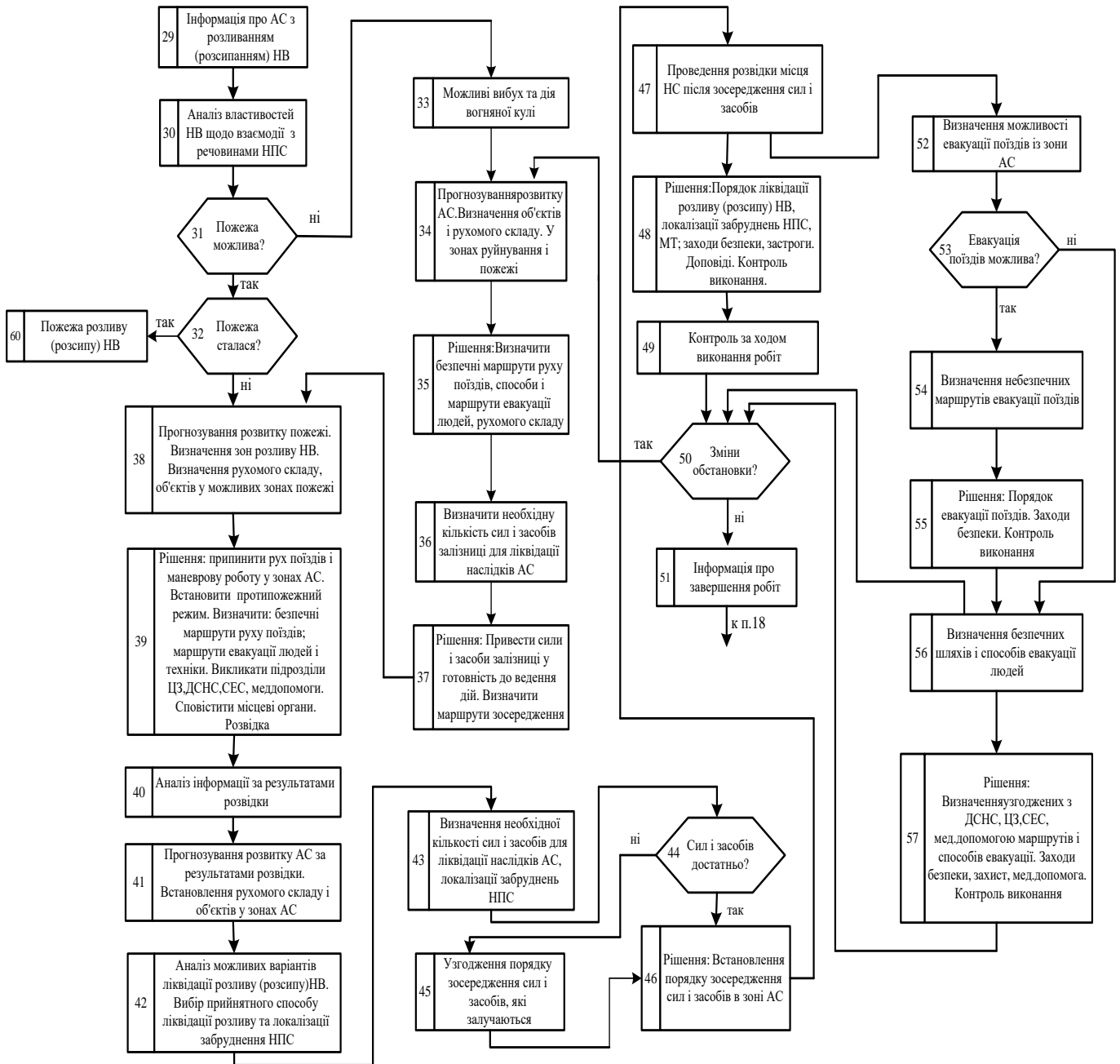


Рис. 3.9. Структурно-логічна схема дій оперативної штабу під час ліквідування аварійної ситуації, пов'язаній з можливістю вибуху небезпечного вантажу

За результатами такого прогнозування приймається рішення щодо припинення руху поїздів і маневрової роботи у зонах розливу, встановлення протипожежного режиму. Визначаються безпечні маршрути руху поїздів, маршрути

евакуації людей і техніки. Оповідчаються спеціальні підрозділи Цивільного захисту, державні служби з аварійних ситуацій, медичної допомоги СЕС та місцеві органи влади. Визначаються маршрути і завдання груп розвідки.

За умови, що взаємодія небезпечного вантажу і довкілля може призвести до вибуху з утворенням вогняної кулі, здійснюється прогнозування можливих зон різного ступеня руйнування від дії ударної хвилі вибуху та пожежі об'єктів залізниці і рухомого складу.

На підставі отриманих даних такого прогнозу приймається рішення щодо визначення безпечних маршрутів руху поїздів, способів і маршрутів евакуації людей, рухомого складу та техніки, а також об'єктів для укриття людей і техніки. Сповідчаються органи ЦЗ, ДСНС, СЕС, медичної допомоги та місцеві органи влади. Визначаються необхідні сили і засоби функціональної системи реагування на аварійні ситуації залізниці, які приводяться у готовність до виїзду на місце аварійної ситуації.

За результатами розвідки зон розливу небезпечного вантажу здійснюється прогнозування розвитку аварійної ситуації, встановлюються об'єкти і рухомий склад у таких зонах, розглядаються можливі варіанти ліквідації розливу та локалізації забруднень навколишнього природного середовища, з яких приймається найбільш прийнятний. У відповідності з цим варіантом дій, визначається необхідна кількість сил і засобів залізниці для ліквідації наслідків аварійної ситуації.

При дефіциті сил і засобів однієї залізниці узгоджується порядок зосередження підрозділів сусідніх залізниць, інших міністерств і відомств. Зосередження визначених сил і засобів здійснюються на підставі відповідного рішення керівника оперативної штабу.

Після прибуття на місце залізничної аварійної ситуації начальника оперативного штабу і керівників підрозділів, на підставі даних проведеної розвідки, уточнюється порядок проведення робіт, який вводиться в дію рішенням керівника оперативного штабу. У цьому рішенні визначаються аварійні об'єкти, строки виконання робіт, заходи безпеки, порядок подання інформації та види забезпечення.

На підставі інформації розвідки про обстановку у зонах розливу небезпечного вантажу оперативною групою визначається можливість евакуації поїздів. При можливості здійснення евакуації поїздів рішенням керівника оперативної штабу визначається безпечний маршрут і порядок руху.

При неможливості евакуації поїздів, спільно з представниками ЦЗ, ДСНС, СЕС, медичної допомоги визначаються можливі маршрути і способи евакуації людей, які затверджуються керівником оперативної штабу.

При отриманні інформації про закінчення робіт щодо ліквідації розливу небезпечного вантажу, вживаються заходи щодо організації проведення відновних робіт на місці транспортної події у порядку, який був розглянутий вище.

Розглянемо порядок дії оперативного штабу при отриманні інформації щодо транспортної події з ушкодженням рухомого складу, яке призвело до пожежі витікання або до пожежі розливу небезпечного вантажу (рис. 3.10).

При отриманні повідомлення про пожежу витікання небезпечного вантажу з ушкодженого вагона аварійного поїзда, здійснюється аналіз небезпечних властивостей вантажу при його горінні та прогнозування пожежної обстановки при горінні витоку.

Прогнозування можливої пожежної обстановки може здійснюватись, наприклад, за допомогою продукційних правил, які детально описані у роботах [55, 92, 95, 97, 151, 159,].

У разі отримання інформації про розливання небезпечного вантажу із ушкодженого вагона здійснюється аналіз небезпечних властивостей при горінні небезпечного вантажу та прогнозування пожежної обстановки з урахуванням рельєфу місцевості, визначаються розміри розливу (зони пожежі) та об'єкти, які можуть у ньому знаходитися.

Після визначення можливих варіантів розвитку пожежної обстановки, керівник оперативної штабу узгоджує з керівником гасіння пожежі питання щодо організації зосередження пожежних підрозділів залізниці, евакуації поїздів із зони розливу, рухомого складу і техніки. Узгоджується також питання матеріально-

технічного та інших видів забезпечення, особливо забезпечення засобами пожежогасіння.

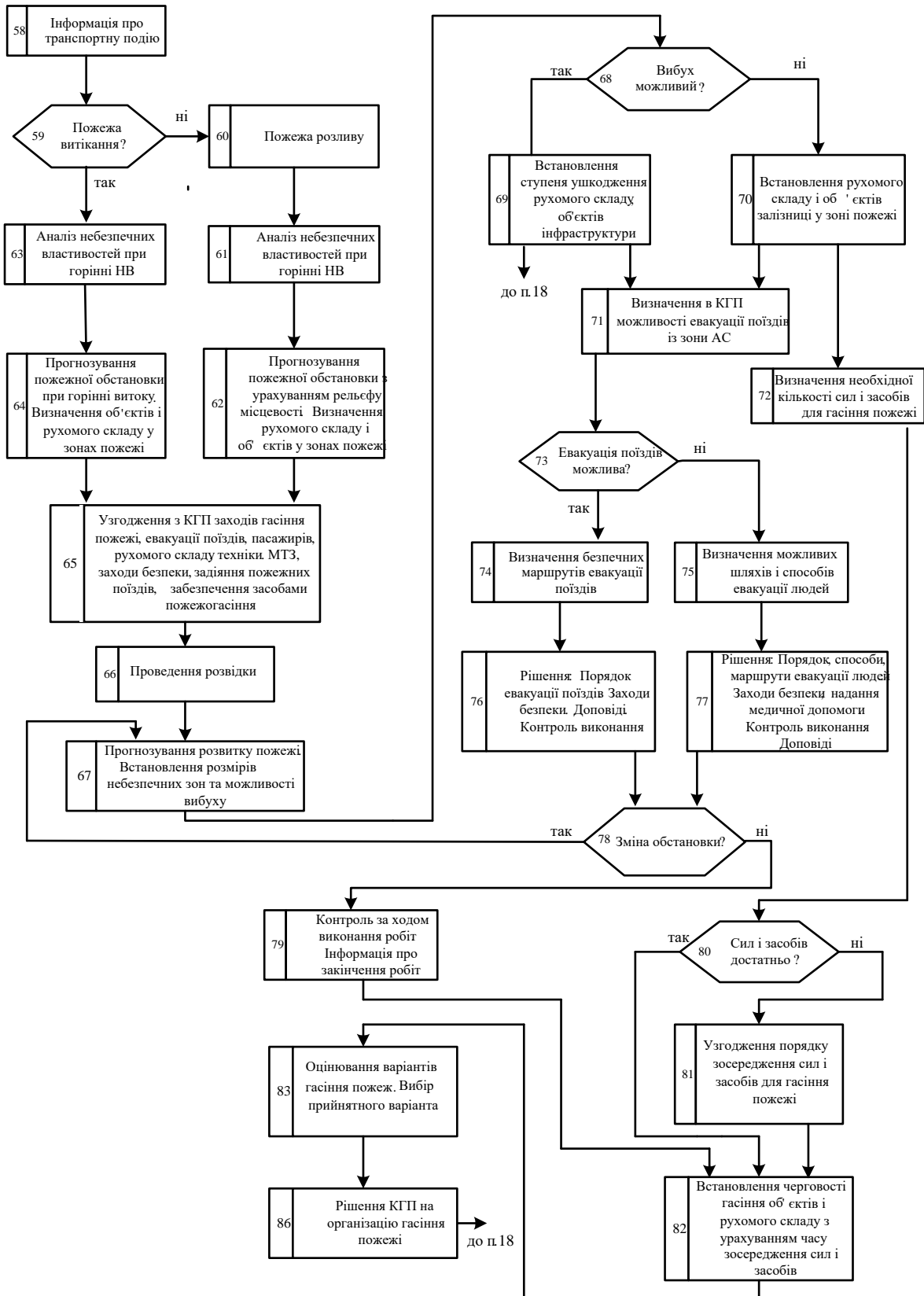


Рис. 3.10. Структурно-логічна схема дій оперативного штабу у аварійній ситуації, пов'язаній з пожежею витікання або пожежею розливу небезпечного вантажу



За результатами проведеної розвідки уточнюються параметри розвитку пожежі, встановлюються її розміри. Прогнозується також й можливість виникнення вибуху. У разі можливості виникнення вибуху, встановлюються зони різних ступенів ушкодження рухомого складу і об'єктів, а також об'єкти і рухомий склад, які потерпають від пожежі – спалаху (вогняної кулі).

Одночасно прогнозується можливий обсяг відновних робіт, заходів локалізації впливу небезпечних чинників аварійних ситуацій на навколишнє природне середовище.

Однією із важливіших проблем у таких ситуаціях є проблема встановлення можливості евакуації поїздів із зон аварійної ситуації, яку керівник оперативної штабу розв'язує спільно з керівником гасіння пожежі.

При можливості евакуації поїздів, керівником операції штабу визначаються безпечні маршрути руху, організується евакуація пасажирських поїздів, поїздів з небезпечними вантажами, інший рухомий склад, встановлюються необхідні заходи безпеки, визначається порядок надання інформації.

У разі неможливості евакуації поїздів, керівником оперативної штабу спільно з керівником гасіння пожежі, представниками цивільного захисту, СЕС, медичної допомоги визначаються можливі шляхи і способи евакуації людей. Встановлюються необхідні заходи безпеки і застороги, надання медичної допомоги та порядок подання доповідей.

Для організації гасіння пожежі, керівник гасіння пожежі здійснює розрахунок необхідної кількості пожежних підрозділів. При необхідності, з оперативною групою узгоджується порядок зосередження цих підрозділів на місці аварійної ситуації.

Рішенням керівника гасіння пожежі вибирається найбільш прийнятний варіант організації гасіння пожежі.

Після закінчення процесу пожежогасіння, керівник оперативної штабу спільно з керівниками підрозділів, на підставі даних розвідки, визначають завдання підрозділами щодо організації відновних робіт на місці залізничної аварійної ситуації.

### 3.5.2. Ситуації, спричинені актами незаконного втручання в діяльність залізничного транспорту

Акти незаконного втручання можуть призвести до типових аварійних ситуацій, але ці акти треба розглядати окремо саме з метою їх недопущення або протидії.

Для безпечного функціонування залізничного транспорту значну роль відіграє протидія актам незаконного втручання в діяльність залізничного транспорту, які вчиняються окремими особами або групами осіб (зловмисниками), внаслідок чого рівень транспортної безпеки на об'єктах інфраструктури та рухомому складі знижуються нижче гранично допустимого, завдаються шкода життю або здоров'ю пасажирів та інших осіб, докільню і значні матеріальні збитки.

Ефективну протидію зловмисникам, на наш погляд, можна здійснити за двома напрямками.

Перший напрям пов'язаний із інформаційним впливом на зловмисників, на їх свідомість і волю за допомогою методів рефлексійного управління [34, 36].

Ці методи призначені для маніпулювання зловмисником, його емоційно-вольовою сферою, свідомістю, вони є інструментом психологічного тиску з метою явного чи прихованого спонукання його до рішень і дій із шкодою для власних інтересів.

Власне, методи рефлексійного управління є методами проведення інформаційного протистояння із зловмисником, яке передбачає передавання йому неправильної інформації про стан об'єктів і рухомого складу, порядку їх функціонування та ступеня захищеності тощо. Певне значення для виявлення його задумів і цілей має проведення агентурних заходів, інформаційне спонукання його до дій, які пов'язані із завчасною втратою ресурсів та часу, або, навпаки, до спізнілих дій .

Суттєвим, для виведення зловмисника із стану психологічного та емоційної рівноваги, є здійснення на нього психологічного тиску, демонстрація різних юридичних та інших загроз, дискредитація в очах населення тощо.

Велику роль у прогнозуванні поведінки зловмисників, визначенні ефективних методів протидії їхнім злочинним намірам, відіграє підхід

запропонований в роботах В.О. Лефевра [212, 213]. Запропонований ним математичний інструмент дозволяє із застосуванням методів штучного інтелекту та інформаційних технологій моделювати рефлекторну поведінку протистояння із зловмисниками, враховувати їх можливі дії та розробляти ефективні заходи протидії.

Інший напрям пов'язаний із оцінюванням ризиків актів незаконного втручання, тобто з визначенням відповідних аварійних ситуацій і сценаріїв їх розвитку, для оцінювання уразливості (рівня захищеності) об'єктів інфраструктури і рухомого складу від потенційних чинників небезпеки, що несуть загрозу життю і здоров'ю людей, докільню або зменшують рівень транспортної безпеки нижче гранично допустимого. Аналіз ризиків дозволить визначити можливі наслідки вчинення таких актів, виявити слабкі місця і недоліки у існуючій або проектній системі захищеності, визначити і реалізувати організаційно-технічні заходи щодо протидії ним [214 – 218].

### **3.5.3. Розрахунок величин відвернених збитків від забруднення атмосферного повітря**

Проведення занять з членами оперативних штабів щодо оцінювання обстановки, яка склалася у результаті аварійної ситуації при транспортуванні небезпечних вантажів, прогнозування розвитку небезпечних чинників цієї ситуації, розроблення узгоджених планів дій ліквідаційних підрозділів, а також впровадження у роботу штабів структурно-логічних схем їхніх дій дозволило скоротити час на підготовку і прийняття раціонального рішення керівника ліквідації аварійної ситуації та інтенсифікувати проведення комплексу ліквідаційних заходів на 10-15% у порівнянні з раніше існуючою системою підготовки та прийняття рішень.

Скорочення часу  $\tau$  на прийняття своєчасного і обґрунтованого рішення керівника оперативного штабу інтенсифікація проведення комплексу робіт призводить до зменшення на 10-15% маси  $M_i$  забруднюючої речовини, що була викинута у повітря внаслідок аварійної ситуації.

Визначимо величину збитків  $A_{\phi}$ , які були відвернені внаслідок зменшення терміну  $\tau$  шкідливого впливу на довкілля і життєдіяльність людини небезпечних чинників аварійної ситуації при перевезенні легкозаймистих речовин.

Розрахунок збитків від викидів забруднюючих речовин у повітря здійснюється згідно з існуючим методом й проводиться на основі показника базової ставки компенсації збитків за викид однієї тонни забруднюючої речовини з урахуванням обсягу фактичного забруднення відносної небезпечності забруднюючих речовин та регулюючих коефіцієнтів за формулою [338]:

$$A_{\phi i} = M_i \cdot \Pi_i \cdot A_i \cdot K_T \cdot K_{zi}, \quad (3.28)$$

де  $A_{\phi i}$  – збитки від забруднення атмосферного повітря, гривень;

$M_i$  – маса  $i$ -ї забруднюючої речовини, що була викинута у повітря внаслідок аварійної ситуації з моменту виявлення викиду до моменту його усунення, тон.  
Розрахунок детально розглянутий у другому розділ цієї роботи;

$\Pi_i$  – базова ставка компенсації збитків у частках мінімальної заробітної плати за одну тонну умовної забруднюючої речовини, гривень/тонну;

$A_i$  – безрозмірний показник відносної небезпечності забруднюючої речовини;

$K_T$  – коефіцієнт урахування територіальних соціально-екологічних особливостей;

$K_{zi}$  – коефіцієнт забруднення атмосферного повітря в населеному пункті.

Безрозмірний показник відносної небезпечності забруднюючої речовини розраховується за формулою [338]:

$$A_i = 1/\text{ГДК}_i, \quad (3.24)$$

де  $\text{ГДК}_i$  - середньодобова гранично допустима концентрація (ГДК) або орієнтовно безпечний рівень впливу (ОБРВ)  $i$ -ої забруднюючої речовини, мг/куб. метр. У чисельнику вводиться коефіцієнт 10 для речовин з ГДК понад одиницю. Наприклад, для бензину з  $\text{ГДК} = 100\text{мг/м}^3$   $A_i = 0,1$ .

Коефіцієнт урахування територіальних соціально-економічних особливостей залежить від чисельності жителів у населених пунктах зони аварійної ситуації, економічного, рекреаційного та природоохоронного значення території [338]:

$$K_T = K_{\text{нас}} \cdot K_{\phi}, \quad (3.25)$$

де  $K_{\text{нас}}$  – коефіцієнт, що залежить від чисельності жителів населеного пункту;

$K_{\phi}$  – коефіцієнт, що враховує господарське значення населеного пункту. Для залізничних станцій з радіусом небезпечної зони у 200 м приймається:  $K_{\text{нас}} = 1$ ;  $K_{\phi} = 1,25$ ;  $K_{z_i} = 1$ .

Для визначення величини уникнених збитків  $A_i$ , у формулі (3.24) маса  $M_1$  є масою легкозаймистої речовини вихід якої у повітря було відвернене.

Величина щорічних відвернених збитків буде:

$$A_{\phi} = \sum_{i=1}^n A_i, \quad (3.26)$$

де  $n$  – щорічна кількість аварійних ситуацій при транспортуванні легкозаймистих речовин, випадків.

Проведені розрахунки показують, що у 2012 році величина збитків, яким вдалося запобігти, становить 1,135 тис. грн., у 2013 році – 1,160 тис. грн., величина збитків, які були відвернуті у 2014 році, становить 1,381 тис. грн., у 2015 році – 1,510 тис. грн, величина уникнених у 2016 році збитків становить 1,114 тис. грн. Тобто за період з 2012 року по 2016 рік середня величина щорічних відвернених збитків, становить 1,260 тис. грн.

### **3.6. Напрями підвищення ефективності застосування пожежних та відновних поїздів для ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами**

Пожежні поїзди призначені для гасіння пожеж на об'єктах та в рухомому складі залізничного транспорту, а також для надання допомоги при ліквідації наслідків транспортних подій, повені та інших стихійних лих у межах їх тактико-технічних можливостей [175].

Пожежні поїзди першої та другої категорії мають у своєму складі вагон-насосну станцію та дві цистерни-водосховища. Пожежні поїзди першої категорії додатково оснащені вагоном-гаражем з пожежним автомобілем, мають 7500 кг піноутворювача (у пожежних поїздах другої категорії – 5000 кг). Вони оснащені пожежною технікою, обладнанням, інструментом, спорядженням, спецодягом, засобами сигналізації та зв'язку, паливно-мастильними матеріалами, індивідуальними засобами захисту органів дихання та хімічного захисту тощо

згідно з типовими таблицями оснащення та здатні подавати для гасіння пожеж воду і повітряно-механічну піну.

На жаль, вітчизняні пожежні поїзди не спроможні здійснювати перекачування агресивних рідин і нафтопродуктів з аварійних залізничних цистерн у резервні і готувати нейтралізуючі розчини. У своєму складі вони не мають устаткування для вуглекислотного та порошкового пожежогасіння, прилади для усунення витоків з ушкоджених котлів залізничних цистерн, приміщення для санітарної обробки особового складу, дегазації і дезактивації пожежно-технічного озброєння та спорядження [175 –179].

Нині на залізницях більшості європейських країн застосовуються пожежні аварійно-рятувальні поїзди модульного типу.

Основою таких поїздів є самохідна платформа (рис. В. 1, Додаток В), на якій, за необхідності, розміщується цистерна з вогнегасною речовиною (рис. В. 2, Додаток В), прилади для подавання води і піни, електросилове обладнання, станція зарядження балонів повітрям для ізолюючих протигазів, інструменти і спорядження (рис. В. 3, Додаток В), рятувальний модуль (рис. В. 4, Додаток В) і таке інше.

На рис. В. 5, Додаток В надані можливі склади вітчизняного самохідного модульного автоматизованого пожежного поїзда [175].

Такі платформи можуть самостійно прямувати до місця пожежі, або з'єднуватися у поїзди різного складу. Управління приладами подавання вогнегасних речовин здійснюється з кабіни машиніста, але передбачене й виносне обладнання.

Модульна технологія дозволяє трансформувати властивості пожежного поїзда шляхом перекомпонування його модулів, які функціонально пов'язані один з одним, ефективно модернізувати застаріле обладнання за рахунок швидкого встановлення нового обладнання без суттєвих доробок цього обладнання та комплектувати необхідний склад [175].

Для оснащення пожежних поїздів зарубіжних країн застосовуються високопродуктивні установки подавання вогнегасних речовин з продуктивністю у два й більше разів, ніж у існуючих вітчизняних.

За характеристиками водовіддавання і можливих площ гасіння пожеж такий пожежний поїзд еквівалентний двом існуючим пожежним поїздам вітчизняних

залізниць. Крім цього, європейські поїзди можуть подавати на пожежу, крім води та повітряно-механічної піни, порошкові склади, а деякі з них – ще й інертні газы та хімічні піни.

Сучасні пожежні поїзди мають також установки комбінованого пожежогасіння та стволи із змінюваною геометрією струменя. Особовий склад укомплектовано захисними костюмами для роботи в умовах ліквідування аварійних ситуацій з небезпечними вантажами.

Аналіз аварійних карток свідчить про те, що у складах вітчизняних пожежних поїздів для гасіння деяких небезпечних вантажів, які перевозяться залізницями країни, недостатньо мати тільки воду та повітряно-механічну піну [175].

В існуючих аварійних картках, які регламентують первинні оперативні дії працівників залізничного транспорту та спецформувань, причетних до ліквідації наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами при перевезенні їх магістральним залізничним транспортом, на жаль, не враховується рід вагона, тип контейнера і вид відправки (вагонна, контейнерна), що не конкретизує вид вогнегасної речовини, яку треба застосувати для ефективного пожежогасіння. Крім цього рекомендації аварійних карток не враховують властивості новітніх небезпечних вантажів.

Аналіз можливості гасіння пожеж різних небезпечних вантажів поданий у таблиці 3.3.

*Таблиця. 3.3*

**Відносна кількість найменувань небезпечних вантажів, для гасіння яких необхідні різні вогнегасні речовини**

Клас безпеки вантажу	Можливість гасіння пожеж за допомогою:			
	Води (тонко-розпиленої води), повітряно-механічної піни, %	Порошкових складів, %	Порошкових складів або інертних газів, %	Порошкових складів або хімічної піни, %
1	99,75	0,25		
2	92,8		7,2	
3	98,06	1,81		0,13

Продовження табл.3.3

4.1;4.2;4.3	63,1	36,9		
5.1;5.2	100			
6.1;6.2	99,34	0,66		
7	100			
8	88,7	11,3		
9	100			

Результати, які надані в таблиці 3.4, свідчать про те, що на озброєнні вітчизняних пожежних поїздів також мають бути установки для подавання порошкових складів, інертних газів та хімічної піни в зону горіння небезпечних вантажів класів 1; 2; 3; 4.1; 4.2; 4.3; 6.1; 6.2 та 8.

В ПАТ «Українська залізниця» зараз, на жаль, відсутня програма уніфікації та удосконалення існуючих пожежних поїздів з розширенням їх тактичних можливостей щодо гасіння пожеж більш ефективними вогнегасними речовинами, усунення витоків і розливів небезпечних речовин з аварійних залізничних цистерн, а також проведення аварійно-рятувальних робіт

Для управління діями пожежних підрозділів на пожежі дуже важливо знати прогноз розвитку пожежі з небезпечними вантажами для прийняття керівником гасіння пожежі своєчасного обґрунтованого рішення.

Проблема створення системи підтримки прийняття рішень керівника гасіння пожеж небезпечних вантажів при перевезенні їх залізничним транспортом докладно висвітлена в роботах [55, 66, 92, 104 – 106, 108, 109, 112, 146, 147, 153, 154, 157, 158, 179 –182].

У деяких країнах світу на озброєння пожежних поїздів прийняті пожежні роботи для гасіння продуктів газонафтопереробки, які здатні працювати на відстані 300 м від пожежного поїзда. На рис. В. 6, Додатка В зображений модульний пожежний поїзд Швейцарії, а на рис. В. 7 Додатка В пожежний робот виробництва Німеччини, який використовується у пожежних поїздах деяких європейських країн.

З урахуванням обставин, які були відмічені вище, окремої уваги заслуговує питання дислокації пожежних поїздів на залізницях країни.



На наш погляд, було б доцільно проаналізувати потоки перевезення небезпечних вантажів і пасажиропотоки, та з урахуванням об'єктів підвищеної безпеки інфраструктури залізниць і промисловості, визначити ризики від аварій і катастроф з такими вантажами й, на цій підставі, встановити кількість і місця знаходження пожежних поїздів на залізницях. Крім цього, залежно від класів небезпечних вантажів, що частіше перевозяться за певними маршрутами, визначити озброєність пожежних поїздів, що дислокуються на цих маршрутах, встановити єдині норми укомплектування особовим складом, збільшити технічний потенціал та механізувати технологічні процеси гасіння пожеж.

Для ефективної ліквідації наслідків аварій і катастроф за участю небезпечних вантажів було б доцільно створити єдину автоматизовану систему управління діями пожежних підрозділів усіх міністерств і відомств, що дало б можливість виробляти своєчасні ефективні рішення та оптимізувати діяльність пожежних підрозділів, які залучаються для ліквідації таких транспортних подій [175, 182].

Таким чином для модернізації пожежних поїздів залізничного транспорту необхідно розробити концепцію їх побудови, оснащення, утримання та бойового застосування, визначити місця дислокації та чисельність. З метою ефективного управління силами пожежної охорони усіх міністерств і відомств країни розробити і впровадити єдину автоматизовану систему аналізу обстановки та прийняття рішень на локалізацію наслідків аварій і катастроф, що супроводжуються пожежами небезпечних вантажів при їх перевезенні залізничним транспортом.

Відновний поїзд (ВП) залізниць України є спеціальним формуванням, призначеним для ліквідації наслідків сходжень з рейок і зіткнень рухомого складу, а також для надання допомоги під час інших аварійних ситуацій. Він є структурним підрозділом дирекції залізничних перевезень залізниці [174].

Проходження відновних і пожежних поїздів до місця аварійної ситуації забезпечується переважно над усіма поїздами.

Якщо вантажопідіймальний кран відновного поїзда має обмеження швидкості, то він відправляється окремим локомотивом слідом за відновним поїздом у супроводі представника кранової бригади.

Швидкість руху пожежного та відновного поїздів на дільниці повинна відповідати встановленій швидкості із дотриманням діючих обмежень за станом колії та рухомого складу цих поїздів.

Відновні поїзди формуються зі спеціально обладнаних вантажних і пасажирських вагонів, вантажопідіймальних кранів на залізничному ходу. Тягова техніка, механізми, устаткування, інвентар, матеріали розміщуються у вагонах та на платформах.

Кількість пасажирських вагонів, вагонів-гаражів і платформ визначається наявністю у відбудовному поїзді вантажопідіймачів, тракторів і тягачів. Базова схема формування відбудовного поїзда показана на рис. В. 8, Додатка В.

Відновні поїзди обладнуються поїзним радіозв'язком і внутрішнім зв'язком; оснащення іншими механізмами, устаткуванням, інвентарем і матеріалами здійснюється відповідно до Положення [174].

Виправдало себе в роботі створення при відновних поїздах аварійно-відновних летючок на базі автомобілів, які укомплектовуються різними піднімальними засобами й пристроями. Такі летючки ефективно використовуються для піднімання рухомого складу, що зійшов з рейок, на станціях, до яких є під'їзди.

Велику допомогу при ліквідації наслідків сходжень з рейок рухомого складу надають аварійно-польові команди (АПК), які розташовуються, як правило, на великих станціях. Місця розміщення команд, комплектування особового складу, призначення керівника, порядок навчання, а також умови стимулювання працівників аварійно-польових команд за своєчасну ліквідацію сходжень рухомого складу встановлюються начальником дирекції залізничних перевезень. Необхідне устаткування АПК розміщується в вантажних вагонах або в закритих приміщеннях. При цьому повинен бути обумовлений порядок доставки устаткування й механізмів до місця робіт (на локомотиві, дрезині, автомобілі). Наявний в АПК набір устаткування, пристроїв і інструментів дозволяє виконати багато операцій до прибуття відновних поїздів. У багатьох випадках за допомогою АПК здійснюється постановка на рейки рухомого складу, що зійшов. Якщо перегін звільнити за

допомогою АПК неможливо, то до прибуття відновного поїзда вони проводять підготовчі роботи.

Аналіз статистичних матеріалів про роботу відновних поїздів при ліквідації наслідків сходжень із рейок рухомого складу, який проведений в Укрзалізниці, свідчить про те, що на процес відновлення руху поїздів суттєво впливають такі важливі чинники, як збір працівників відновного поїзда, час випробування автогальм, час прямування поїзда до місця події, виконання комплексу робіт із підймання рухомого складу, відновлення колії штучних споруд, контактної мережі тощо. При цьому величина середнього значення терміну часу з моменту виклику відбудовного поїзда до прибуття на місце події складає понад 3 – 3,5 год. Діапазон цих значень по Укрзалізниці становить від 50 хв. до 6 год. і більше [174]. Час безпосереднього підймання рухомого складу – величина змінна й залежить від характеру сходження, умов виконання робіт й ефективності відбудовних заходів, а також від професійних навиків працівників відновного поїзда.

На залізничному транспорті визначені основні принципи вибору способів постановки рухомого складу на рейки, заходи щодо прискорення відбудови контактної мережі, встановлені нормативи часу на відновлення руху поїздів, відбудови контактної мережі і залізничної колії, визначений порядок проведення відновних робіт у важкодоступних місцях і розроблені відповідні технічні карти. Окрема увага приділена розробці вимог безпеки під час проведення аварійно-відновних робіт та надання медичної допомоги постраждалим в аваріях і катастрофах [57, 183].

Досвід проведення аварійно-відновних робіт і гасіння пожеж свідчить, що зосередження та введення сил і засобів для виконання завдань щодо локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків має здійснюватися у найкоротший час.

Після прибуття ліквідаційних і пожежних підрозділів одночасно з розвідкою здійснюється розгортання (бойове розгортання), яке є приведенням сил і засобів у стан готовності для виконання завдань за призначенням. Воно не повинно порушувати виконання робіт з рятування та евакуації людей.

Розгортання містить такі етапи: підготовку до розгортання, попереднє розгортання та повне розгортання.

Виконання того чи іншого етапу розгортання залежить від повноти даних про обстановку, що склалася на місці транспортної події, повинно відповідати результату оцінки обстановки та виконуватися раціональним способом з найменшою витратою часу.

### **3.7. Основні завдання з підвищення ефективності функціональної підсистеми залізничного транспорту щодо запобігання і реагування на аварійні ситуації**

Забезпечення безпеки життя і здоров'я пасажирів залізниць, безпека руху поїздів та охорона природного середовища є одним з пріоритетних завдань усіх ланок керівництва залізничного транспорту. Особлива увага приділяється розробленню, впровадженню і виконанню організаційно-технічних заходів, пов'язаних з перевезенням небезпечних вантажів різних класів небезпеки, серед них заходів, спрямованих на локалізацію та ліквідацію наслідків залізничних аварійних ситуацій.

Функціональна підсистема «Сили і засоби реагування на надзвичайні ситуації на залізничному транспорті», що складена на базі підпорядкованих Укрзалізниці підприємств, установ, організацій та їх структурних підрозділів, щодо запобігання і реагування на аварійні ситуації техногенного та природного характеру (далі – функціональна підсистема) є складовою частиною єдиної державної системи, яка створюється з метою вироблення механізму взаємодії з відповідними силами та засобами, які здійснюють у межах своєї компетенції нагляд за безпекою руху, організують проведення роботи щодо запобігання аварійним ситуаціям техногенного та природного походження та реагування в разі їх виникнення для захисту персоналу та довкілля, зменшення матеріальних витрат, а також забезпечення сталого функціонування залізничного транспорту.

Функціональна підсистема складається з постійно діючих структурних

підрозділів, визначених у структурній схемі управління, і має три рівні: регіональний, місцевий та об'єктовий.

Одним з основних завдань функціональної підсистеми є реагування на аварійні ситуації та ліквідація їх наслідків, що являє собою скоординовані дії її структурних підрозділів щодо реалізації планів дій, уточнених в умовах конкретного виду та рівня аварійної ситуації з метою надання невідкладної допомоги потерпілим, усунення загрози життю та здоров'ю персоналу, відновлення нормальної роботи транспорту у можливо короткий термін.

Найефективніше завдання організації ліквідації залізничних аварійних ситуацій можуть бути розв'язані при наявності єдиного центру керування усіма різнорідними ліквідаційними підрозділами, де в реальному масштабі часу, а також на випередження, приймаються своєчасні та обґрунтовані управлінські рішення. Саме в цьому напрямі і повинні розширюватися функціональні можливості підсистеми залізничного транспорту щодо запобігання і реагування на аварійні ситуації, чому присвячені наступні розділи дисертації.

### **Висновки до розділу 3**

У третьому розділі дисертаційної роботи на підставі методів теорій систем і прийняття рішень, системного аналізу, математичного моделювання екологічних процесів реагування на аварійні ситуації, нормативних документів щодо визначення заходів безпеки і порядку ліквідування залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами отримано такі результати:

1. Встановлено, що під час виникнення залізничної аварійної ситуації керівнику оперативного штабу в складних умовах відсутності повної та достатньої інформації про причинно-наслідкові зв'язки між компонентами такої ситуації необхідно приймати певну кількість індивідуальних, колегіальних, інформаційних, організаційних, оперативних рішень, спрямованих на узгодження, координацію та управління підлеглими пунктами управління та ліквідаційними підрозділами, яка може перевищувати його можливості щодо прийняття таких рішень та/або впливати на їх обґрунтованість.

2. Прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо локалізації залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами та ліквідації їх наслідків повинно здійснюватися за допомогою систем підтримки прийняття рішень, для створення яких слід використовувати запропоновані математичні моделі прогнозування розвитку таких ситуацій та структурно-логічні схеми дій керівників оперативного штабу.

3. Формалізовано систему залізничних перевезень небезпечних вантажів у вигляді орієнтованого графу станів безпечного функціонування системи виникнення аварійної ситуації, її оцінювання, локалізації та ліквідації її наслідків.

4. Розроблені математичні моделі, які доведені до рівня практичних розрахунків ймовірностей перебування системи залізничних перевезень небезпечних вантажів у стані безпечного функціонування залежно від тих чи інших технологічних та організаційних заходів підтримання системи у стані надійності.

5. Доведено, що оперативність прийняття своєчасного обґрунтованого рішення з локалізації та ліквідації аварійної ситуації дає очевидний синергетичний ефект у вигляді значного скорочення не лише часу ліквідаційних робіт, а й більш ніж пропорційного йому зменшення негативних наслідків цих ситуацій.

6. Розроблені структурно-логічні схеми дій оперативного штабу у типових ситуаціях ліквідування залізничних аварійних, які ґрунтуються на ситуативних критеріях прийняття рішень, для використання у базі знань СППР керівника оперативного штабу та навчання персоналу.

7. Визначено величини відвернених збитків від забруднення атмосферного повітря внаслідок скорочення часу на прийняття обґрунтованого рішення керівника оперативного штабу та інтенсифікації проведення комплексу ліквідаційних робіт. За період з 2012 р. по 2016 р. середня величина таких відвернених збитків становить 1260 тис. грн.

8. Обґрунтовані параметри майбутнього покоління пожежних аварійно-рятувальних поїздів та їх забезпечення засобами локалізації та ліквідації наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті.

## **РОЗДІЛ 4**

### **НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ БЕЗПЕЧНОГО СТАНУ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ «НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ–АВАРІЙНИЙ ОБ’ЄКТ–ЛІКВІДАЦІЙНІ ПІДРОЗДІЛИ**

Дослідження залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, які проведені у попередніх розділах цієї роботи, свідчать про те, що їхній розвиток має складний характер, кінцевим результатом якого може бути: виникнення тяжких наслідків, пов’язаних з вибухами, пожежами, загибеллю або травмуванням людей, руйнуванням рухомого складу і об’єктів, забрудненням навколишнього середовища тощо. Для наукового обґрунтування ефективного управління процесами відновлення безпечного стану функціонування системи «навколишнє середовище – аварійний об’єкт – ліквідаційні підрозділи» потрібно виділити можливі сценарії їхнього розвитку:

- повільне накопичення негативних чинників аварійної ситуації, але не до рівня їхніх критичних значень, що у свою чергу, не призводить до вибухів або пожежі;
- повільне накопичення негативних чинників аварійної ситуації, їхній вихід за межі критичних значень з подальшим вибухом чи пожежею;
- швидке накопичення негативних чинників аварійної ситуації з їхнім виходом за критичні межі, що призвело до вибуху або пожежі.

Такі аварійні ситуації, як правило, характеризуються неповнотою інформації про розвиток їхніх небезпечних чинників, згубним впливом на людей, довкілля, об’єкти інфраструктури і рухомий склад залізничного транспорту, швидким зростанням з плином часу екологічних, матеріальних, економічних та інших збитків. Для вжиття заходів щодо локалізації таких аварійних ситуацій та ліквідації їх наслідків необхідне залучення певної кількості різноманітних за призначенням ліквідаційних підрозділів залізничного транспорту та інших міністерств і відомств. Причому в процесі організації ліквідаційних робіт необхідно забезпечувати певні критерії їхньої ефективності (ситуативні критерії, які розглянуті вище), досягнути

яких можна лише на підставі науково обґрунтованого прогнозування успішності завершення цих робіт у визначені терміни та за наявних ресурсів.

Розвиток залізничних аварійних ситуацій обумовлює складні умови процесу аналізу обстановки та вироблення керівником оперативного штабу рішення щодо реагування на неї, які, зокрема, характеризуються й дефіцитом часу, пов'язаного з необхідністю найшвидшого відновлення руху поїздів, а також прийманням і усвідомленням ним великої кількості різноманітної інформації про надзвичайну ситуацію, стан та дії локалізаційних підрозділів тощо [52, 56, 60].

Тому ефективне розв'язування завдань локалізації аварійних ситуацій та ліквідації їхніх наслідків потребує застосування сучасних інформаційних технологій, серед них й систем підтримки прийняття рішень [180 – 183, 233 – 240].

Проблемам автоматизації процесів управління реагуванням на залізничні аварійні ситуації з небезпечними вантажами присвячена низка робіт, в яких розглядаються різні аспекти діяльності оперативних штабів залізничних пунктів управління, зокрема роботи [4 – 7, 55, 56, 66 – 68, 70, 120, 116, 146, 147, 151 – 155, 179 – 182, 240 – 242]. Важливим завданням такого оперативного штабу є визначення необхідної кількості сил і засобів для проведення комплексу ліквідаційних робіт, розроблення плану дій ліквідаційних підрозділів, організація контролю за їх проведенням та оцінювання результатів таких дій.

Однією з проблем розроблення плану дій є зосередження аварійних підрозділів з урахуванням місць їхньої постійної дислокації, рельєфу місцевості, наявності джерел водопостачання, розвитку залізничної та дорожньої інфраструктури, метеорологічних умов, характеру змін параметрів небезпечних чинників аварійної ситуації, загальних, пожежо- вибухонебезпечних властивостей небезпечного вантажу тощо. Ця проблема може ускладнюватися за умови, що така ситуація супроводжується пожежею небезпечного вантажу, бо у такому випадку процесу локалізації наслідків цієї ситуації передують процес локалізації пожежі [55, 60, 151 – 155].

Природно, що на успіх проведення локалізаційних робіт вагомо впливають рівень професійної підготовки персоналу і справність технічних засобів.



Процеси виникнення залізничних аварійних ситуацій, їхній розвиток носять складний ймовірнісний характер. Для визначення взаємозалежностей між характером потоку небезпечних чинників аварійної ситуації, продуктивністю сил і засобів ліквідаційних підрозділів та терміну часу, необхідного для їхнього зосередження, на наш погляд, доцільно застосовувати методи теорії масового обслуговування. Тому нижче система «навколишнє середовище – аварійний об'єкт – ліквідаційні підрозділи» розглядається як система масового обслуговування з різними обмеженнями на характер обслуговування вимог.

#### **4.1. Формальний опис дій аварійних підрозділів як процесів функціонування системи масового обслуговування без часових обмежень**

Типові аварійні ситуації, що були розглянуті у другому розділі, є нічим іншим як більш чи менш інтенсивним потоком небезпечних факторів (отруйні гази, висока температура, розлиття небезпечних речовин тощо), що надходять від аварійного вантажу у природне середовище та шкідливо впливають на людей, об'єкти інфраструктури та рухомий склад. Тому є усі підстави розглядати аварійний об'єкт (рухомий склад), на якому здійснюються роботи з локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків, як систему масового обслуговування без часових обмежень на обслуговування «вимог» (небезпечних факторів, на які треба реагувати) та перебування їх у черзі на обслуговування. При такому теоретичному підході можна використати класичні та адаптовані під конкретні задачі математичні методи теорії масового обслуговування (СМО) [242 – 255].

Реагуючи на аварійну ситуацію, на вхід  $n$ -канальної системи масового обслуговування ( $n$  – кількість ліквідаційних підрозділів) надходить найпростіший потік вимог (небезпечних чинників аварійної ситуації) з інтенсивністю  $\lambda$ . Час обслуговування, тобто час проведення ліквідаційних робіт ( $T_{\text{пр}}$ ) – показовий з параметром  $\mu$  [242 – 255]. Процес обслуговування вимоги має таку особливість: перед тим як почати її обслуговування, «прилад обслуговування» яким є пожежний чи відновний поїзд, або аварійний підрозділ, повинен підготуватися до

цього. Час підготовки «приладу обслуговування» складається з часу збору підрозділу, прямування до місця події та розгортання засобів проведення ліквідаційних робіт, тобто становить час зосередження сил і засобів на місці виникнення транспортної події. Час підготовки приладу  $T_{зос}$  має показовий розподіл з параметром  $\nu$ . Вимога, яка застає прилад обслуговування вільним, надходить на обслуговування, вимога, яка застає усі прилади обслуговування зайнятими, стає у чергу й чекає обслуговування.

Тобто випадкова величина  $T_{лік}$  складається з двох фаз підготовки та обслуговування ( $T_{лік} = T_{зос} + T_{пр}$ ), що розподілена за узагальненим законом Ерланга 2-го порядку з параметрами  $\nu$  та  $\mu$ . Закон розподілу щільності ймовірності цього закону виражається формулою [222, 225]:

$$g(t) = \int_0^t \nu e^{-\nu t_1} \mu e^{-\mu(t-t_1)} dt_1 = \frac{\nu\mu(e^{-\nu t} - e^{-\mu t})}{\mu - \nu}, (t > 0) \quad (4.1)$$

$$\text{де: } \nu = \frac{1}{M[T_{зос}]}, f_1(t) = \nu e^{-\nu t}; \mu = \frac{1}{M[T_{пр}]}, f_2(t) = \mu e^{-\mu t}.$$

Потік обслуговування у такій СМО не пуассонівський, тобто система не є марковською, й знайти імовірності станів СМО за методами для марковських процесів з дискретними станами та безперервним часом можливості немає [247 – 260].

Відомо, що порушення пуассонівського розподілу подій у будь-якій СМО переводить її з марковської у немарковську, у результаті чого, безпосереднє складання й використання рівнянь Колмогорова стає неможливим. Тому для аналізу таких СМО найбільш розповсюджені два напрями аналітичних методів аналізу немарковських систем [243, 246, 251 – 259]:

– напрям, який базується на використанні класичної теорії марковських ланцюгів, але потребує для своєї реалізації розширення фазового простору можливих станів досліджуваної системи (метод псевдостанів) [243, 251 – 270, 281 – 283];

– напрям, який пов'язаний з використанням більш складного математичного апарату, але без штучного збільшення станів системи (метод напівмарковських процесів) [246, 255, 271 – 280, 284 – 287].

Обидва ці напрямки мають між собою багато спільного, але розрізняються за своїми можливостями і ступенем складності для проведення розрахунків.

Використання напівмарковського процесу передбачає розглядання поведінки системи тільки у моменти зміни її станів (у моменти стрибків процесу), у результаті чого утворюється ланцюг Маркова. У цьому випадку відсутність післядії реалізується не будь-якої миті часу, як це має місце у марковському процесі, а лише у мить стрибків. Ефективність застосування цього методу залежить від способів задання напівмарковського процесу. У будь-якому випадку повинна бути відомою скінчена множина можливих станів досліджувальної системи, пов'язаних у марковський ланцюг, а також напрями можливих переходів системи з одного стану у інший та її вихідний стан.

Метод псевдостанів використовується тільки при наявності вхідного потоку вимог і потоку обслуговування з пуасонівською функцією розподілу щільності імовірностей, які є композицією експоненційних розподілів з однаковим параметром. Він дозволяє досить просто, з математичної точки зору, використовуючи звичайний запис рівнянь Колмогорова, аналізувати немарківську СМО як у сталому, так й у несталому режимах функціонування. Але цей метод значно ускладнює структуру вихідного графа станів, що призводить до громіздкості обчислювального процесу.

Штучне розширення фазового простору станів немарковської (ерланговської) системи за рахунок введення в неї додаткових (фіктивних) станів, що переводить її у марковську, дозволяє розглядати вихідний немарковський процес ніби вкладеним у інший, більш складний, але з марковськими властивостями процес [157, 158, 255, 288].

Розглянемо функціонування СМО як об'єкт, на якому здійснюються локалізаційні роботи за умови, що є обмеження по довжині черги. Граф станів такої СМО наданий на рис.4.1.

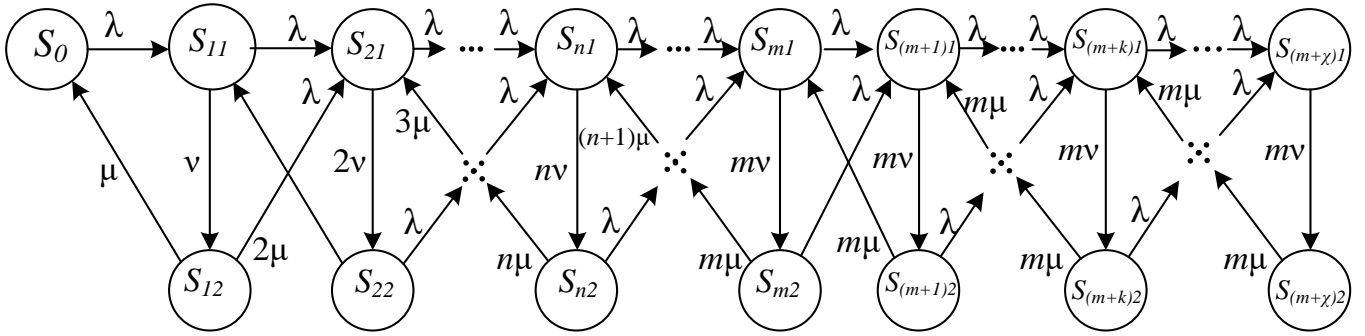


Рис. 4.1. Граф станів СМО з обмеженням по довжині черги

Стани СМО:

$S_0$  – СМО вільна;

$S_{11}$  – у СМО одна вимога, обслуговування у першій фазі;

$S_{12}$  – у СМО одна вимога, обслуговування у другій фазі;

.....

$S_{m1}$  – у СМО  $m$  вимог, обслуговування у першій фазі, черги немає;

$S_{m2}$  – у СМО  $m$  вимог, обслуговування у другій фазі, черги немає

.....

$S_{(m+χ)1}$  – у СМО  $(m+χ)$  вимог ( $m$  вимог обслуговуються,  $χ$  знаходяться у черзі), обслуговування у першій фазі;

$S_{(m+χ)2}$  у СМО  $(m+χ)$  вимог ( $m$  вимог обслуговуються,  $χ$  знаходяться у черзі), обслуговування у другій фазі.

Алгебраїчні рівняння для фінальних ймовірностей станів системи:

$$\lambda P_0 = \mu P_{12};$$

$$(\lambda + \nu) P_{11} = \lambda P_0 + 2 \mu P_{22};$$

$$(\lambda + \mu) P_{12} = \nu P_{11};$$

$$(\lambda + 2\nu) P_{21} = \lambda(P_{11} + P_{12}) + 3\mu P_{32};$$

$$(\lambda + 2\mu) P_{22} = \nu P_{21};$$

.....

$$\left. \begin{aligned}
 (\lambda + n\nu)P_{n1} &= \lambda(P_{(n-1)1} + P_{(n-1)2}) + (n+1)\mu P_{(n+1)2}; \\
 (\lambda + n\mu)P_{n2} &= n\nu P_{n1}; \\
 \dots\dots\dots \\
 (\lambda + m\nu)P_{m1} &= \lambda(P_{(m-1)1} + P_{(m-1)2}) + m\mu P_{(m+1)2}; \\
 (\lambda + m\mu)P_{m2} &= m\nu P_{m1}; \\
 \dots\dots\dots \\
 (\lambda + m\nu)P_{k1} &= \lambda(P_{(k-1)1} + P_{(k-1)2}) + m\mu P_{(k+1)2}; \\
 (\lambda + m\mu)P_{k2} &= m\nu P_{k1}; \\
 \dots\dots\dots \\
 m\nu P_{(m+\chi)1} &= \lambda(P_{(m+\chi-1)1} + P_{(m+\chi-1)2}); \\
 m\mu P_{(m+\chi)2} &= m\nu (P_{(m+\chi)1});
 \end{aligned} \right\} \tag{4.2}$$

Нормуюча умова  $P_0 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{m+\chi} P_{ij} = 1.$

Складність реалізації методу псевдостанів для дослідження такої СМО зумовлює об’ємні форми його математичного опису, без якого, на жаль, неможливо обійтися при дослідженні поведінки системи. Тому нижче наводяться вихідні системи рівнянь, проміжні та кінцеві результати моделювання процесів функціонування такої СМО.

Розв’язуючи приведену вище систему алгебраїчних рівнянь, отримуємо:

$$\begin{aligned}
 P_{11} &= \frac{\lambda(\lambda + \mu)}{\mu\nu} P_{oe}; & P_{12} &= \frac{\lambda}{\mu} P_{oe}; \\
 P_{21} &= \frac{\lambda^2(\lambda + \mu + \nu)(\lambda + 2\mu)}{4\mu^2\nu^2} P_{oe}; & P_{22} &= \frac{\lambda^2(\lambda + \mu + \nu)}{2\mu^2\nu} P_{oe}; \\
 \dots\dots\dots \\
 P_{n1} &= \frac{\lambda^n(\lambda + \mu + \nu)(\lambda + 2\mu + 2\nu)\dots(\lambda + (n-1)\mu + (n-1)\nu)(\lambda + \eta\mu)}{\mu^n\nu^n \prod_{i=1}^n i^2} P_{oe};
 \end{aligned}$$

$$P_{n2} = \frac{\lambda^n (\lambda + \mu + \nu)(\lambda + 2\mu + 2\nu) \dots (\lambda + (n-1)\mu + (n-1)\nu)}{n\mu^n \nu^{(n-1)} \prod_{i=1}^{(n-1)} i^2} P_{oe};$$

$$P_{m1} = \frac{\lambda^m (\lambda + \mu + \nu)(\lambda + 2\mu + 2\nu) \dots (\lambda + (m-1)\mu + (m-1)\nu)(\lambda + m\mu)}{\mu^m \nu^m \prod_{i=1}^m i^2} P_{oe};$$

$$P_{m2} = \frac{\lambda^m (\lambda + \mu + \nu)(\lambda + 2\mu + 2\nu) \dots (\lambda + (m-1)\mu + (m-1)\nu)}{m\mu^m \nu^{(m-1)} \prod_{i=1}^{m-1} i^2} P_{oe};$$

$$P_{(m+\chi)1} = \frac{\lambda^{(m+\chi)} (\lambda + \mu + \nu)(\lambda + 2\mu + 2\nu) \dots (\lambda + m\mu + m\nu)^{\chi-m}}{m\mu^{\chi-1} \nu^\chi \prod_{i=1}^{m-1} i^2 \prod_{i=1}^{\chi} m_i^2} P_{oe}; \quad (4.3)$$

$$P_{(m+\chi)2} = \frac{\lambda^{(m+\chi)} (\lambda + \mu + \nu)(\lambda + 2\mu + 2\nu) \dots (\lambda + m\mu + m\nu)^{\chi-m}}{m\mu^\chi \nu^{\chi-1} \prod_{i=1}^{m-1} i^2 \prod_{i=1}^{\chi} m_i^2} P_{oe};$$

$$\begin{aligned} P_{oe} = & \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda(\lambda + \nu)}{\mu\nu} + \dots + \right. \\ & + \frac{\lambda^n (\lambda + \mu + \nu) \dots (\lambda + (n-1)\mu + (n-1)\nu)(\lambda + \eta\mu)}{\mu^n \nu^n \prod_{i=1}^n i^2} + \dots + \\ & + \frac{\lambda^n (\lambda + \mu + \nu) \dots (\lambda + (n-1)\mu + (n-1)\nu)}{m\mu^m \nu^{(m-1)} \prod_{i=1}^{m-1} i^2} + \dots + \\ & + \frac{\lambda^{(m+\chi)} (\lambda + \mu + \nu) \dots (\lambda + \mu + \nu) \dots (\lambda + m\mu + m\nu)^{\chi-m}}{m\mu^\chi \nu^{\chi-1} \prod_{i=1}^{m-1} i^2 \prod_{i=1}^{\chi} m_i^2} + \dots \\ & \left. \frac{\lambda^{(m+\chi)} (\lambda + \mu + \nu) \dots (\lambda + \mu + \nu) \dots (\lambda + m\mu + m\nu)^{\chi-m}}{m\mu^\chi \nu^{\chi-1} \prod_{i=1}^{m-1} i^2 \prod_{i=1}^{\chi} m_i^2} \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Імовірності станів ерлангівської СМО:

$$\begin{aligned}
P_{1e} &= P_{11} + P_{12} = \frac{\lambda(\lambda + \mu + \nu)}{\mu\nu} P_{oe}; \\
P_{2e} &= P_{21} + P_{22} = \frac{\lambda^2(\lambda + \mu + \nu)(\lambda + 2\mu + 2\nu)}{2^2\mu^2\nu^2} P_{oe}; \\
&\dots\dots\dots \\
P_{ne} &= P_{n1} + P_{n2} = \frac{\lambda^n(\lambda + \mu + \nu)\dots(\lambda + n\mu + n\nu)}{\mu^n\nu^n \prod_{i=1}^n i^2} P_{oe}; \\
P_{me} &= P_{m1} + P_{m2} = \frac{\lambda^m(\lambda + \mu + \nu)\dots(\lambda + m\mu + m\nu)}{\mu^n\nu^n \prod_{i=1}^m i^2} P_{oe}; \tag{4.4} \\
&\dots\dots\dots \\
P_{(m+\chi)\varepsilon} &= P_{(m+\chi)1} + P_{(m+\chi)2} + \frac{\lambda^{(m+\chi)}(\lambda + \mu + \nu)\dots(\lambda + m\mu + m\nu)(\mu + \nu)}{m\mu^{(m+\chi)}\nu^{(m+\chi)} \prod_{i=1}^{m-1} i^2 \prod_{i=1}^{\chi} m_i^2} P_{oe};
\end{aligned}$$

Імовірності станів ерланговської СМО:

$$P_{1e} = P_{11} + P_{12}; \quad P_{2e} = P_{21} + P_{22}; \tag{4.5}$$

$$P_{ne} = P_{n1} + P_{n2} \dots P_{ne} = P_{n1} + P_{n2} \dots P_{(m+\chi)e} = P_{(m+\chi)1} + P_{(m+\chi)2}.$$

Визначимо характеристики СМО:

Імовірність обслуговування вимоги

$$P_{\text{лік}} = 1 - P_{\text{втр}} = 1 - P_{\text{від}}, \tag{4.6}$$

$$\text{де } P_{\text{втр}} = P_{(m+\chi)\varepsilon} - \frac{\sum_{i=2}^{m+\chi} P_{(i-1)2}}{2} = P_{(m+\chi)2} - \frac{P_{12} + P_{22} + \dots + P_{(m+\chi-1)2}}{2}.$$

Середнє число вимог, які знаходяться у черзі:

$$\bar{r} = \frac{1}{2}(1 \cdot P_{(m+1)\varepsilon} + 2P_{(m+2)\varepsilon} + \dots + \chi P_{(m+\chi)\varepsilon}). \tag{4.7}$$

Середнє число вимог, які знаходяться у системі:

$$\bar{s} = \frac{1}{2}(1 \cdot P_{1\varepsilon} + 2P_{2\varepsilon} + \dots + (m + \chi)P_{(m+\chi)\varepsilon}). \tag{4.8}$$

Середній час перебування вимоги у черзі:

$$\bar{t}_{\text{черз}} = \frac{\bar{r}}{\lambda} \tag{4.9}$$

Середній час перебування вимоги у системі :

$$\bar{t}_{\text{сист}} = \frac{\bar{s}}{\lambda} \quad (4.10)$$

Середнє число зайнятих приладів обслуговування:

$$\bar{k} = \frac{1}{2} (1 \cdot P_{1e} + 2P_{2e} + \dots + mP_{me} + \dots + mP_{(m+\chi)}). \quad (4.11)$$

Дослідимо функціонування такої системи на прикладі системи M/E<sub>2</sub>/2/4, граф якої наданий на рис. 4.2.

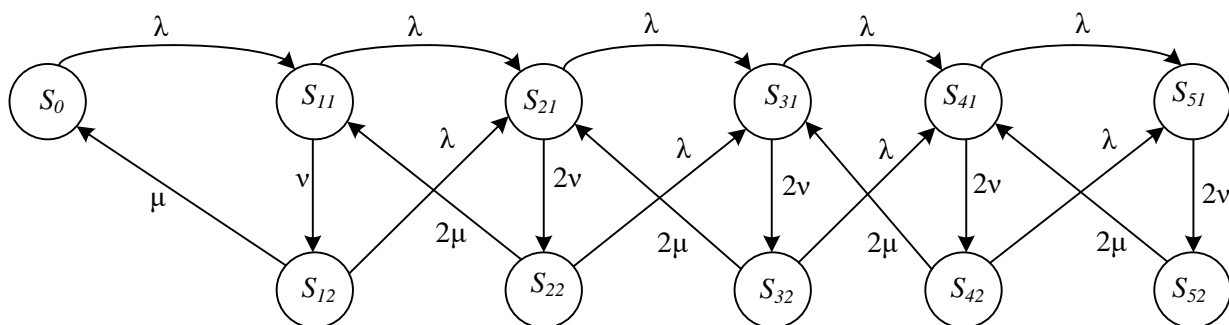


Рис. 4.2. Граф двоканальної СМО з трьома місцями у черзі

Матриця  $\Lambda_e$  інтенсивностей переходів цього графа буде такою:

$$\Lambda_e = \begin{pmatrix} -\lambda & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & -(\lambda + \nu) & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \nu & -(\lambda + \mu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + 2\nu) & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\nu & -(\lambda + 2\mu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + 2\nu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\nu & -(\lambda + 2\mu) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + 2\nu) & 0 & 0 & 2\mu \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\nu & -(\lambda + 2\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\nu & -2\mu \end{pmatrix}$$

Алгебраїчні рівняння для фінальних імовірностей станів системи:

$$\lambda P_0 = \mu P_{12};$$

$$(\lambda + \nu) P_{11} = \lambda P_0 + 2\mu P_{22};$$

$$(\lambda + \mu) P_{12} = \nu P_{11};$$

$$(\lambda + 2\nu) P_{21} = \lambda P_{11} + 2\mu P_{32} + \lambda P_{12};$$

$$(\lambda + 2\mu) P_{22} = 2\nu P_{21};$$



$$(\lambda + 2\nu)P_{31} = \lambda P_{21} + 2\mu P_{42} + \lambda P_{22}; \quad (4.12)$$

$$(\lambda + 2\mu)P_{32} = 2\nu P_{31};$$

$$(\lambda + 2\nu)P_{41} = \lambda P_{31} + 2\mu P_{52} + \lambda P_{32};$$

$$(\lambda + 2\mu)P_{42} = 2\nu P_{41};$$

$$2\nu P_{51} = \lambda P_{41} + \lambda P_{42};$$

$$2\mu P_{52} = 2\mu P_{51};$$

$$P_0 + P_{11} + P_{12} + P_{21} + P_{22} + P_{31} + P_{32} + P_{41} + P_{42} + P_{51} + P_{52} = 1$$

Імовірність станів ерлангівської СМО визначається:

$$P_{1e} = P_{11} + P_{12}; P_{2e} = P_{21} + P_{22}; P_{3e} = P_{31} + P_{32}; P_{4e} = P_{41} + P_{42}; P_{5e} = P_{51} + P_{52}. \quad (4.13)$$

Характеристики СМО:  $P_{\text{лік}} = 1 - P_{\text{втр}} = 1 - P_{\text{від}}$ ;

$$P_{\text{відм}} = P_{5e} - \frac{P_{12} + P_{22} + P_{32} + P_{42}}{2}. \quad (4.14)$$

Середнє число вимог, які знаходяться у черзі ( $\bar{r}$ ) та у системі ( $\bar{s}$ ) визначаються з формул:

$$\bar{r} = \frac{1}{2}(1 \cdot P_{3e} + 2P_{4e} + 3P_{5e}). \quad (4.15)$$

$$\bar{s} = \frac{1}{2}(1 \cdot P_{1e} + 2P_{2e} + 3P_{3e} + 4P_{4e} + 5P_{5e}).$$

Середній час перебування вимоги у черзі ( $\bar{t}_{\text{черг}}$ ) і перебування вимоги у системі ( $\bar{t}_{\text{сист}}$ ) визначаються:

$$\bar{t}_{\text{черг}} = \frac{\bar{r}}{\lambda}; \quad \bar{t}_{\text{сист}} = \frac{\bar{s}}{\lambda}. \quad (4.16)$$

Середнє число зайнятих приладів обслуговування буде:

$$\bar{k} = \frac{1}{2}(1 \cdot P_{1e} + 2P_{2e} + 2P_{3e} + 2P_{4e} + 2P_{5e}). \quad (4.17)$$

Проведемо дослідження двоканальної СМО, зображеної на рис. 4.2., для прийнятого діапазону значень  $\lambda$  і визначимо значення її параметрів. З огляду на це, при прийнятому  $\lambda$  змінюємо покроково  $\nu$  та знаходимо значення  $\mu$  при яких значення ймовірності  $P_{\text{лік}}$  дорівнює значенням з прийнятого діапазону. Дослідження проведено за допомогою програм Mathcad MS Excel (пакет «Аналіз»).

На рис. 4.3 наведений графік залежності інтенсивності обслуговування  $\mu$  від величини ймовірності успішного ліквідування наслідків аварійної ситуації  $P_{\text{лік}}$  при різних значеннях інтенсивності  $\nu$  зосередження ліквідаційних підрозділів.

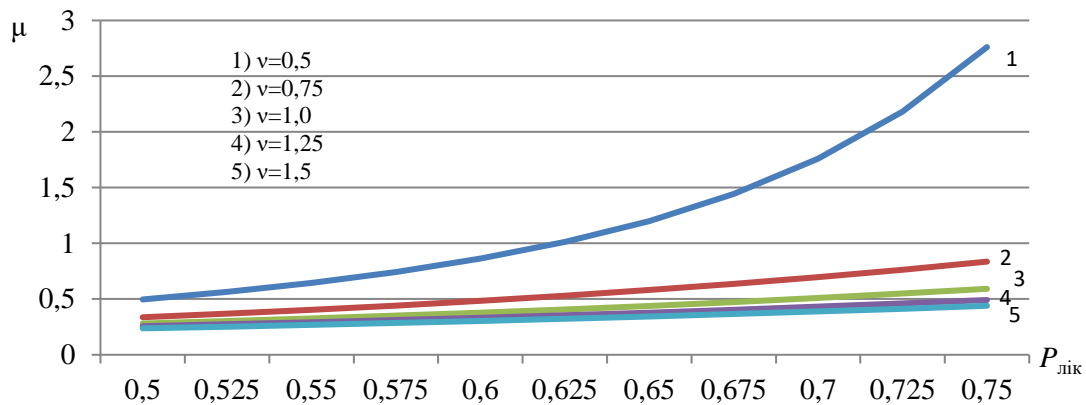


Рис. 4.3. Графік залежності інтенсивності обслуговування  $\mu$  від величини ймовірності успішного ліквідування наслідків аварійної ситуації  $P_{\text{лік}}$  при різних значеннях інтенсивності  $\nu$  зосередження ліквідаційних підрозділів

При прийнятному діапазоні значень ймовірності успішної ліквідації наслідків аварійної ситуації ( $0,5 \leq P_{\text{лік}} \leq 0,75$ ), зменшення часу зосередження локалізаційних підрозділів на місці аварійної ситуації (збільшення значень  $\nu$ ) дає можливість застосувати засоби з меншою продуктивністю проведення ліквідаційних робіт. Більш детально це видно з графіка (рис. 4.4).

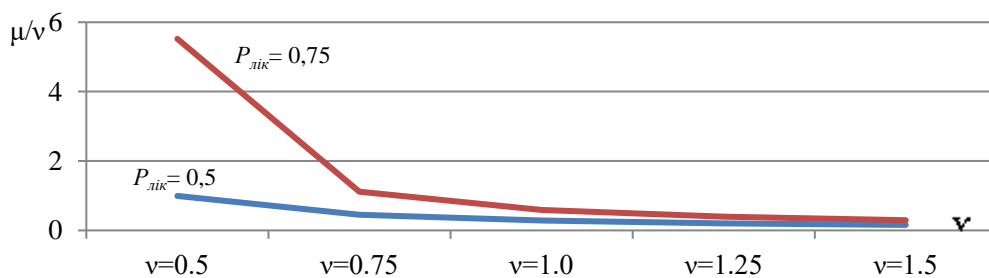


Рис. 4.4. Графік залежності величини інтенсивності  $\mu$  обслуговування від інтенсивності  $\nu$  зосередження при заданих значеннях ймовірності  $P_{\text{лік}}$

При прийнятному діапазоні  $0,5 \leq P_{\text{лік}} \leq 0,75$ , відношення  $\mu/\nu$  має нелінійний характер. Причому, при зменшенні  $\nu$  (до  $\nu = 0,5$ ) потреба у кратному збільшенні  $\mu$  зростає, що найбільш характерне для верхнього значення діапазону  $P_{\text{лік}}$ .

Більш виразно це надано на узагальненому графіку залежності ймовірності ліквідації наслідків аварійної ситуації від параметрів СМО (рис. 4.5).

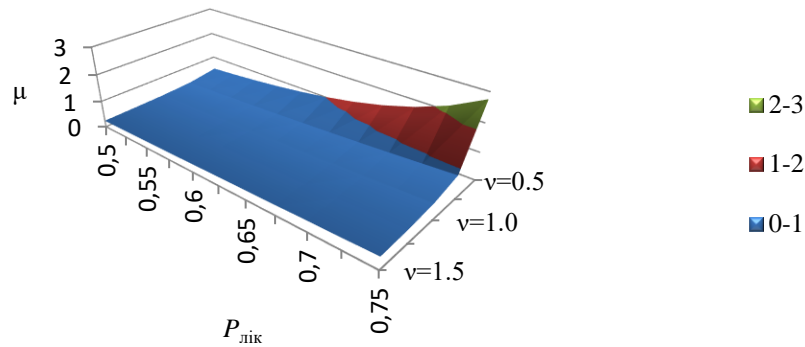


Рис. 4.5. Узагальнений графік залежності ймовірності ліквідації наслідків аварійної ситуації від параметрів СМО

Заслужує уваги залежність ймовірності  $P_{\text{нв}}$  негативного впливу на навколишнього природне середовища від значень  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\mu$ . Графік залежності ймовірності  $P_{\text{нв}}$  негативного впливу на довкілля від величини інтенсивності обслуговування  $\mu$  при різних значеннях інтенсивностей  $\nu$  зосередження ліквідаційних підрозділів наданий на рис. 4.6.

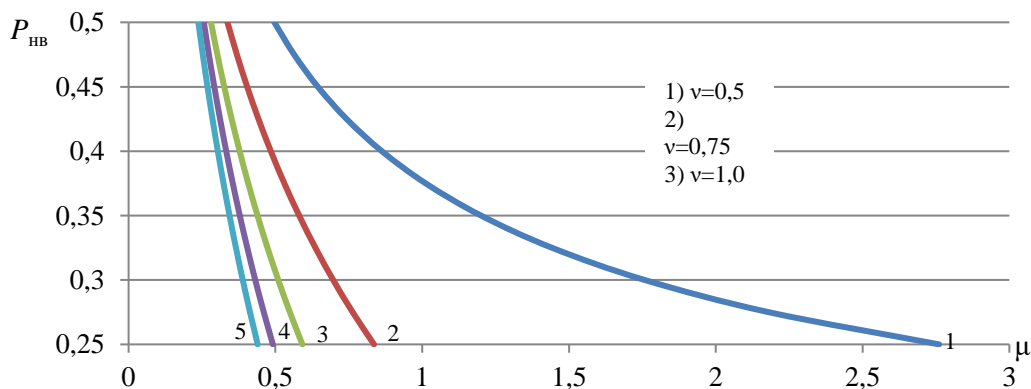


Рис. 4.6. Графік залежності ймовірності  $P_{\text{нв}}$  негативного впливу на довкілля від величини інтенсивності обслуговування  $\mu$  при різних значеннях інтенсивностей  $\nu$  зосередження ліквідаційних підрозділів

Відомо, що значення продуктивності роботи технічних засобів локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків знаходиться у визначених їхніми технічними характеристиками межах ( $\mu_{\min_i} \leq \mu_i \leq \mu_{\max_i}$ ). При  $\mu_i \leq \mu_{\min_i}$ , навіть за

умови найшвидшого зосередження ліквідаційних підрозділів на місці аварійної ситуації, ймовірність  $P_{\text{нв}}$  залишається високою. Існують такі значення  $\mu_i = \mu_{\text{min}_i}$  та  $v = v_{\text{max}}$ , коли  $\mu_i$  залишається постійною величиною, тобто за таких умов продуктивність існуючих засобів стає вкрай недостатньо. При  $\mu_{\text{min}_i} \leq \mu_i \leq \mu_{\text{max}_i}$  із збільшенням  $v$ , величина  $P_{\text{нв}}$  зменшується. При  $\mu_i > \mu_{\text{max}_i}$ , і довготривалому часі зосередження, величина ймовірності  $P_{\text{нв}}$  залишається відносно великою, тобто у такому випадку зосередження стає недоцільним.

Інакше кажучи, якщо засоби ліквідації наслідків аварійної ситуації не відповідають її характеру та/або вкрай малопродуктивні, то навіть за їх вчасного зосередження на місці ліквідації, вони не будуть ефективними. З іншого боку, навіть якщо засоби ліквідації достатньо ефективні, але зосередження їх на місці транспортної події відбулося із запізненням, то вони також не дадуть ефекту.

Додаткового дослідження потребує негативний вплив небезпечних факторів на природне середовище залежно від тривалості проведення робіт ліквідаційними підрозділами. На рис. 4.7 наданий графік залежності тривалості часу ліквідаційних робіт від величини продуктивності технічних засобів ліквідації (інакше кажучи, знаходження вимоги у СМО при повному циклі її обробки).

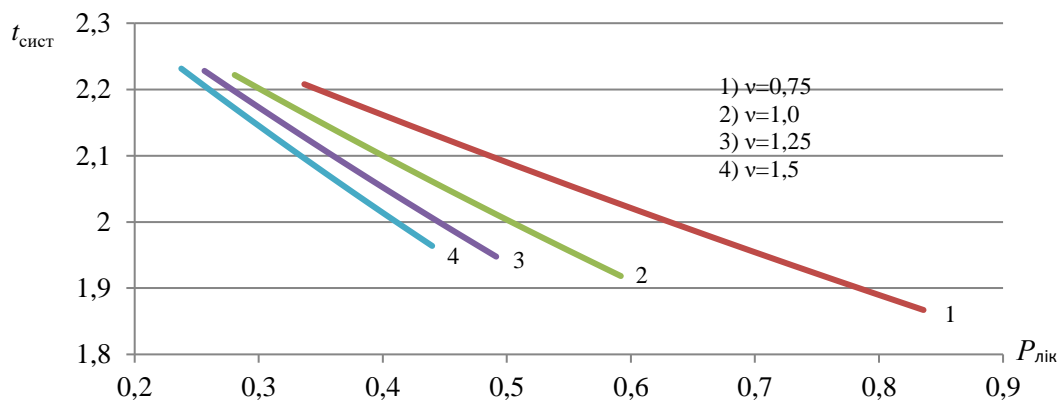


Рис. 4.7. Графік залежності середнього часу  $\bar{t}_{\text{сист}}$  ліквідаційних робіт за різних значень інтенсивності  $v$  зосередження у прийнятому діапазоні значень  $0,5 < P_{\text{лік}} \leq 0,75$

Графік (рис. 4.7) підтверджує, що суттєве зменшення терміну проведення ліквідаційних робіт, а також негативного впливу наслідків аварійної ситуації на природне середовище можливе при зменшенні часу зосередження ліквідаційних

підрозділів та застосуванні сил і засобів необхідної продуктивності. Збільшення часу зосередження потребує у разі збільшення продуктивності таких сил та засобів.

#### **4.2. Формальний опис дій аварійних підрозділів як процесів функціонування системи масового обслуговування при часових обмеженнях**

Теоретичний підхід до опису дій аварійних підрозділів застосований такий самий, як у п. 4.1, однак враховані часові обмеження реагування на аварійну ситуацію. Аналіз властивостей вантажів різних класів небезпеки, проведений у другому розділі цієї роботи свідчить, що значна частка таких вантажів, через їхні природні властивості, здатна у короткий термін «зникати» з місця аварійної ситуації як у період ліквідації небезпечних наслідків такої ситуації, так й у період очікування ліквідаційних робіт, тобто не «терпіти» до початку або закінчення ліквідаційних робіт.

До таких властивостей, наприклад, належить здатність утворювати токсичний пил у разі розкриття виробу, леткість, розчинність у воді, здатність утворювати токсичні гази, пар і аерозолі при контакті з повітрям або при горінні, накопичуватися у низьких ділянках поверхні, тунелях, підвалах, розкладатися з утворенням різних газів тощо. Тобто проявляти ознаки «нетерплячості» при проведенні ліквідаційних заходів.

На відміну від розглянутого вище процесу обслуговування, коли вимога, що надійшла у СМО й застала усі прилади обслуговування зайнятими, стає у чергу й очікує обслуговування доки не буде обслужена, розглянемо СМО з вимогами, які залишають систему з причини обмеження у часі знаходження на обслуговуванні.

Припустимо, що середній час обмеження очікування обслуговування  $\bar{t}_{об.обс}$  є випадковою величиною часу в потоці залишення вимог СМО. Потік таких «нетерплячих» вимог  $\eta = \frac{1}{t_{об.обс}}$  приймається простішим, тому що, як відомо, саме такі потоки є найбільш поширеними у різних СМО.

Щільність цього потоку «виходу» вимог зі СМО при обслуговуванні приймається показовою з параметром  $\eta$ :

$$f(t) = \eta e^{-\eta t} \quad (t > 0). \tag{4.18}$$

За наявності у черзі вимог з обмеженим терміном часу перебування в період очікування у черзі на обслуговування ( $\bar{t}_{об.черг}$ ), параметр «нетерплячості»  $\psi$  таких вимог дорівнює:

$$\psi = \frac{1}{\bar{t}_{об.черг}} \tag{4.19}$$

Ці вимоги утворюють ще один, додатковий потік, який раніше не розглядався теоретично, але на практиці він створює реальні загрози для системи, тому ним не можна нехтувати у моделі, що пропонується.

Щільність цього потоку «виходу» вимог зі СМО у такому разі приймається показовою з параметром  $\psi$ :

$$f(t) = \psi e^{-\psi t}, \quad (t > 0). \tag{4.20}$$

Окрему увагу заслуговує випадок обслуговування «нетерплячих» заявок одним приладом обслуговування.

Розглянемо функціонування системи  $M/E_2/1/n$  з обмеженням  $\eta \neq 0$ .

Граф станів такої СМО наданий на рис. 4.8.

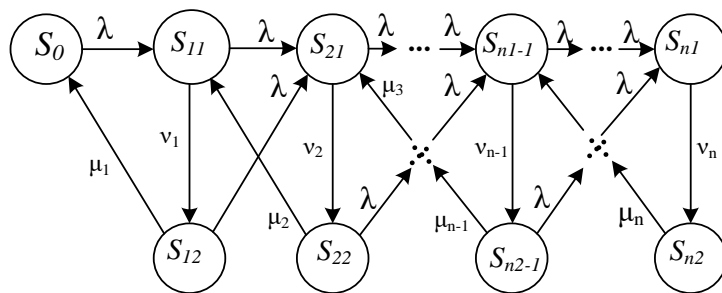


Рис. 4.8. Граф станів СМО  $M/E_2/1/n$  з обмеженнями на параметри «нетерплячості» ( $\eta \neq 0, \psi \neq 0$ )

На рис. 4.8:

$$\mu_1 = \mu + \eta; \quad v_1 = v + \eta;$$

$$\mu_2 = \mu_1 + \eta = \mu + 2\eta; \quad v_2 = v_1 + \eta = v + 2\eta;$$

$$\dots\dots\dots$$

$$\mu_n = \mu_{n-1} + \eta = \mu + n\eta; \quad v_n = v_{n-1} + \eta = v + n\eta.$$

Алгебраїчні рівняння для фінальних станів системи:

$$\begin{aligned} \lambda P_0 &= (\mu + \eta)P_{12}; \\ (\lambda + \mu_1)P_{12} &= v_1 P_{11}; \\ (\lambda + v_1)P_{11} &= \lambda P_0 + \mu_2 P_{22}; \\ (\lambda + \mu_2)P_{22} &= v_2 P_{21}; \end{aligned} \tag{4.20}$$

.....

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu_{n-1})P_{(n-1)2} &= v_{(n-1)} P_{(n-1)1}; \\ (\lambda + v_{n-1})P_{(n-1)1} &= \lambda(P_{(n-2)1} + P_{(n-2)2}) + \mu_n P_{n2}; \\ \mu_n P_{n2} &= v_n P_{n1}; \\ v_n P_{n1} &= \lambda(P_{(n-1)1} + P_{(n-1)2}). \end{aligned}$$

$$P_0 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{n_{ij}} P_{ij} = 1 \tag{4.21}$$

Складність математичного апарату методу псевдостанів, який застосовується для дослідження СМО, що розглядається, передбачає велику кількість рівнянь за допомогою яких здійснюється опис цієї системи. У зв'язку з цим є доцільним, на наш погляд, наведення не тільки системи рівнянь, але й проміжних і кінцевих результатів моделювання процесів функціонування СМО, які, на жаль, є дуже громіздкими.

Розв'язування приведеної вище системи рівнянь дає такі результати:

$$\begin{aligned} P_{11} &= \frac{\lambda(\lambda + \mu_1)}{\mu_1 v_1} P_{oe}; & P_{12} &= \frac{\lambda}{\mu_1} P_{oe}; \\ P_{21} &= \frac{\lambda(\lambda + \mu_2)(\lambda + v_1 + \mu_1)}{\mu_1 \mu_2 v_1 v_2} P_{oe}; & P_{22} &= \frac{\lambda(\lambda + v_1 + \mu_1)}{\mu_1 \mu_2 v_1} P_{oe}; \end{aligned}$$

.....

$$P_{(n-1)1} = \frac{\lambda^{(n-2)} (\lambda + \mu_{n-1})(\lambda + \mu_1 + v_1)(\lambda + \mu_{n-2} + v_{n-2})}{\prod_{i=1}^{n-1} \mu_i \prod_{j=1}^{n-1} v_j} P_{oe};$$

$$P_{(n-1)2} = \frac{\lambda^{(n-2)}(\lambda + \mu_1 + v_1)(\lambda + \mu_{n-2} + v_{n-2})}{\prod_{i=1}^{n-1} \mu_i \prod_{j=1}^{n-2} v_j} P_{oe}$$

$$P_{n1} = \frac{\lambda^{(n-1)}(\lambda + \mu_1 + v_1) \dots (\lambda + \mu_{n-1} + v_{n-1})}{\prod_{i=1}^{n-1} \mu_i \prod_{j=1}^n v_j} P_{oe}; \tag{4.22}$$

$$P_{n2} = \frac{\lambda^{(n-1)}(\lambda + \mu_1 + v_1) \dots (\lambda + \mu_{n-1} + v_{n-1})}{\prod_{i=1}^n \mu_i \prod_{j=1}^{n-1} v_j} P_{oe}.$$

$$P_{oe} = \left( \begin{aligned} & 1 + \frac{\lambda(\lambda + \mu_1)}{\mu_1 v_1} + \frac{\lambda}{\mu_1} + \dots + \frac{\lambda^{n-2}(\lambda + \mu_{n-1})(\lambda + \mu_1 + v_1)(\lambda + \mu_{n-2} + v_{n-2})}{\prod_{i=1}^{n-1} \mu_i \prod_{j=1}^{n-1} v_j} + \dots + \\ & + \frac{\lambda^{n-1}(\lambda + \mu_1 + v_1) \dots (\lambda + \mu_{n-1} + v_{n-1})}{\prod_{i=1}^{n-1} \mu_i \prod_{j=1}^n v_j} + \frac{\lambda^{n-1}(\lambda + \mu_1 + v_1) \dots (\lambda + \mu_{n-1} + v_{n-1})}{\prod_{i=1}^n \mu_i \prod_{j=1}^{n-1} v_j} \end{aligned} \right)^{-1}.$$

Тоді:

$$P_{1e} = P_{11} + P_{12} = \frac{\lambda(\lambda + \mu_1 + v_1)}{\mu_1 v_1} P_{oe};$$

$$P_{2e} = P_{21} + P_{22} = \frac{\lambda(\lambda + \mu_1 + v_1)(\lambda + \mu_2 + v_2)}{\mu_1 \mu_2 v_1 v_2} P_{oe};$$

.....

$$P_{(n-1)e} = P_{(n-1)2} + P_{(n-1)1} = \frac{\lambda^{(n-2)}(\lambda + \mu_1 + v_1) \dots (\lambda + \mu_{n-1} + v_{n-1})}{\prod_{i=1}^{n-1} \mu_i \prod_{j=1}^{n-1} v_j} P_{oe};$$

$$P_{ne} = P_{n1} + P_{n2} = \frac{\lambda^{(n-1)}(\lambda + \mu_1 + v_1)(\lambda + \mu_2 + v_2) \dots (\lambda + \mu_{n-1} + v_{n-1})(\mu_n + v_n)}{\prod_{i=1}^n \mu_i \prod_{j=1}^n v_j} P_{oe}.$$

Основні характеристики СМО у сталому режимі:

$$\bar{k} = \frac{1}{2}(1P_{1e} + 1P_{2e} + \dots + 1P_{(n-1)e} + 1P_{ne});$$

$$P_{л} = 1 - P_{втр}; \quad P_{втр} = P_{відм} + P_{по} + P_{пч};$$

$$P_{відм} = P_{ne} - \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n P_{(i-1)2} \quad P_{по} = \frac{\eta}{\lambda} \bar{k}; \tag{4.23}$$



$$\bar{r} = \frac{1}{2} \sum_{r=1}^n r \cdot P_{(2+r)e} = \frac{1}{2} (1 \cdot P_{1e} + \dots + n P_{ne}).$$

$$P_{пч} = \frac{\Psi}{\lambda} r.$$

Як приклад, дослідимо функціонування системи масового обслуговування  $M/E_2/1/3$  з обмеженнями  $\eta = \psi \neq 0$ , граф станів якої наданий на рис. 4.9.

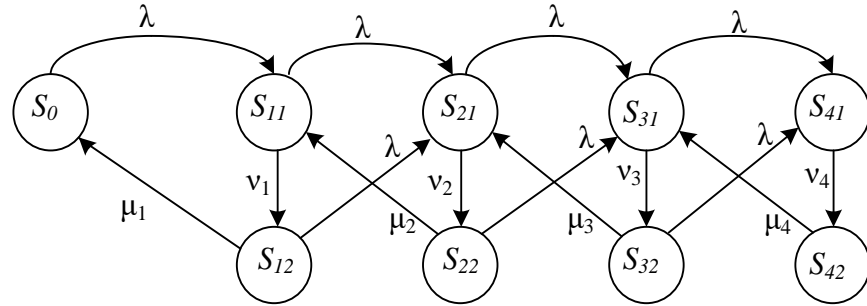


Рис. 4.9. Граф станів  $M/E_2/1/3$  з обмеженням  $\eta = \psi \neq 0$

На рис. 4.9 :

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \mu + \eta; \quad v_1 = v + \eta; \\ \mu_2 &= \mu + 2\eta; \quad v_2 = v + 2\eta; \\ \mu_3 &= \mu + 3\eta; \quad v_3 = v + 3\eta; \\ \mu_4 &= \mu + 4\eta; \quad v_4 = v + 4\eta; \end{aligned} \tag{4.24}$$

Матриця  $\Lambda_e$  інтенсивностей переходів такої СМО буде:

$$\Lambda_e = \begin{pmatrix} -\lambda & 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & -(\lambda + v_1) & 0 & \mu_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_1 & -(\lambda + \mu_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + v_2) & 0 & 0 & \mu_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_2 & -(\lambda + \mu_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + v_3) & 0 & 0 & \mu_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & v_3 & -(\lambda + \mu_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -v_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & v_4 & -\mu_4 \end{pmatrix}$$

Алгебраїчні рівняння для фінальних станів системи

$$\begin{aligned} \lambda P_0 &= \mu_1 P_{12}; \\ (\lambda + \mu_1) P_{12} &= v_1 P_{11}; \\ (\lambda + v_1) P_{11} &= \lambda P_0 + \mu_2 P_{22}; \\ (\lambda + \mu_2) P_{22} &= v_2 P_{21}; \\ (\lambda + \mu_2) P_{21} &= \lambda P_{11} + \mu_3 P_{32} + \lambda P_{12}; \\ (\lambda + \mu_3) P_{32} &= v_3 P_{31}; \end{aligned} \tag{4.25}$$

$$(\lambda + \nu_3)P_{31} = \lambda P_{21} + \mu_4 P_{42} + \lambda P_{22};$$

$$\mu_4 P_{42} = \nu_4 P_{41};$$

$$\nu P_{41} = \lambda P_{31} + \lambda P_{32}.$$

$$P_0 + P_{11} + P_{12} + P_{21} + P_{22} + P_{31} + P_{32} + P_{41} + P_{42} = 1$$

$$P_{1e} = P_{11} + P_{12}; \quad P_{2e} = P_{21} + P_{22}; \quad P_{3e} = P_{31} + P_{32}; \quad P_{4e} = P_{41} + P_{42}.$$

Основні характеристики СМО у сталому режимі:

$$P_{л} = 1 - P_{втр};$$

$$P_{втр} = P_{відм} + P_{по} + P_{пч};$$

(4.26)

$$P_{відм} = P_{4e} - 0,5(P_{12} + P_{22} + P_{32});$$

$$P_{по} = \frac{\eta}{\lambda} \bar{k}; \quad \bar{k} = 0,5 (1 \cdot P_{1e} + 1 \cdot P_{2e} + 1 \cdot P_{3e} + 1 \cdot P_{4e}); \quad P_{пч} = \frac{\psi}{\lambda} \bar{r} = \frac{\eta}{\lambda} \bar{r};$$

$$\bar{r} = 0,5 \sum_{r=1}^3 r \cdot P_{(1+r)} = 0,5 (1 \cdot P_{2e} + 2 \cdot P_{3e} + 3 \cdot P_{4e}).$$

Розглянемо залежності ймовірностей успішного проведення ліквідаційних робіт  $P_{л}$ , втрати вимог  $P_{втр}$  і відмови  $P_{відм}$  від параметру «нетерплячості»  $\eta$  при різних значеннях  $\nu$  та  $\mu$ .

На рис. 4.10 надані графіки таких залежностей при  $\nu < 0,5$  та  $\lambda: \mu = 1:1$ .

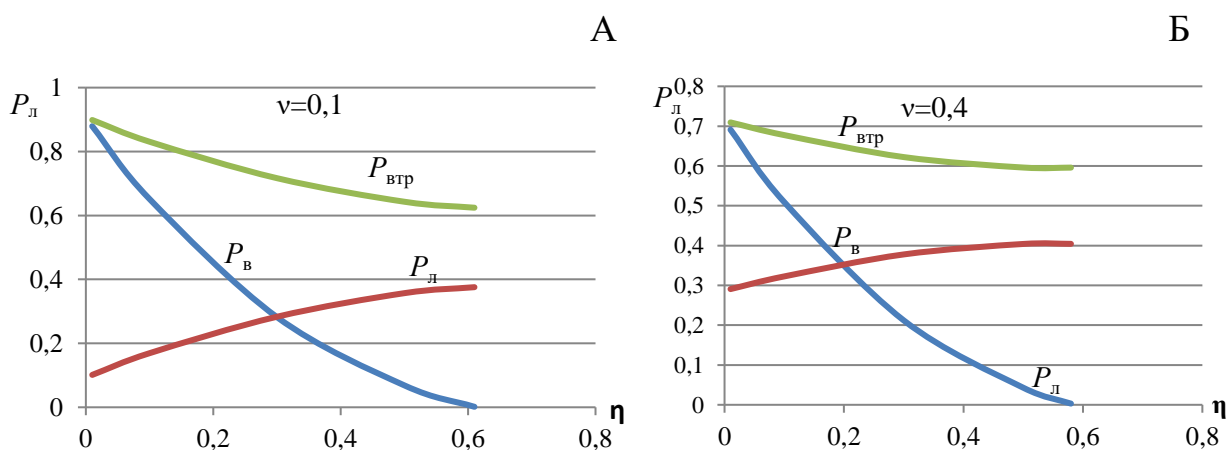


Рис. 4.10. Графіки залежності ймовірності успішного проведення робіт при  $\nu=0,1$ ,  $\mu=1$ . (рис.4.10а) та при  $\nu=0,4$ ,  $\mu=1$  (рис. 4.10б) від інтенсивності «нетерплячості»  $\eta$

Із збільшенням величини інтенсивностей покидання вимогами СМО при їхньому обслуговуванні та знаходженні у черзі ( $\eta = \psi$ ), величина ймовірності  $P_{л}$  зростає в діапазонах  $(0,01 < P_{л} < 0,4)$  при  $\nu = 0,1$  та  $(0,3 < P_{л} \leq 0,4)$  при  $\nu = 0,4$ . Низькі

значення ймовірності ліквідації обумовлюються несвоєчасним зосередженням ліквідаційних підрозділів, хоча продуктивність сил і засобів при цьому є високою.

Скорочуючи час на зосередження ліквідаційних підрозділів  $\nu = 0,7$ , величина  $P_{\text{л}}$  стає дещо більшою у діапазоні  $(0,01 < \eta \leq 0,55)$  при  $\nu = 0,4$  (рис. 4.11).

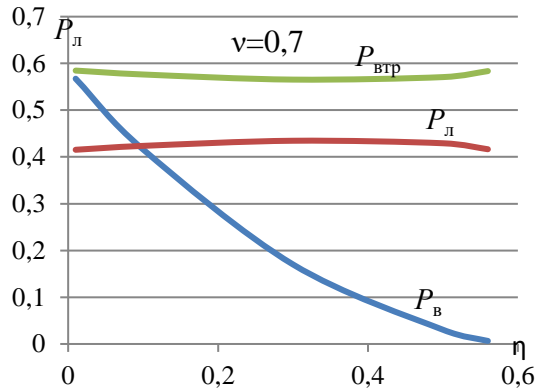


Рис. 4.11. Графік залежностей ймовірності успішності ліквідації  $P_{\text{л}}$ , ймовірності втрати вимог  $P_{\text{втр}}$  та ймовірності відмови у обслуговуванні  $P_{\text{відм}}$  від інтенсивності  $\eta$  «нетерплячості» при  $\nu = 0,7$ ,  $\mu = 1$

При  $\nu = \mu = 1$  зміни величини  $P_{\text{л}}$  в діапазоні  $0,01 < \eta < 0,3$  обумовлюються високими значеннями ймовірності  $P_{\text{відм}}$ , а у діапазоні  $0,3 < \eta < 0,55$  зростаючими величинами ймовірностей покидання вимог при обслуговуванні  $P_{\text{по}}$  та при знаходженні у черзі  $P_{\text{пч}}$ , як це надано на рис. 4.12. Величина ймовірності  $0,495 < P_{\text{л}} < 0,493$  має місце у діапазоні  $0,01 < \eta < 0,55$ .

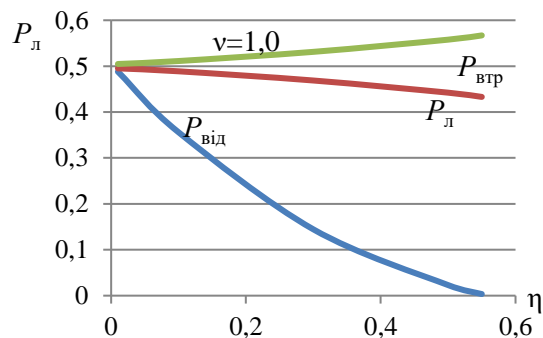


Рис. 4.12. Графік залежностей ймовірності успішності ліквідації  $P_{\text{л}}$ , ймовірності втрати вимог  $P_{\text{втр}}$  та ймовірності відмови у обслуговуванні  $P_{\text{відм}}$  від інтенсивності  $\eta$  «нетерплячості» при  $\nu = \mu = 1$

При зменшенні часу зосередження у діапазоні значень  $1,3 \leq v < 2,5$ , значення ймовірності ліквідації становлять  $0,543 > P_{л} > 0,486$ . Найбільші значення ймовірності  $P_{л}$  спостерігаються у діапазоні  $0,01 < \eta < 0,3$ . При  $0,3 < \eta < 0,5$  значення ймовірності  $P_{л}$  знаходиться у межах  $0,486 < P_{л} \leq 0,437$ . Подальше скорочення часу зосередження при прийнятих у моделі значеннях змінних не є доцільним.

### 4.3. Формальний опис дій оперативних з'єднань аварійних підрозділів

Вище були дослідженні багатоканальні СМО, де як «канали обслуговування» застосовувалися ліквідаційні підрозділи з однаковими продуктивностями їхніх сил і засобів.

Різноманітний характер наслідків аварійних ситуацій нерідко вимагає одночасного застосування різних за призначенням ліквідаційних підрозділів з неоднаковими продуктивностями.

Наприклад, проведення робіт з відбудови контактної мережі, споруд і пристроїв сигналізації, централізації і блокування вимагають застосування ремонтно-відбудовних летючок зв'язку та відбудовних засобів контактної мережі. Тобто оперативне з'єднання таких відбудовних підрозділів з силами і засобами різної продуктивності ліквідує різні за характером наслідки аварійної ситуації.

Іншим прикладом може стати випадок ліквідації сходження з рейок рухомого складу. Згідно з вимогами інструкції [164], аварійно-польова команда (АПК), прибувши на місце робіт, вживає необхідних заходів щодо звільнення перегону від рухомого складу, що зійшов. Якщо звільнити перегін неможливо, то вона виконує підготовчі роботи для подальшої спільної роботи з відновним поїздом. Тобто АПК і відновний поїзд утворюють оперативне з'єднання підрозділів з різними продуктивностями для ліквідації наслідків одного характеру.

Зважаючи на це, оперативне з'єднання ліквідаційних підрозділів можна подати як систему масового обслуговування марковського чи немарківського типів, які здатні обслуговувати потоки безпріоритетних, у загальному випадку,

неоднорідних вимог певною кількістю каналів обслуговування різних продуктивностей.

Розглянемо мережу систем масового обслуговування, які моделюють функціонування найпоширеніших оперативних з'єднань ліквідаційних підрозділів, (графічні моделі мережових систем представлені на рис. 4.13 – 4.16).

На вхід мережі систем масового обслуговування надходить пуасонівський потік вимог з параметром  $\lambda$  (рис. 4.13).

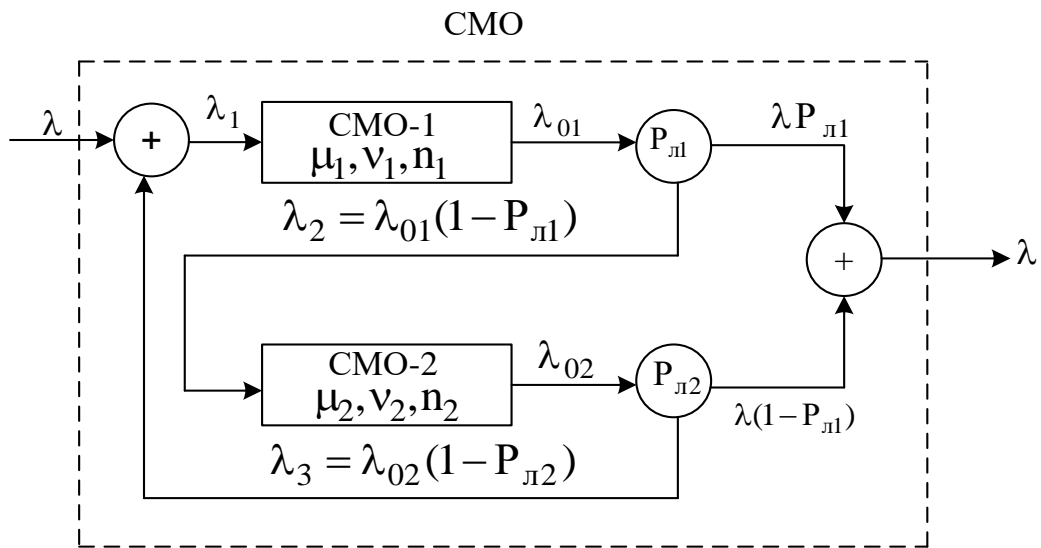


Рис. 4.13. СМО з обробленням однорідних вимог з повторним обслуговуванням у СМО-1

У СМО-1 здійснюється попереднє оброблення вимог вхідного потоку. З ймовірністю  $P_{л1}$  вимоги обслуговуються та залишають СМО. З ймовірністю  $P_{відм1} = 1 - P_{л1}$  вимоги, які отримали відмову у СМО-1, надходять у СМО-2 для повторного обслуговування. Вимоги, які обслужені у СМО-2, з ймовірністю  $P_{л2}$  залишають СМО.

З рис. 4.13 видно, що існують такі співвідношення:

$$\lambda_1 = \lambda_{01}; \quad \lambda_2 = \lambda_{02}.$$

$$\lambda_2 = \lambda_{01}(1 - P_{л1}) = \lambda(1 - P_{л1}) = \lambda P_{відм1}$$

$$\lambda_{02} = \lambda_{01}(1 - P_{л1}) \cdot P_{л2}^{-1} = \lambda P_{відм1} \cdot P_{л2}^{-1} \quad (4.27)$$

$$\lambda_{03} = \lambda_{02}(1 - P_{л2}) = \lambda(1 - P_{л1})(1 - P_{л2}) \cdot P_{л2}^{-1} = \lambda P_{відм1} \cdot P_{відм1} \cdot P_{л2}^{-1}$$

Умови стаціонарної роботи такої СМО:

$$\omega_1 = \frac{\lambda}{n_1(\mu + v_1)} < 1; ; \quad \omega_1 = \frac{\lambda P_{\text{відм1}}}{n_2(\mu_2 + v_2)} < 1 \quad (4.28)$$

Середній час оброблення вимоги у системі:

$$\bar{t} = (\bar{t}_{\text{СМО1}} + \bar{t}_{\text{СМО2}}) \cdot P_{\text{л2}}^{-1}. \quad (4.29)$$

де  $\bar{t}_{\text{СМО1,2}} = \bar{t}_{\text{сист1,2}} = \frac{0,5}{\lambda} (1P_{1e} + 1P_{2e} + \dots + (m + \chi)P_{m+\chi})$ .

На відміну від СМО, наданої на рис. 4.13, у системі масового обслуговування, що подана на рис. 4.14, повторне обслуговування вимог здійснюється у СМО-2

На вхід мережі СМО ( рис. 4.21) надходить простіший потік вимог з інтенсивністю  $\lambda$ . Обслуговування складається з двох послідовних фаз, що виконуються у СМО-1 та СМО-2, які є компонентами мережі СМО.

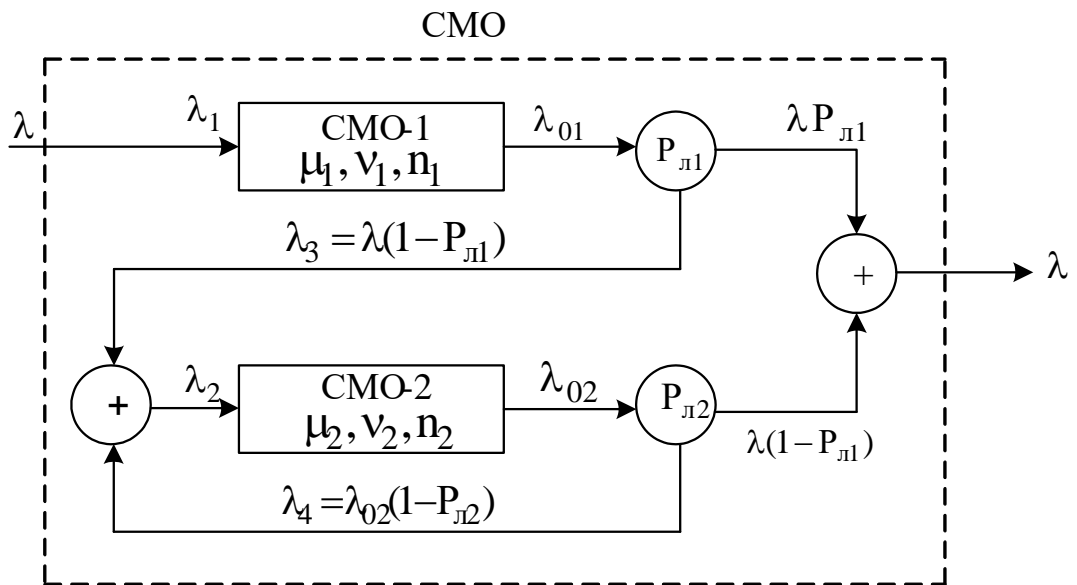


Рис. 4.14. СМО з обробленням однорідних вимог з повторним обслуговуванням у СМО-2

У СМО-1 здійснюється попереднє обслуговування вимог вхідного потоку. З ймовірністю  $P_{\text{л1}}$  вимоги обслуговуються (ліквідуються наслідки) та залишають СМО. З ймовірністю  $P_{\text{відм1}} = (1 - P_{\text{л1}})$  вимоги, які отримали відмову у СМО-1, надходять у СМО-2 для повторного обслуговування.

З ймовірністю  $P_{\text{л2}}$  вимоги обслуговуються у СМО-2 та залишають СМО. Вимоги, які не пройшли обслуговування у СМО-2, повертаються на вхід СМО-2 для повторного обслуговування.

Графік рис. 4.14 свідчить, що:

$$\begin{aligned}\lambda &= \lambda_1 = \lambda_{01}; & \lambda_{01}P_{\lambda 1} &= \lambda; & \lambda_2 &= \lambda_{02}; \\ \lambda_2 &= \lambda_{02} = \lambda(1 - P_{\lambda 1})P_{\lambda 2}^{-1} &= \lambda P_{\text{відм1}} \cdot P_{\lambda 2}^{-1}; & & & (4.30) \\ \lambda_3 &= \lambda(1 - P_{\lambda 1}) &= \lambda P_{\text{відм1}}; \\ \lambda_4 &= \lambda(1 - P_{\lambda 1})(1 - P_{\lambda 2})P_{\lambda 2}^{-1} &= \lambda P_{\text{відм1}} \cdot P_{\text{відм2}} \cdot P_{\lambda 2}^{-1}.\end{aligned}$$

Для стаціонарної роботи СМО повинні спільно виконуватися умови аналогічні умовам для СМО, наданої на рис. 4.13:

Середній час ( $\bar{t}$ ) перебування вимог у СМО-1 визначається з формули

$$\bar{t}_{\text{сист1}} = \frac{0,5(1 \cdot P_{1e} + 2 \cdot P_{2e} + \dots + (m + \chi)P_{m+\chi})}{\lambda}. \quad (4.31)$$

Для визначення середнього часу перебування вимоги у СМО розглянемо такі гіпотези:

- 1)  $H_1$  – вимога, яка надійшла у СМО, зазнала одноразового обслуговування;  
 $P(H_1) = P_{\lambda 1}$ ;
- 2)  $H_2$  – вимога, яка надійшла у СМО, зазнала багаторазового обслуговування;  
 $P(H_2) = 1 - P_{\lambda 1}$ ;

Повне математичне очікування часу перебування вимоги у СМО буде:

$$\bar{t} = \bar{t}_1 + \bar{t}_2^{(1)} (1 - P_{\lambda 1}) \cdot P_{\lambda 2}^{-1}. \quad (4.32)$$

де  $\bar{t}_2^{(1)}$  – середній час одноразового обслуговування вимоги у СМО-2, знаходиться з формули для  $\bar{t}_{\text{сист1}}$ .

Особливістю систем масового обслуговування, які розглядаються нижче, є те, що вхідний пуасонівський потік  $\Lambda$  з певною ймовірністю розподіляється між компонентами СМО-1 та СМО-2 такої системи.

Розглянемо систему масового обслуговування на вхід якої надходить пуасоновський потік вимог  $\Lambda$  (рис. 4.15).

Кожна вимога, яка надійшла у мережу СМО, негайно починає обслуговуватися вільною СМО-1 з ймовірністю  $\phi$ , чи вільною СМО-2 з ймовірністю

$1 - \varphi$ . Це означає, що при  $\varphi = 0,5$  вимога байдужа до вибору СМО-1 або СМО-2. При  $\varphi = 1$  СМО-1 має пріоритет.

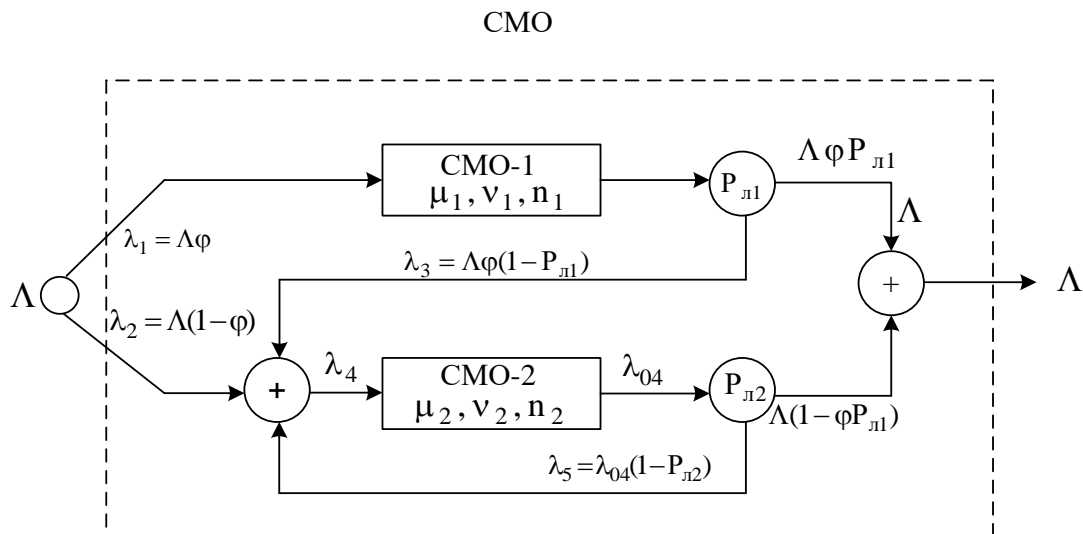


Рис. 4.15. СМО з обробленням різнорідних вимог з потоком на повторне обслуговування від СМО-2

З рис. 4.15 видно, що  $\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 = \Lambda \varphi + \Lambda(1 - \varphi)$ .

Вимога, що пройшла оброблення у СМО-1, з імовірністю  $P_{пл1}$  залишає СМО. Вимога, що не пройшла оброблення у СМО-1, з імовірністю  $(1 - P_{пл1})$  надходить на вхід СМО-2. Потоки  $\lambda_4$  та  $\lambda_5$ , які циркулюють у СМО, визначаються із співвідношень:

$$\begin{aligned} \lambda_4 &= \Lambda \varphi (1 - P_{пл1}) + \Lambda (1 - \varphi) = \Lambda (1 - \varphi P_{пл1}); \\ \lambda_5 &= \Lambda (1 - \varphi P_{пл1}) P_{відм2} \cdot P_{пл2}^{-1}. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Для стаціонарної роботи СМО повинні виконуватися умови:

$$\psi_1 = \frac{\lambda}{n_1(\mu_1 + \nu_1)} < 1; \quad \psi_2 = \frac{\Lambda(1 - \varphi P_{пл1})}{P_{пл2} n_2(\mu_2 + \nu_2)} < 1 \quad (4.34)$$

Повне математичне очікування часу перебування вимоги у СМО буде:

$$\bar{t} = \bar{t}_1 + \bar{t}_2^{(1)} \Lambda (1 - \varphi P_{пл1}) \cdot P_{пл2}^{-1}. \quad (4.35)$$

Не важко помітити, що на наступних циклах оброблення вимог.

$$\lambda_4^1 = \Lambda (1 - \varphi P_{пл1}) \left( 1 + \frac{P_{відм2}}{P_{пл2}} \right). \quad (4.36)$$



Характерною особливістю мережі систем масового обслуговування, яка подана на рис. 4.16, від попередньої мережі СМО є те, що потік вимог, які не пройшли оброблення у СМО-2, повертаються на вхід СМО-1 для повторного оброблення.

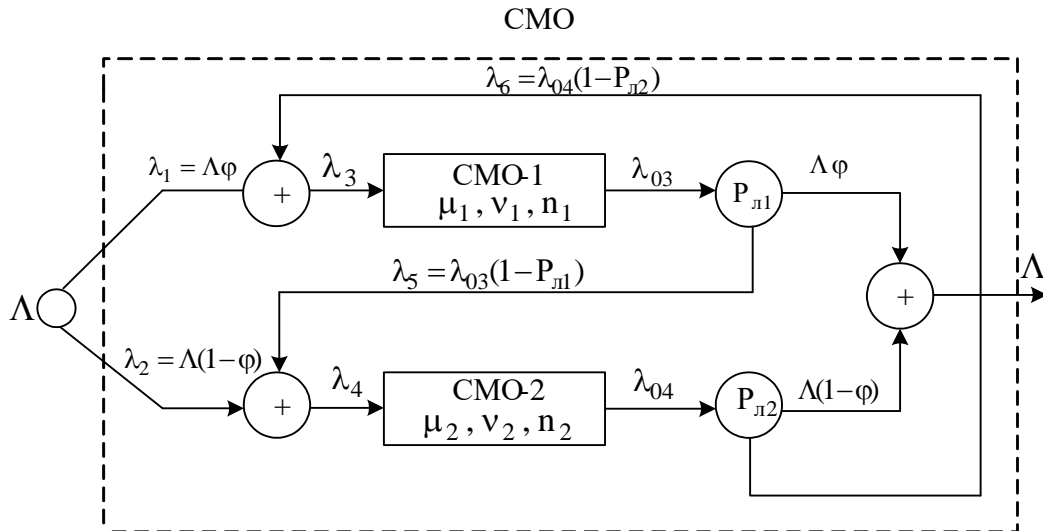


Рис. 4.16. СМО з обробленням різнорідних вимог з потоком на повторне обслуговування від СМО-2 у СМО-1

З рис. 4.16 випливає, що:

$$\begin{aligned} \lambda_{03} &= \Lambda \varphi P_{л1}^{-1}; \lambda_{05} = \lambda_{03} (1 - P_{л1}) = \Lambda \varphi \cdot P_{л1}^{-1}; \\ \lambda_{04} &= \Lambda (1 - \varphi) + \Lambda \varphi P_{відм1} \cdot P_{л1}^{-1} = \Lambda \left( 1 - \frac{P_{відм1}}{P_{л1}} \right); \lambda_{04} = \lambda_4; \\ \lambda_{06} &= \lambda_{04} (1 - P_{л2}) = \Lambda \left( 1 - \varphi \left( 1 - \frac{P_{відм1}}{P_{л1}} \right) \right) P_{відм2} \cdot P_{л2}^{-1}; \\ \lambda_{03} &= \Lambda \varphi + \left[ \Lambda \left( 1 - \varphi \left( 1 - \frac{P_{відм1}}{P_{л1}} \right) \right) \right] P_{відм2} \cdot P_{л2}^{-1} = \Lambda \left[ \varphi + \left( 1 - \varphi \left( \frac{P_{відм1}}{P_{л1}} \right) \right) \frac{P}{P_{л2}} \right]. \end{aligned} \quad (4.37)$$

У мережі систем масового обслуговування, яка надана на рис. 4.16, потоки вимог на повторне обслуговування надходять на входи СМО-1 та СМО-2, якщо вони не пройшли обслуговування у цих системах масового обслуговування.

Компоненти СМО, що розглянуті вище, тобто СМО-1 та СМО-2 мають різні характеристики продуктивності  $\mu$ , інтенсивності зосередження  $\nu$  та кількість приладів  $n$  обслуговування.

Розглянемо приклад функціонування СМО (рис.4.13), компонентами якої є системи масового обслуговування: СМО-1  $M/E_2/1/3$  та СМО-2  $M/E_2/2/2$ . Граф станів СМО-1 наданий на рис. 4.17.

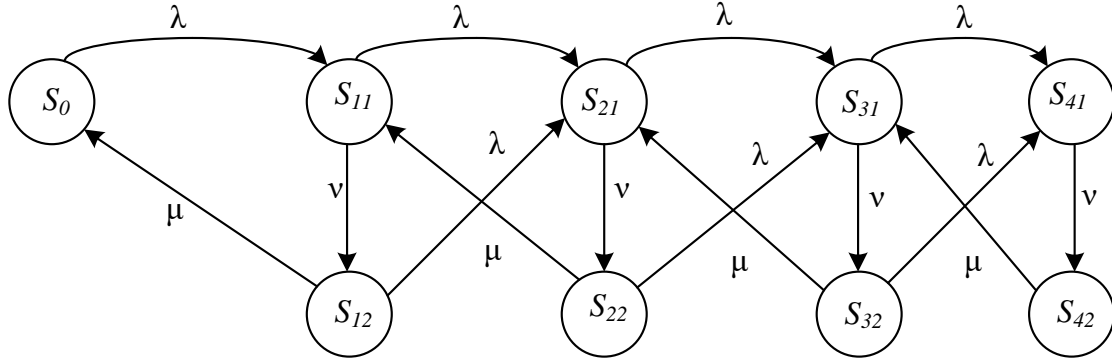


Рис. 4.17. Граф станів СМО з  $M/E_2/1/3$

Матриця  $\Lambda_e$  інтенсивностей переходів такої СМО буде:

$$\Lambda_e = \begin{pmatrix} -\lambda & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & -(\lambda + \nu) & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \nu & -(\lambda + \mu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + \nu) & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \nu & -(\lambda + \mu) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + \nu) & 0 & 0 & \mu \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu & -(\lambda + \mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \nu & -\mu \end{pmatrix}$$

Алгебраїчні рівняння для фінальних станів СМО-1 визначаються із співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} \lambda P_0 &= \mu P_{12}; \\ (\lambda + \nu) P_{11} &= \lambda P_0 + \mu P_{22}; \\ (\lambda + \mu) P_{12} &= \nu P_{11}; \\ (\lambda + \mu) P_{21} &= \lambda P_{11} + \mu P_{32} + \lambda P_{12}; \\ (\lambda + \mu) P_{22} &= \nu P_{21}; \\ (\lambda + \nu) P_{31} &= \lambda P_{21} + \mu P_{42} + \lambda P_{22}; \\ (\lambda + \mu) P_{32} &= \nu P_{31}; \\ \nu P_{41} &= \lambda P_{31} + \lambda P_{32}; \\ \mu P_{42} &= \nu P_{41}. \end{aligned} \right\} \quad (4.38)$$

$$P_0 + P_{11} + P_{12} + P_{21} + P_{22} + P_{31} + P_{32} + P_{41} + P_{42} = 1.$$

Ймовірність станів ерлангівської СМО-1:

$$\begin{aligned}
 P_{1e} &= P_{11} + P_{12}; & P_{2e} &= P_{21} + P_{22}; \\
 P_{3e} &= P_{31} + P_{32}; & P_{4e} &= P_{41} + P_{42}.
 \end{aligned}
 \tag{4.39}$$

Характеристики СМО-1

$$\begin{aligned}
 P_{лік1} &= 1 - P_{утр1} = 1 - P_{відм1}. \\
 P_{відм1} &= P_{4e} - 0,5(P_{12} + P_{22} + P_{32}).
 \end{aligned}
 \tag{4.40}$$

Середнє число вимог, які знаходяться у черзі ( $\bar{r}$ ) та які знаходяться у системі ( $\bar{s}$ ) визначаються з формул:

$$\begin{aligned}
 \bar{r}_1 &= 0,5(1 \cdot P_{2e} + 2 \cdot P_{3e} + 3 \cdot P_{4e}); \\
 \bar{s}_2 &= 0,5(1 \cdot P_{1e} + 2 \cdot P_{2e} + 3 \cdot P_{3e} + 4 \cdot P_{4e}).
 \end{aligned}
 \tag{4.41}$$

Середній час перебування вимоги у черзі  $\bar{t}_{черг1}$  та середній час перебування вимоги у системі  $\bar{t}_{сист1}$  визначаються

$$\bar{t}_{черг1} = \bar{r}_1 \cdot \lambda^{-1}; \quad \bar{t}_{сист1} = \bar{s}_1 \cdot \lambda^{-1}
 \tag{4.42}$$

Середнє число зайнятих приладів обслуговування буде:

$$\bar{k}_1 = 0,5(1 \cdot P_{1e} + 1 \cdot P_{2e} + 1 \cdot P_{3e} + 1 \cdot P_{4e}).
 \tag{4.43}$$

Граф СМО-2 наданий на рис. 4.18.

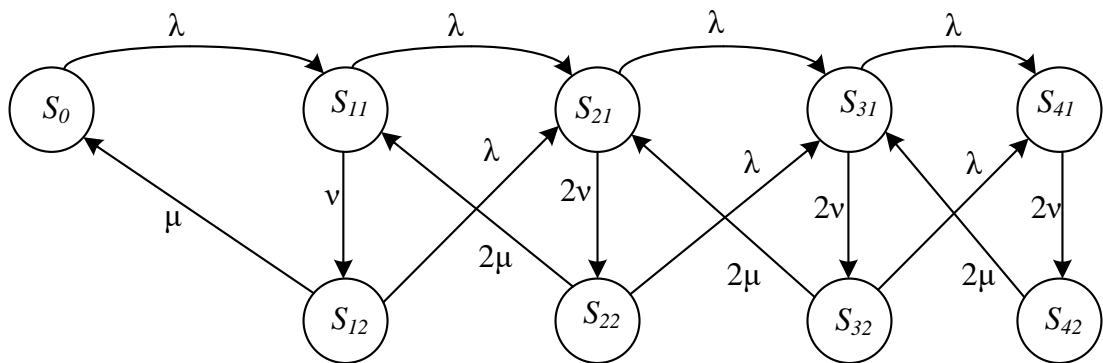


Рис. 4.18. Граф станів СМО-2 з M/E<sub>2</sub>/2/2

Матриця  $\Lambda_e$  інтенсивностей переходів СМО-2 має вигляд:

$$\Lambda_e = \begin{pmatrix} -\lambda & 0 & \mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & -(\lambda + \nu) & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \nu & -(\lambda + \mu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + 2\nu) & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\nu & -(\lambda + 2\mu) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -(\lambda + 2\nu) & 0 & 0 & 2\mu \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\nu & -(\lambda + 2\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda & \lambda & -2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\nu & -2\mu \end{pmatrix}$$

Алгебраїчні рівняння для фінальних ймовірностей СМО-2 визначаються із співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} \lambda P_0 &= \mu P_{12}; \\ (\lambda + \nu) P_{11} &= \lambda P_0 + 2\mu P_{22}; \\ (\lambda + \mu) P_{12} &= \nu P_{11}; \\ (\lambda + 2\nu) P_{21} &= \lambda P_{11} + 2\mu P_{32} + \lambda P_{12}; \\ (\lambda + 2\mu) P_{22} &= 2\nu P_{21}; \\ (\lambda + 2\nu) P_{31} &= \lambda P_{21} + 2\mu P_{42} + \lambda P_{22}; \\ (\lambda + 2\mu) P_{32} &= 2\nu P_{31}; \\ 2\nu P_{41} &= \lambda P_{31} + \lambda P_{32}; \\ 2\mu P_{42} &= 2\nu P_{41}. \end{aligned} \right\} \quad (4.44)$$

$$P_0 + P_{11} + P_{12} + P_{21} + P_{22} + P_{31} + P_{32} + P_{41} + P_{42} = 1.$$

Ймовірність станів ерлангівської СМО-2:

$$\begin{aligned} P_{1e} &= P_{11} + P_{12}; & P_{2e} &= P_{21} + P_{22}; \\ P_{3e} &= P_{31} + P_{32}; & P_{4e} &= P_{41} + P_{42}. \end{aligned} \quad (4.45)$$

Характеристики СМО-2:

$$P_{\text{лік2}} = 1 - P_{\text{упр2}} = 1 - P_{\text{відм2}}; P_{\text{відм2}} = P_{4e} - \frac{P_{12} + P_{22} + P_{32}}{2} \quad (4.46)$$

Середнє число вимог, які знаходяться у черзі  $\bar{r}_2$  та які знаходяться у системі  $\bar{s}_2$  визначаються з формул:

$$\begin{aligned} \bar{r}_1 &= 0,5(1 \cdot P_{2e} + 2 \cdot P_{3e} + 3 \cdot P_{4e}); \\ \bar{s}_2 &= 0,5(1 \cdot P_{1e} + 2 \cdot P_{2e} + 3 \cdot P_{3e} + 4 \cdot P_{4e}). \end{aligned} \quad (4.47)$$

Середній час перебування вимоги у черзі  $\bar{t}_{\text{черг}_2}$  та середній час перебування вимоги у системі  $\bar{t}_{\text{сист}_2}$ :

$$\bar{t}_{\text{черг}_2} = \bar{r}_2 / \lambda; \bar{t}_{\text{сист}_2} = \bar{s}_2 / \lambda. \tag{4.48}$$

Середнє число зайнятих приладів обслуговування  $\bar{k}_1$  визначається з формули:

$$\bar{k}_1 = 0,5(1 \cdot P_{1e} + 2 \cdot P_{2e} + 2 \cdot P_{3e} + 2 \cdot P_{4e}). \tag{4.49}$$

Проведемо дослідження СМО, схема якої зображена на рис. 4.16. Компоненти СМО: СМО-1(М/Е<sub>2</sub>/1/3) та СМО-2 (М/Е<sub>2</sub>/2/2).

Графіки залежності ймовірності  $P_{\text{л}}$  ліквідації наслідків аварійної ситуації від продуктивності  $\mu$  ліквідаційних робіт та числа циклів  $q$  оброблення вимог при  $\nu = 0,4$  та  $\nu = 0,7$  подані на рис. 4.19,а та рис. 4.19,б відповідно.

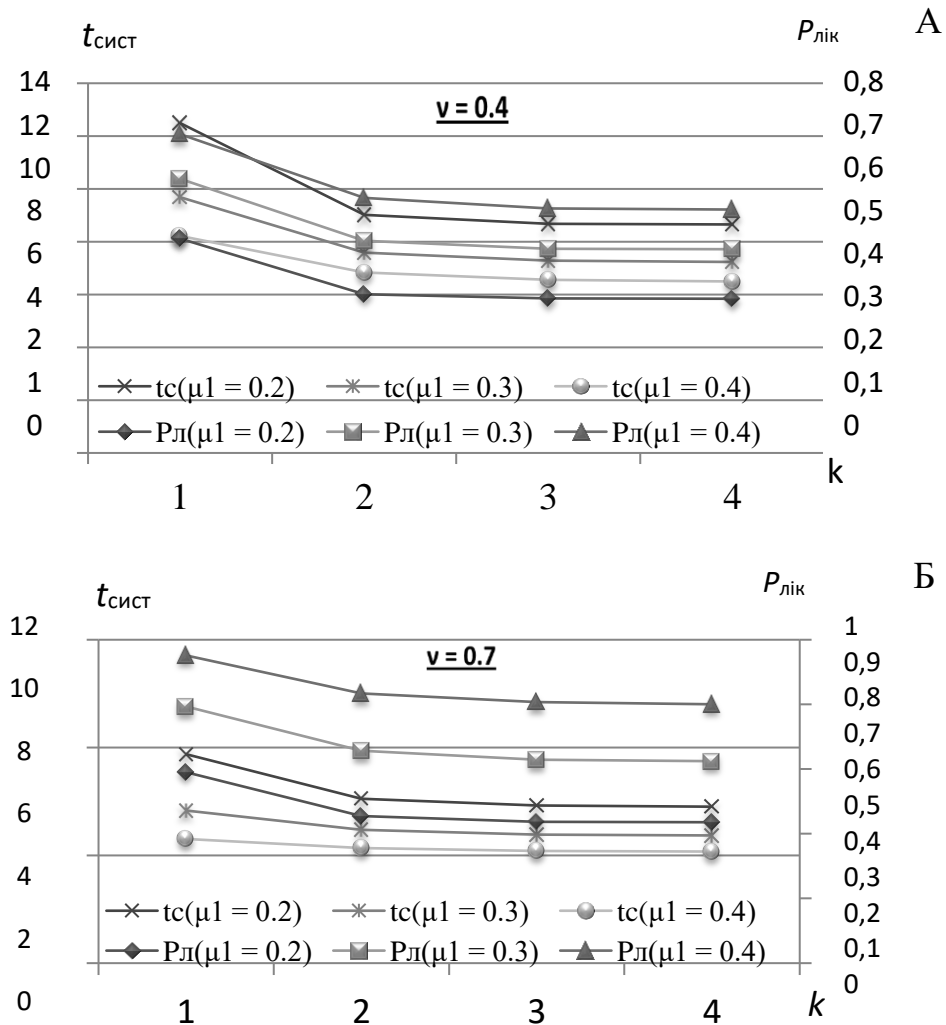


Рис. 4.19. Графіки залежностей ймовірності ліквідування  $P_{\text{л}}$  та середнього часу  $\bar{t}$  проведення робіт від інтенсивності ліквідаційних робіт  $\mu$  і числа сила циклів вимог  $q$  оброблення вимог при  $\nu = 0,4$  рис. 4.19а та  $\nu = 0,7$  рис. 4.19б

Таблиця 4.1

**Дані щодо результатів функціонування СМО при різних значеннях  
інтенсивності зосередження ліквідаційних підрозділів**

q	v	μ	$\bar{t}_c$	$P_{л}$	μ	$\bar{t}_c$	$P_{л}$	μ	$\bar{t}_c$	$P_{л}$	v	μ	$\bar{t}_c$	$P_{л}$	μ	$\bar{t}_c$	$P_{л}$	μ	$\bar{t}_c$	$P_{л}$				
1	0,4	0,2	12,3	0,45	0,3	9,7	0,57	0,4	8,1	0,68	0,7	0,2	9,8	0,60	0,3	7,0	0,80	0,4	5,8	0,95				
2	0,4	0,2	9,0	0,36	0,3	7,7	0,46	0,4	7,1	0,57	0,7	0,2	7,8	0,44	0,3	6,4	0,66	0,4	5,6	0,82				
3	0,4	0,2	8,7	0,35	0,3	7,6	0,45	0,4	7,0	0,55	0,7	0,2	7,6	0,43	0,3	6,0	0,64	0,4	5,4	0,80				
4	0,4	0,2	8,6	0,35	0,3	7,5	0,45	0,4	6,8	0,54	0,7	0,2	7,4	0,42	0,3	5,8	0,64	0,4	5,3	0,80				
$\sum_{i=1}^4 \bar{t}_c$	38,6				32,5				29,0				32,6				25,2				22,1			
$P_{л}$	$0,35 \leq P_{л} \leq 0,45$				$0,45 \leq P_{л} \leq 0,57$				$0,54 \leq P_{л} \leq 0,68$				$0,42 \leq P_{л} \leq 0,60$				$0,64 \leq P_{л} \leq 0,80$				$0,80 \leq P_{л} \leq 0,95$			

Графіки рис. 4.19 та дані табл. 4.1 свідчать про те, що із збільшенням циклів q оброблення вимог у СМО, величини ймовірності обслуговування  $P_{л}$  та середнього часу  $\bar{t}_c$  перебування вимоги у системі знижуються.

Зменшення цих параметрів СМО обумовлене збільшенням вхідного потоку  $\lambda_{1,q+1}$  на наступних циклах оброблення вимоги. Величина  $\lambda_{1,q+1}$  визначається з формули

$$\lambda_{1,q+1} = \lambda \left( 1 + \frac{P_{відм1} P_{відм2}}{P_{л2}} \right). \quad (4.50)$$

Збільшення вхідного потоку  $\lambda_{1,q+1}$  на вході СМО призводить до збільшення ймовірності відмов у СМО-1 та СМО-2 внаслідок збільшення середніх чисельності зайнятих каналів обслуговування та кількості вимог у черзі, що й обумовлює зменшення величин  $P_{л}$ .

Збільшення величини інтенсивності  $\mu$  оброблення вимог від 25% до 33% призводить до зменшення сумарного часу проведення ліквідаційних робіт приблизно з 11% до 16% при  $v = 0,4$ . При  $v = 0,7$  діапазон зменшення терміну проведення таких робіт становить від 12% до 15,5%.

При збільшення величини інтенсивності  $v$  зосередження ліквідаційних підрозділів на 43%, при відповідних значеннях інтенсивності  $\mu$  проведення ліквідаційних робіт, діапазон значень ймовірності  $P_{л}$  успішного проведення цих

робіт значно розширюється. Так, при  $v = 0,7$  та  $\mu = 0,4$  діапазон  $P_{\text{л}}$  буде дорівнювати  $0,80 \leq P_{\text{л}} \leq 0,95$ , а при  $v = 0,4$  та  $\mu = 0,4$  він становить  $0,54 \leq P_{\text{л}} \leq 0,68$ .

#### 4.4. Комплексне оцінювання впливу залізничних аварійних ситуацій на довкілля

У попередніх розділах цієї роботи були розглянуті алгоритми ймовірних процесів розвитку типових аварійних ситуацій з небезпечними вантажами та алгоритми визначення параметрів небезпечних чинників таких ситуацій, які дають можливість встановити масштаби та характер впливу аварійних ситуацій на природне середовище, об'єкти, рухомий склад з людьми, потенційно небезпечні об'єкти в різних зонах безпеки, а також різноманітні об'єкти та рухомий склад, на які можуть впливати небезпечні чинники аварії.

Результати проведеного моделювання станів залізничної транспортної системи при транспортуванні небезпечних вантажів у разі виникнення аварійних ситуацій, впливу таких ситуацій на довкілля, а також моделювання роботи ліквідаційних підрозділів при локалізації та ліквідації наслідків таких ситуацій дозволяють визначити ймовірності негативного впливу таких ситуацій на довкілля.

У зв'язку з цим виникає необхідність комплексного оцінювання впливу аварійних ситуацій на довкілля, тобто ризику завдання шкоди довкіллю такими ситуаціями, враховуючи і вартісний вимір. Такий ризик запропоновано визначати за інтегральною формулою, що ґрунтується на відомих формулах [142 – 145]:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_i P_j(i) U_i \quad (4.51)$$

де  $P_i$  – ймовірність знаходження довкілля під дією небезпечних чинників аварійної ситуації, яка визначена вище;

$P_j(i)$  – ймовірність настання дії небезпечних чинників аварійної ситуації внаслідок нерациональних дій  $j$ -х ліквідаційних підрозділів у  $i$ -й ситуації;

$$U_i = \sum_{j=1}^n H_i C_j \quad (4.52)$$

де  $H_i$  та  $C_i$  повинні трактуватися, на відміну від [134], таким чином:

$H_i$  – кількість компонент (людей, повітря, води, ґрунтів, рухомого складу, споруд тощо), на які впливають небезпечні чинники у  $i$ -й ситуації;

$C_i$  – вартість одиниці компоненту, на які впливають небезпечні чинники, визначена прямим чи непрямим способом [145].

Наведені формули дають можливість їх практичного застосування для оцінювання впливу аварійних ситуацій на довкілля.

#### Висновки до розділу 4

У четвертому розділі дисертаційної роботи обґрунтована можливість застосування методів теорії систем масового обслуговування для формального опису процесів функціонування системи «навколишнє середовище – аварійний об'єкт – ліквідаційні підрозділи» і на підставі цього отримані такі результати:

1. Вперше доведена можливість застосування класичних методів теорії масового обслуговування та адаптовано ці методи для обґрунтування та моделювання різних схем організації проведення аварійно-відновних робіт структурними підрозділами функціональної підсистеми залізничного транспорту, формувань мережевих систем (з'єднань) таких підрозділів, забезпечення їх необхідними ресурсами та прогнозування і оцінювання результативності дій таких підрозділів.

2. Вперше встановлені кількісні співвідношення між інтенсивністю впливу небезпечних чинників залізничної аварійної ситуації, часом прибуття, розгортання та продуктивності дій ліквідаційних підрозділів і ефективністю виконання ліквідаційних робіт.

3. Доведено, що суттєве зменшення негативного впливу наслідків залізничної аварійної ситуації на довкілля можливе при скороченні терміну проведення ліквідаційних робіт, а також при зменшенні часу зосередження підрозділів та застосуванні сил і засобів необхідної продуктивності, а збільшення часу зосередження потребує збільшення у рази продуктивності таких сил та засобів.



4. Встановлено, що якщо засоби ліквідації наслідків залізничної аварійної ситуації не відповідають її характеру та/або вкрай малопродуктивні, то навіть при їхньому вчасному зосередженні на місці ліквідації, вони не будуть ефективними, інакше кажучи, навіть якщо засоби ліквідації достатньо ефективні, але зосередження їх на місці виникнення цієї ситуації відбулося із запізненням, то вони також не дадуть ефекту.

## РОЗДІЛ 5

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИНЦИПУ МЕРЕЖЕЦЕНТРИЧНОГО УПРАВЛІННЯ РЕАГУВАННЯМ НА ЗАЛІЗНИЧНІ АВАРІЙНІ СИТУАЦІЇ

Ефективне управління локалізацією екологічно небезпечних залізничних аварійних ситуацій та ліквідацією їх наслідків є одним з основних завдань функціональної підсистеми «Сили і засоби реагування на надзвичайні ситуації на залізничному транспорті». Таке управління полягає у раціональному (відповідно до ситуативних критеріїв) вжитті комплексу заходів, до яких належать аварійно-рятувальні та інші невідкладні роботи, що здійснюються в разі виникнення аварійних ситуацій техногенного та природного характеру і спрямовані на припинення дії їхніх небезпечних чинників, рятування життя та збереження здоров'я людей, локалізацію зон цих ситуацій, а також відновлення нормальної роботи залізничного транспорту.

Успіх проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт досягається [57, 107, 163, 164]:

- постійною готовністю підрозділів до дій за призначенням;
- якісним проведенням розвідки;
- всебічним оцінюванням обстановки та прийняттям обґрунтованого рішення на застосування сил і засобів;
- правильним визначенням напрямку зосередження основних зусиль підрозділів;
- організацію безперервного і надійного управління силами та засобами реагування на аварійні ситуації;
- організацією чіткої взаємодії органів управління та підрозділів усіх рівнів, які беруть участь у ліквідації наслідків аварійної ситуації та їхнім дієвим маневруванням під час виконання завдань;
- активними діями, дисциплінованістю та високим рівнем професійної підготовки особового складу підрозділів;
- всебічним і повним матеріально-технічним забезпеченням дій підрозділів.

Основою управління силами при ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій є рішення керівника оперативного штабу – керівника робіт з ліквідації аварійної ситуації. Управління силами, як це було зазначено вище, полягає у цілеспрямованій і наполегливій діяльності керівника оперативного штабу, спрямованій на підтримання готовності підрозділів, підготовку їх до дій та організацію виконання підрозділами завдань щодо проведення аварійно-рятувальних та інших робіт, відновлення сталого функціонування залізничного транспорту.

Завдання, які виконуються оперативним штабом при реагування на залізничні аварійні ситуації детально розглянуті у третьому розділі цієї роботи. В ньому також була розглянута робота стаціонарних залізничних пунктів управління на початковому етапі режиму діяльності функціональної підсистеми за аварійної ситуації.

Локалізація залізничних аварійних ситуацій та ліквідація їх наслідків, особливо з небезпечними вантажами, за кількістю людських, матеріальних, фінансових та інших ресурсів, можливих втрат, масштабами управління, застосування різноманітних сил та засобів, а також за раптовістю виникнення і тривалістю подій у деяких випадках аналогічна воєнним діям.

Реагування на залізничні аварійні ситуації, особливо з небезпечними вантажами, обумовлене великою різноманітністю пожежо- вибухонебезпечних властивостей вантажів, наявністю контактної мережі, складністю під'їзду підрозділів до аварійних пасажирських та вантажних поїздів у небезпечних зонах тощо.

Відсутність на залізничному транспорті сучасних засобів відеоспостереження за місцем виникнення залізничної аварійної ситуації, наприклад безпілотних літальних апаратів, значно збільшує час на отримання інформації про наявність потерпілих, стан аварійного рухомого складу, колії, будівель і споруд, об'єктів довкілля, розвиток небезпечних чинників такої ситуації тощо.

Все це дуже ускладнює роботу чергового персоналу стаціонарних пунктів управління та оперативного штабу з ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій.

Разом з цим, оперативному штабу та його керівникові потрібно у найкоротший термін проаналізувати інформацію, що надійшла, забезпечити єдине розуміння членами штабу обстановки, яка сталася, виробити обґрунтоване рішення та довести його до підрозділів.

Ефективним засобом раціонального управління локалізацією та ліквідацією наслідків залізничних аварійних ситуацій є системи підтримки прийняття рішень, про які згадувалось вище. Проте ефективність самих СППР залежить від принципів, за якими побудовані моделі, що покладені в основу, а також їх програмно-апаратного забезпечення та якості систем зв'язку з користувачами.

Реагуванню на залізничні аварійні ситуації, які супроводжуються пожежами або вибухами небезпечних вантажів, притаманна просторова масштабність і необхідність впровадження у контур управління прогностичної складової для оцінювання загроз від небезпечних чинників такої аварійної ситуації, а також моделювання можливого результату дій підрозділів з ліквідації наслідків цієї ситуації. Такі ситуації за своїм динамізмом, можливими масштабами та негативними наслідками, як це було показано вище, мають певні аналогії з воєнними діями.

Аналіз сучасних методів управління військами дозволив зробити висновок про те, що суттєве підвищення ефективності управління досягається за рахунок забезпечення можливості своєчасного отримання вірогідних даних про противника, наочного та зрозумілого відображення єдиної картини бойової обстановки випередження противника в аналізі інформації, прийнятті рішень та доведення їх до військ. Це забезпечується на підставі успішно апробованого у військовій справі принципу мережецентричного управління [265 – 284].

### **5.1. Передумови реагування на залізничні аварійні ситуації з використанням принципу мережецентричного управління**

Мережецентрична система управління народилася завдяки досягненням, отриманим при реалізації концепції інформаційних війн, а також розвинутих систем тилового і технічного забезпечення військ. Це призвело до появи принципово нових можливостей у керуванні військами за рахунок систематичного спостереження за

змінами в обстановці у будь-якому регіоні світу, її динамічному та адекватному оцінюванні, автоматизованій розробці ефективних способів нанесення ударів по виявлених об'єктах і точного наведення ударних засобів у будь-якому районі земної кулі [267 – 283].

Мережецентрична концепція, що уперше була застосована для ведення бойових дій, полягає у об'єднанні усіх ударних, логістичних, інформаційних, дипломатичних, соціальних та інших засобів у мережецентричну систему, яка містить усі рівні і напрями управління, та дозволяє здійснити принцип зосередження на результатах, а не на зосередженні сил.

Дослідження сучасного досвіду бойового застосування інформаційно-керуючих систем виявили, що в основі мережецентричного управління лежать дві взаємозв'язані проблеми: забезпечення учасників бойових дій необхідною ситуаційною поінформованістю та необхідністю пошуку нових рішень у методології організації бойового управління.

Поняття «ситуаційна обізнаність» розкрив у своїх роботах американський вчений Мік Ендслі. Згідно з його класичним визначенням «ситуаційна обізнаність» є «почуттєве сприймання елементів обстановки у єдиному просторово-часовому континуумі, свідоме сприймання їх значення, а також проєціювання цих елементів та їх можливих значень у найближче майбутнє» [266, 268, 269].

Згідно з його моделлю стан ситуаційної поінформованістю є результатом аналізування та оцінювання розвитку ситуації. У функціональному плані ця модель містить у собі три основні рівні: отримання даних обстановки, усвідомлення, розуміння своїх дій і можливого розвитку ситуації та два технологічних рівня: рівень управління процесами збирання та актуалізації даних обстановки та рівень візуалізації. На рівні управління процесами збирання та актуалізації даних обстановки забезпечується логічна послідовність і координація процесу збирання, аналізування та узагальнення даних обстановки, а людино-машинний інтерфейс моделі забезпечує наочність та зручність подання цих даних користувачу.



Основна технологічна роль у моделі належить процедурі управління інформацією, що полягає у збиранні, накопиченні, структуруванні, зберіганні та оперативному вибиранні необхідних для роботи даних. Ці дані надходять у систему ситуаційної обізнаності від локомотивної бригади, начальника найближчої до місця транспортної події станції, бригадира колії, механіків СЦБ і зв'язку, начальників аварійно-польової команди (АПК), відновного (ВП) та пожежного (ПП) поїздів, бригадирів відновних бригад СЦБ і зв'язку, енергопостачання, начальників підрозділів, що залучаються до проведення ліквідаційних робіт, а також вищих і взаємодіючих органів управління.

Процес оцінювання обстановки здійснюється безперервно і пов'язаний з аналізом інформації, що надходить, формуванням загальної картини ходу реагування на залізничну аварійну ситуацію та прогнозування можливих варіантів розвитку обстановки. У результаті такого процесу відбувається єдине розуміння членами оперативного штабу і фахівцями взаємодіючих організацій обстановки, вироблення пропозицій та прийняття рішень.

У цій моделі найскладнішим завданням, є завдання інтеграції та узагальнення різноманітної інформації, яка надходить з різних джерел, підвищення її вірогідності та якості. Розв'язання цього завдання, у свою чергу, пов'язане з розробленням прикладних методів і алгоритмів аналізування, кореляції та відображення даних обстановки у реальному масштабі часу.

Таким чином, для підвищення ефективності управління реагуванням на залізничні аварійні ситуації є створення системи управління, здатної на інтелектуальному рівні обробляти різноманітну вхідну інформацію та видавати її у зручному вигляді користувачеві, мати математичні моделі прогнозування процесів розвитку таких ситуацій та планування варіантів дій підрозділів з відповідними програмними засобами проведення необхідних розрахунків.

Управління такими масштабними процесами, які можуть минати дуже швидко, неможливо без використання комп'ютерних технологій, що, на наше переконання, буде найефективнішим застосуванням методів мережецентричного управління [4].

Застосування в умовах невизначеності часових параметрів ліквідаційних процесів комплексу розрахункових методів мережецентричного управління та мережевого планування дозволяє обґрунтувати терміни успішного виконання таких заходів та створити методологічну основу СППР. Застосування інформаційних технологій на основі мережецентричного принципу управління ліквідаційними силами і засобами дозволить ефективно організовувати та контролювати їхню діяльність в режимі реального часу.

Мережецентричні принципи систем управління дозволяє реалізовувати режим ситуаційної поінформованості, який детально розглянутий в дисертаційній роботі. Втілення якого в життя можливе завдяки формуванню і підтриманню цілісного контекстного інформаційного середовища та залучення у процес його актуалізації якомога більшого числа джерел первинної інформації.

Мережецентричний принцип управління передбачає наявність єдиного інформаційного простору на складній мережі до складу якої належить мережа управління, що об'єднує ситуаційні центри дирекцій залізничного транспорту, регіональних філій залізниць з пунктами управління диспетчерського і чергового персоналу з необхідними засобами зв'язку та інформаційно-комунікаційними технологіями, мережі ліквідаційних підрозділів з їхніми персоналом і технікою.

Кожен відновний та пожежний поїзди, інженерні машини, спеціальні автомотриси і дрезини ліквідаційних підрозділів необхідно оснастити комп'ютерною технікою з Wi-Fi, GPS та GSM-модулем, відповідними датчиками і системами відеоспостереження за допомогою яких інформація про хід робіт, обстановку на об'єкті і стан техніки через безпроводні мережі Wi-Fi надходять до сервера СППР, де опрацьовуються, створюючи загальну інформаційну картину, яка дозволяє приймати раціональне рішення.

## **5.2. Підвищення ефективності локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків на основі мережецентричного управління**

Формування цілей та їх реалізація є однією з найважливіших процедур прийняття управлінських рішень щодо реагування на залізничні аварійні ситуації.



Мережецентричні методи комп'ютерної технології генерації цілей для вжиття заходів реагування на аварійну ситуацію застосовуються у три етапи [273 – 275]:

- формування можливих цілей паралельної локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків. Такі цілі формуються на підставі аналізування аналогічних аварійних ситуацій, які виникали у минулому. Для формування цілей, зокрема, може застосовуватися апарат продукційних систем, який нині широко використовується у теорії штучного інтелекту для створення алгоритмів пошуку і моделювання розв'язування задач людиною. Продукційна система забезпечує управління процесом розв'язання задач за зразком та складається з набору продукційних правил, робочої пам'яті і циклу керування «розпізнавання – дія» [16, 55, 61, 104, 106, 110, 157, 210, 211, 252, 283];

- комп'ютерне узгодження цілей з урахуванням їхньої несуперечливості, синергетичного ефекту результатів аналізу наслідків аналогічних аварійних ситуацій та обмежень, що виникають у процесі розвитку таких ситуацій;

- комп'ютерне оцінювання, ранжирування та вибір цілей.

Процес формування цілей, як правило, є ітераційним процесом, що обумовлюється браком сил і засобів, невиконанням завдань з сформованих раніше цілей, суперечливістю цілей тощо. Формування цілей у процесі планування заходів реагування на аварійні ситуації повинно забезпечувати:

- вироблення управлінських рішень за поточними та уточненими даними;

- основу для подальшого планування дій керівників різних рівнів та напрямів реагування на аварійну ситуацію;

- надання пояснень виконавцям щодо рішень, прийнятих керівництвом.

Під час вибору альтернатив рішень є потреба у врахуванні великої кількості суперечливих вимог, тобто, виникає необхідність оцінювання варіантів рішень за багатьма критеріями. При формуванні цілей комп'ютерною системою можуть поставати такі проблеми [265, 266]:

- ціль виникає, досягається і «руйнується» іншими цілями;

- на місці зруйнованої цілі виникають нові цілі;

- народжуються нові цілі, які не досягаються;

– система не здатна сформувати нову ціль, що може призвести до блокування діяльності системи. Тому потрібно періодично аналізувати та переглядати список цілей, який є у базі даних системи по кожній типовій ситуації, і можливі наслідки їхнього розвитку, та вносити необхідні корективи.

Досягненню головної мети відновлення руху поїздів і маневрових робіт у можливо у можливо короткий термін можуть передувати цілі, які обумовлені можливими наслідками екологічно небезпечних аварійних ситуацій, рельєфом місцевості, профілем місця транспортної події, наявністю необхідних сил і засобів, напруженістю руху, властивостями небезпечних вантажів тощо. До таких цілей, зокрема, належать: рятування людей, організація руху поїздів за резервними маршрутами, відбудова колій, пристроїв автоматики, зв'язку та контактної мережі, локалізація забруднень, нейтралізація і дегазація місцевості і вантажів, гасіння пожежі тощо.

Особливістю реагування на екологічно небезпечні аварійні ситуації з небезпечними вантажами є необхідність дотримання суворої черговості проведення локалізаційних та ліквідаційних робіт. Наприклад, не можна проводити підіймання аварійного рухомого складу до завершення нейтралізування виліву з нього вантажу, чи відновлення контактної мережі до відбудови аварійної колії, коли або узбіччя не дозволяють розташування відновної техніки, або така техніка відсутня [4, 163, 164].

Такі особливості проведення ліквідаційних робіт спонукають здійснювати формування списку робіт з урахуванням часу можливої затримки їхнього виконання. З іншого боку, якщо роботи для досягнення деякої мети потребують значного часу або великої кількості сил і засобів, тоді вона руйнується та замінюється іншою. Наприклад, на одноколійних перегонах відновлення функціонування пристроїв автоматики може бути замінено організацією руху поїздів за письмовими повідомленнями.

Важливим завданням комп'ютерної системи управління є формування списку критеріїв, за якими будуть оцінюватися цілі.

Комп'ютерні технології у цьому разі повинні використовувати як об'єктивні дані, так й суб'єктивні дані ОПР. Для кожної типової ситуації існує свій набір критеріїв, який може варіюватися залежно від обстановки, що склалася, та суб'єктивних переваг ОПР. Прикладом такого набору критеріїв може бути: повнота рішень (ступінь його ефективності); достатність сил і засобів; витрати часу на досягнення цілі; досяжний ефект (виливання вантажу припинено, короткочасна відбудова контактної мережі здійснена тощо); ризик збитків, пов'язаних з реалізацією цілі.

Набір критеріїв зберігається у базі даних системи управління реагуванням на аварійну ситуацію по кожній типовій ситуації. З множини критеріїв ОПР, у інтерактивному режимі роботи з системою управління вибирають деяку множину критеріїв, за якими у подальшому будуть ранжируватися цілі.

Мережецентрична система за рахунок використання функціональних можливостей мережі дозволяє розширити методи дистанційного узгодження рішень. Система управління видає на дисплей кожного представника служб і організацій, які беруть участь у реагуванні на аварійну ситуацію, список критеріїв і пропонує їм викреслити ті з них, з якими вони не згодні, або додати нові, якщо у цьому є потреба. У результаті система управління дає можливість керівнику оперативного штабу узгодити список ситуативних критеріїв за якими будуть оцінюватися цілі реагування на аварійну ситуацію.

Повнота набору критеріїв, у свою чергу, пов'язана з проблемою невизначеності, бо із збільшенням числа ситуативних критеріїв можна підвищити точність розв'язування завдання та, у свою чергу, врахувати більшу кількість чинників. Але, якщо ці чинники враховуються невірно, то зростає кількість похибок та їх значущість.

Зараз існує певна кількість різноманітних комп'ютерних процедур узгодження думок фахівців (експертів) для комп'ютерного ранжирювання цілей реагування на аварійні ситуації, наприклад, принцип очікуваної корисності Неймана і Моргенштерна [148 ].

Особливостями ранжирування цілей реагування на залізничні аварійні ситуації є необхідність врахування можливості доступу до місць проведення ліквідаційних заходів. Наприклад, при сходженні з рейок поодинокого рухомого складу на одноколіїній залізничній колії, коли колія ушкоджена та узбіччя не дозволяють розташування відновної техніки, постановка рухомого складу на рейки за допомогою залізничного вантажопідйомного крана можлива тільки після відбудови залізничної колії.

Усі ці заходи здійснюються відповідними спеціалізованими підрозділами різних служб залізниці, які розташовані у встановлених місцях постійної дислокації на мережі залізниці. Тобто, для використання таких підрозділів необхідний певний час на зосередження та розгортання сил і засобів у готовність до визначених дій.

Окремої уваги заслуговує проблема визначення обсягів ресурсів, необхідних для проведення заходів реагування, забезпечення людськими і матеріальними ресурсами, їх накопичення на місцях проведення робіт, зокрема й паралельно з проведенням ліквідаційних заходів.

З огляду на наведене вище, комп'ютерна система для планування складу черг паралельного досягнення цілей повинна враховувати наявність необхідних для цього ресурсів, можливість доступу до місць проведення заходів, умови місцевості, тривалість виконання операцій з досягнення цілі, що передує даній, резерв часу виконання усього комплексу робіт тощо.

Вибір сценарію досягнення цілі є важливим етапом мережецентричних методів управління реагуванням на аварійні ситуації. Сценарії реалізації цілей належать до класу так званих неповних математичних моделей, що містять лише суттєві чинники, й які можуть бути формалізовані з певним ступенем точності. Ці моделі, здебільшого, застосовуються в задачах оцінювання різних варіантів управлінських рішень з розв'язування визначених завдань і враховують як об'єктивні, так й суб'єктивні дані ОПР [284].

Списки можливих сценаріїв для реалізації у мережецентричних методах локалізації аварійних ситуацій та ліквідації їх наслідків доцільно складати на підставі розглянутих вище алгоритмів дій оперативних штабів. Такі списки можуть

бути доповнені або скорочені ОПР, а відповідні зміни внесені до пам'яті комп'ютерної системи.

Досвід реалізації сценаріїв ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій свідчить про те, що вони здійснюються поетапно, з використанням на кожному етапі певних ресурсів протягом часу тривалості етапу. При нестачі ресурсів для кожного з таких етапів, реалізується більш пріоритетний етап. Очевидно, що кількість (обсяг) ресурсів ( $C_k$ ), які необхідні для реалізації  $k$ -го сценарію, залежить від кількості ресурсів ( $C_{ki}$ ), необхідних для кожного з  $n_k$  етапів. Тобто:

$$C_k = \bigcup_{i=1}^{n_k} c_{ki}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (5.1)$$

Якщо оцінка ефективності виконання  $i$ -го етапу  $k$ -го сценарію з урахуванням кількості наданого ресурсу ( $d_{k,i}(c_{k,i})$ ), то сумарна ефективність досягнення цілі реалізації  $k$ -ї стратегії може залежати від методу формування  $n$  етапів їх виконання. Тобто, виникає оптимізаційна задача формування етапів реалізації сценаріїв [253,263].

$$M = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k} d_{k,i}(c_{k,i}) \rightarrow \max, \quad C_k \leq \text{const}, \quad k = \overline{1, K}. \quad (5.2)$$

Враховуючи те, що термін часу ліквідації наслідків аварійної ситуації має обмеження, то

$$T \leq \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_i} t_{k,i}, \quad (5.3)$$

де  $t_{k,i}$  – час, необхідний для виконання  $i$ -го етапу  $k$ -ї стратегії.

Звідки виникає переборна задача знаходження етапів виконання сценаріїв залежно від необхідних ресурсів для кожного етапу та наслідків аварійних ситуацій. Тобто, задача зводиться до відомих методів сітьового планування виконання робіт.

Як вже зазначалося вище, ліквідація сходів рухомого складу з рейок, відбудова колії, контактної мережі, пристроїв СЦБ і зв'язку здійснюється спеціалізованими підрозділами, що входять до функціональної підсистеми [285]. Крім того, для ліквідації наслідків залізничних аварійних ситуацій залучаються

також сили і засоби ЗСУ, МВС, ДСНС, які можуть бути розподілені на окремі підрозділи, навіть на окремі засоби (екскаватори, автомашини, бульдозери тощо).

Сценарії та їх етапи можуть мати різні пріоритети доступу, наприклад, перше ніж проводити відбудову колії, необхідно ліквідувати наслідки розливу вантажу. Тобто, до ресурсів, що поділяються для виконання різноманітних заходів (операцій, робіт) належить територія з небезпечними зонами аварійної ситуації, технічні засоби, особовий склад ліквідаційних підрозділів, матеріальні та фінансові ресурси тощо.

Наявність таких ресурсів викликає необхідність синхронізації щодо забезпечення заданої дисципліни доступу до розподіленого ресурсу, а також для виконання робіт (операцій) у порядку суворої черговості. Множина робіт (операцій, процесів) створюють чергу з пріоритетом сценарію, якому вони належать. При рівності пріоритетів, вони займають чергу у порядку їх надходження на обслуговування. У базі даних системи управління зберігається список робіт (операцій, процесів) із зазначенням їхніх пріоритетів та можливістю паралельного виконання, які можуть корегуватися у динаміці управління.

Синхронізація здійснюється за чинниками виконання робіт або використання ресурсів або за тим та іншим. За двома чинниками синхронізація здійснюється коли за технічними умовами можливе виконання певних робіт, але ресурсів для їх реалізації не вистачає, або вони використовуються для іншої роботи.

Комп'ютерна система управління для синхронізації сценаріїв може використовувати добре відомі у паралельному програмуванні змінні типу «подія» - *s*, оператори – «заявити подію типу» (має вид *POSTs*) та «очікувати подію» (має вид *WAITs*). Оператор типу *WAITs*, якщо подія *s* не відбулася, затримує виконання процесу до моменту виникнення події *s*, після чого або продовжує, або ініціює виконання процесу. Оператор типу *POSTs* відмічає, що подія *s* відбулася, й за заданою дисципліною дозволяє виконання раніше затриманих процесів.

Наприклад, коли необхідність нейтралізації залізничної колії від пролитого небезпечного вантажу, операція *WAITs* комп'ютерної системи управління забороняє проведення інших операцій, крім операції нейтралізації.

Ще однією особливістю ліквідації залізничних аварійних ситуацій є те, що черга сценаріїв щодо реалізації будується за принципом їхньої значущості або технологічної необхідності. При цьому враховується гранично допустимий час реалізації  $i$ -го етапу  $k$ -го сценарію ( $T_k(i)$ ), який порівнюється з фактичним часом  $t_k(i)$ . Коли  $t_k(i) > T_k(i)$ , це означає, що потрібно переглянути сценарій ліквідації екологічно небезпечної аварійної ситуації.

Процес синхронізації може бути реалізований у комп'ютерній системі управління на підставі загальної черги до всіх ресурсів або окремої черги до кожного ресурсу. Підсистема управління реалізацією сценаріїв містить засоби їхньої синхронізації та засоби розподілу загальних ресурсів між такими сценаріями.

Одним з напрямів оптимізації проведення аварійно-рятувальних та аварійно-відновних робіт є підвищення ефективності керування різноманітними ліквідаційними підрозділами на базі чітко побудованої системи управління цими силами і засобами в екстремальній ситуації з широким використанням сучасних інформаційних технологій, зокрема, й систем підтримки прийняття рішень.

Система підтримки прийняття рішень керівника ліквідації аварії дозволить здійснювати інформаційне, аналітичне, організаційне й технічне забезпечення ітеративного процесу аналізу аварійних ситуацій, які склалися внаслідок залізничних транспортних подій, підготовку й оцінювання варіантів рішень, вибір остаточного рішення для ліквідування наслідків аварійної ситуації. При цьому СППР повинна враховувати людський досвід дій в аналогічних ситуаціях в минулому, але не сліпо його копіювати в ситуації, що відбулася, а виконувати вимоги чинних директивних документів щодо організації робіт, передбачати можливість зміни рішення при зміні ситуації. Тобто, СППР повинна мати можливості сприймання та опрацювання оперативної вербальної та графічної інформації, а також мати бази даних та знань. Найпоширенішим та практично опрацьованим апаратом для надання знань, необхідних для прийняття рішень, є метод продукцій штучного інтелекту [69, 116, 285 – 290, 335].

Розглянемо на прикладі умовної залізничної аварійної ситуації процес вироблення продукційних правил бази даних комп'ютерної системи управління

щодо формування цілей та їх реалізації в ситуації ( $S_1$ ), коли на перегоні (його позначенням згідно з прийнятими символами є « $pee'_2$ » [55]) одноколіїної ( $pee''_6$ ) електрифікованої ділянки ( $pee''_8$ ) залізничної колії стався схід поодинокого рухомого складу ( $sers'_1$ ), інформація про характер сходу і ушкодження елементів інфраструктури залізниці відсутня ( $si'_3$ ) [4].

Продукційне правило, яке описує ситуацію  $S_1$ , має вигляд:

$$S_1 : [(((pee'_2 \wedge pee''_6 \wedge pee''_8) \wedge sers'_1) \wedge si'_3)]. \quad (5.4)$$

Досвід організації ліквідації подібних аварійних ситуацій, який обумовлений вимогами чинних документів з організації аварійно-відновних робіт і руху поїздів, дозволяє комп'ютерній системі управління сформувати рекомендацію ( $Re_1$ ), продукційне правило якої визначається виразом:

$$Re_1 : (s_1 \rightarrow Om''_1 \wedge CR \wedge rw_3^{IV}). \quad (5.5)$$

Рекомендація ( $Re_1$ ) визначає паралельне вжиття заходів щодо організації руху поїздів за резервними маршрутами ( $Om''_1$ ), розвідки місця транспортної події ( $CR$ ) і організації зв'язку за резервною схемою ( $rw_3^{IV}$ ).

Нехай результатами розвідки ( $ER$ ) буде: на перегоні ( $pee'_2$ ) з насипом прямої ділянки колії без ухилу ( $pee''_2$ ) сталося сходження з рейок поодинокого рухомого складу ( $sers'_1$ ) із сходженням з рейок одного візка, який вийшов з конструктивного шкворневого з'єднання з рамою вагона і перебуває під кузовом вагона ( $sers''_5$ ), пошкоджені проміжні опори контактної мережі ( $\overline{cus'_1}$ ), пристрої СЦБ і зв'язку ( $\overline{cus'_2}$ ), на колії знаходиться аварійний рухомий склад ( $\overline{cus'_3}$ ), вантаж не ушкоджений ( $sdg'_6$ ), узбіччя дозволяє розташування відновної техніки ( $sus'_5$ ).

Продукційне правило результату розвідки ( $ER_1$ ) має вигляд:

$$ER_1 : [(pee'_2 \wedge pee''_1) \wedge (sers'_1 \wedge sers''_5) \wedge \bigwedge_{i=1}^3 \overline{cus'_i} \wedge cus'_5 \wedge sdg'_6]. \quad (5.6)$$

Документами, які регламентують проведення аварійно-відновних робіт ( $RW$ ), визначається, що до складу таких робіт входять операції з постановки рухомого складу на рейки ( $RW'$ ) відбудови залізничної колії ( $RW'''$ ), контактної мережі ( $RW''$ ), пристроїв СЦБ і зв'язку ( $RW^{IV}$ ), тобто [4]:



$$ER_1 \rightarrow [RW : (RW' \wedge RW''' \wedge RW'' \wedge RW^{IV})]. \quad (5.7)$$

Чинні документи з організації відновних робіт визначають можливість звільнення залізничної колії від аварійного рухомого складу двома способами: постановкою аварійного рухомого складу на рейки з подальшою евакуацією ( $rw'_2(T'_2)$ ), за умови, що аварійна залізнична ділянка колії не має напруженого руху, або скиданням аварійного рухомого складу під укіс ( $rw'_3(T'_3)$ ), якщо ділянка має напружений графік руху поїздів ( $T$ ).

Продукційне правило, яке визначає способи звільнення залізничної колії від аварійного рухомого складу, має вираз:

$$RW' \leftarrow [rw'_2(T'_2 \leq T) \vee rw'_3((T'_3 \ll T_2) \wedge (T_2 > T))]. \quad (5.8)$$

Умова постановки аварійного рухомого складу на рейки визначається за допомогою продукційного правила:

$$rw'_2(T'_2) : [((sers'_1 \wedge sers''_5) \wedge cus'_5 \wedge sdg'_5) \rightarrow ((rw'_{24}(T'_{24}) \vee rw'_{25}(T'_{25}))], \quad (5.9)$$

де  $rw'_{24}(T'_{24})$  – постановка аварійного рухомого складу на рейки за допомогою залізничного вантажопідйомного крана за час  $T'_{24}$ ;  $rw'_{25}(T'_{25})$  – проведення аналогічної операції за допомогою автокрана, розташованого на узбіччі залізничної колії, за час  $T'_{25}$ .

Умова скидання аварійного рухомого складу під укіс визначається продукційним правилом:

$$rw'_3(T'_3) : [((sers'_1 \wedge sers''_5) \wedge cus'_5 \wedge sdg'_6 \wedge ((T'_2 \geq T) \wedge (T'_3 < T))]. \quad (5.10)$$

Зважаючи на те, що залізнична колія з аварійним рухомим складом ушкоджена ( $\overline{cus}_3$ ), а ділянка не напружена, комп'ютерна система формує продукційні правила можливих способів прибирання аварійного рухомого складу:

$$rw'_2(T'_2) : [((sers'_2 \wedge sers''_5) \wedge \overline{cus}'_3 \wedge cus'_5 \wedge sdg'_6) \rightarrow \rightarrow rw'_{25}(T'_{25}) \vee RW'''(T''') \wedge rw'_{24}(T'_{24})]. \quad (5.11)$$

Продукційне правило (5.11) визначає можливість виконання таких робіт за допомогою автокрана з узбіччя, або за попереднього виправлення ушкодженої колії та встановлення на ній залізничного вантажопідйомного крана.

Виправлення залізничної колії може здійснюватися за допомогою електричних шпалопідбійок ( $rw_1'''(T_1''')$ ), підбиранням шпал ручними торцевими відбійниками ( $rw_2'''(T_2''')$ ), чи за допомогою виправно-підбивально-рятувальної машини циклічної дії типу ВПР ( $rw_3'''(T_3''')$ ) за своїми технологіями виконання робіт з урахуванням складу технологічних бригад комплексу механізмів. Тобто [4]:

$$RW''' \leftarrow \left( \bigvee_{i=3}^3 rw_i'''(T_i''') \right). \quad (5.12)$$

З метою визначення необхідної кількості сил і засобів для прибирання рухомого складу і визначення необхідного часу для зосередження цих сил на місці аварійної ситуації комп'ютерна система управління здійснює відповідні розрахунки ( $Det\{con_1(k'_i, x'_i, t'_{30ci})\}$ ), де  $con_1$  – необхідна кількість ( $k'_i$ ) підрозділів різного призначення ( $x'_i$ ) та часу їх зосередження на місці аварійної ситуації ( $t'_{30ci}$ ).

Результатами проведених розрахунків можуть бути такі дані [4]:

$$\begin{aligned} 1) (t'_{30c_{25}} + T'_{25} < [(t'_{30c_i} + \min rw'_i(T_i''') + (t'_{30c_{24}} + T'_{24}))]; \\ 2) (t'_{30c_{25}} + T'_{25} \approx [(t'_{30c_i} + \min rw'_i(T_i''') + (t'_{30c_{24}} + T'_{24}))]; \\ 3) (t'_{30c_{25}} + T'_{25} > [(t'_{30c_i} + \min rw'_i(T_i''') + (t'_{30c_{24}} + T'_{24}))]. \end{aligned} \quad (5.13)$$

У першому випадку система формує рекомендацію для проведення другого етапу відновних робіт у вигляді правила:

$$Re_{21} : [((sers'_1 \wedge sers''_5) \wedge \bar{cus}'_3 \wedge \bar{cus}'_5 \wedge s dg'_6) \rightarrow rw'_{25}(T'_{25} + t'_{30c})], \quad (5.14)$$

У третьому випадку система формує продукційне правило для  $Re_2$  у вигляді:

$$\begin{aligned} Re_{22} : [((sers'_1 \wedge sers''_5) \wedge \bar{cus}'_3 \wedge cus'_5 \wedge s dg'_6) \rightarrow \\ \rightarrow ((\min rw'_i(T_i''') + (t'_{30c_i}) \wedge rw'_{24} + T'_{24}))], \end{aligned} \quad (5.15)$$

де процесу прибирання аварійного рухомого складу із застосуванням залізничного вантажопідйомного крана передуює процес відбудови залізничної колії.

У другому випадку комп'ютерна система управління враховує, наприклад, вартість проведення відновних робіт за умови, що ця вартість зростає при збільшенні тривалості проведення таких робіт.

Досвід ліквідації ушкоджень контактної мережі свідчить про те, що відновні роботи можуть проводитися аварійними бригадами автомотрис (автодрезин), які розташовуються на залізничній колії або аналогічними бригадами автопідйомників, які розташовуються на узбіччі залізничної колії. Такі роботи здійснюються, як правило, у два етапи: на першому – використовуються методи короткочасної чи тимчасової відбудови, а на другому – методи повної відбудови. Кожен з етапів здійснюється за певними технологіями [163 – 166].

Застосування автомотрис (автодрезин) для проведення робіт можливе за умови, що аварійний рухомий склад з колії прибраний і колія справна (відновні роботи на ній завершені), застосування автопідйомників можливе при вільному узбіччі залізничної колії.

Продукційне правило проведення відновних робіт контактної мережі має вигляд [4]:

$$\begin{aligned}
 RW'' \leftarrow & \{ [ ( ( rw''_{11}(T''_{11}) \wedge cus'_3(T_2) ) \wedge ( (T''_{11} > T_2) \wedge (T''_{11} < T_{дон}) ) ) ) \vee \\
 & \vee ( ( rw''_{12}(T''_{12}) \wedge \overline{cus'_3(T_2)} \wedge cus'_5(T_2) \wedge (T''_{12} > T_2) ) ) ] \vee \\
 & \vee ( ( rw''_{21}(T''_{21}) \wedge cus'_3(T_2) ) \wedge ( (T''_{21} > T_2) \wedge (T''_{21} < T_{дон}) ) ) ) \vee \\
 & \vee ( ( rw''_{22}(T''_{22}) \wedge \overline{cus'_3(T_2)} \wedge cus'_5(T_2) \wedge (T''_{22} << T_2) ) ) \} .
 \end{aligned} \tag{5.16}$$

де  $rw''_{11}(T''_{11})$  – здійснення короткочасної відбудови контактної мережі бригадами автомотрис (автодрезин);  $rw''_{21}(T''_{21})$  – здійснення повної відбудови контактної мережі бригадами автомотрис (автодрезин);  $rw''_{12}(T''_{12})$  – здійснення короткочасної відбудови контактної мережі бригадами автопідйомників;  $rw''_{22}(T''_{22})$  – здійснення повної відбудови контактної мережі бригадами автопідйомників;  $T_{дон}$  – час, який відведений для здійснення усього комплексу робіт, тобто, для відновлення руху поїздів.

Визначенню допустимого часу проведення усього комплексу робіт та імовірності його успішного завершення присвячено багато робіт, зокрема роботи [5, 7].

Терміни часу  $T''_{11}$ ,  $T''_{12}$ ,  $T''_{21}$ ,  $T''_{22}$  враховують час, необхідний для зосередження відновних аварійних бригад.

За умови, що роботи другого етапу завершені, залізнична колія відновлена, рекомендації для третього етапу визначаються за допомогою продукційного правила:

$$Re_{31} : [(Re_2(T_2) \wedge cus'_3(T_2)) \wedge ((T''_{11} > T_2) \wedge (T''_{11} < T''_{don}))] \rightarrow rw''_{11}(T''_{11}). \quad (5.17)$$

За умови, що роботи другого етапу не завершені, але узбіччя вільне, продукційне правило для третього етапу має вигляд:

$$Re_{32} : [(\overline{Re}_2(T_2) \wedge cus'_5(T_2) \wedge (T''_{12} < T_2)) \rightarrow rw''_{12}(T''_{12})] \quad (5.18)$$

Тобто, роботи можна здійснювати паралельно з відповідними роботами другого етапу.

Якщо роботи другого етапу завершені успішно та є можливість проведення робіт з повного відновлення контактної мережі, тоді комп'ютерна система управління формує рекомендацію, яка визначається продукційним правилом:

$$Re_{33} : [(Re_2(T_2) \wedge cus'_3(T_2) \wedge ((T''_{21} > T_2) \wedge (T''_{21} << T''_{don})) \wedge rw''_{21}(T''_{21})]. \quad (5.19)$$

За умови, що роботи другого етапу не завершені та є можливість повного відновлення контактної мережі паралельно з роботами другого етапу, то система управління формує продукційне правило вигляду:

$$Re_{34} : [(\overline{Re}_2(T_2) \wedge cus'_5(T_2) \wedge ((T''_{22} << T_2)) \rightarrow rw''_{22}(T''_{22})]. \quad (5.20)$$

Із закінченням відбудовних робіт залізничної колії та контактної мережі, при відновленому на першому етапі телефонному зв'язку за резервною схемою, з'являється можливість відновлення руху поїздів при телефонних засобах зв'язку згідно з правилами, які встановлені відповідною інструкцією [161].

Приймаючи для виконання рекомендацій  $Re_1$ ,  $Re_{22}$ ,  $Re_{32}$  комп'ютерна система здійснює їх синхронізацію за схемою, яка подана на рис. 5.2 [274].

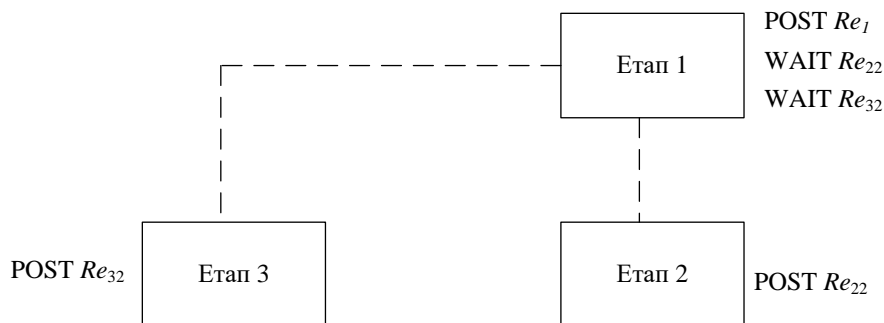


Рис. 5.2. Схема синхронізації виконання рекомендацій

Особливістю мережецентричного управління є планування та виконання операцій у єдиному просторі станів системи, що дозволяє синтезувати команди управління для усіх виконавців скоординовано у часі та просторі, оптимально розподіляючи між ними цілі та завдання.

З урахуванням порядку залучення ліквідаційних підрозділів, їх оснащення, рельєфу місцевості, ступеня професійної підготовки працівників, характеристик ушкоджень елементів інфраструктури залізниці та рухомого складу розробляється сітьовий план-графік дій ліквідаційних підрозділів як по цілях (об'єктах) проведення відновних робіт, так й щодо здійснення технологічного комплексу робіт на кожному з аварійних об'єктів і рухомому складі. Тобто, планування здійснюється по горизонталі та вертикалі з узгодженням і синхронізацією робіт [6].

За допомогою такого плану-графіка визначається імовірність успішності дій таких підрозділів за вибраним варіантом ліквідації наслідків аварійної ситуації, тобто, за прийнятим рішенням керівника ліквідації аварії (горизонтальне планування по цілях).

При великому значенні імовірності (наприклад, 0,8) успішності дій ліквідаційних підрозділів, здійснюється їх зосередження на місці аварійної ситуації, визначаються заходи безпеки та розроблюються (доповнюється необхідними технологічними операціями по кожному з аварійних елементів інфраструктури і рухомого складу) сітьовий графік виконання ліквідаційних операцій (планування по вертикалі). При недостатньому значенні імовірності (наприклад, 0,2) успішності дій ліквідаційних підрозділів, прийняте рішення відхиляється й приймається інше – новий варіант проведення ліквідаційних заходів.

Під час проведення ліквідаційних заходів оперативним штабом з ліквідації наслідків аварійної ситуації здійснюється контроль за їх проведенням. Виявивши відхилення від прийнятого сітьового графіка, аналізуються їхні причини та здійснюються необхідні корективи.

Ліквідація наслідків аварійної ситуації на різнохарактерних аварійних об'єктах залізниці – це складний процес функціонування багатьох підрозділів

залізниці та залучених до цього сил і засобів інших організацій, який потребує узгоджених дій за місцем і часом.

Ліквідаційні підрозділи з відповідними пунктами управління є складною динамічною системою. Для ефективного оперативного планування і управління функціонуванням такими складними системами нині широко застосовується метод сітьового планування і управління (СПУ), який дозволяє реалізувати системний підхід, застосовувати математичні моделі та сучасні комп'ютерні технології, що дає можливість здійснення логіко-математичного опису процесів, які моделюються, та алгоритмізації розрахунків необхідних параметрів за допомогою сітьового графіка (діаграма сітьової моделі).

Застосування сітьового моделювання під час планування та управління складними системами дозволяє розв'язувати такі проблеми [248, 328 – 332]:

- чітко відобразити склад і структуру керованого процесу, з необхідним ступенем деталізації операцій, з яких складається такий процес, виявити взаємозв'язки між цими процесами та операціями, що необхідні для досягнення частинних та кінцевих цілей, чітко розподілити обов'язки між виконавцями операцій, які необхідні для реалізації усього процесу;

- використовувати досвід і знання найдосвідченіших фахівців щодо складання планів і керування різноманітними ліквідаційними підрозділами;

- виявити резерви сил, засобів і часу, які марнуються при нераціональній організації керованого процесу, здійснити контроль за ходом процесу відразу за декількома напрямками, й, навпаки, виключити з контролю операції, що не впливають на часові характеристики процесу, знаходити «вузькі місця» та своєчасно їх долати;

- з урахуванням фактичного ходу процесу, обґрунтовано корегувати раніше прийняті управлінські рішення, отримувати прогнози подальшого розвитку процесу, передбачати можливі відхилення процесу від плану та наслідки, які можуть впливати на процес в цілому;

- отримувати кількісні оцінки параметрів керованого процесу і ступені невизначеності прогнозів його протікання;

– спростити внесення змін, уточнень та доповнень у плани, тим самим збільшити гнучкість і необхідну періодичність планування, спростити схему звітності, забезпечити швидке введення у роботу нових виконавців.

Аналіз сітьової моделі здійснюється за допомогою розрахунків значень її параметрів, тобто величин, які характеризують часові співвідношення між подіями і операціями, вид, обсяг і кількість ресурсів, що витрачаються у процесі виконання операцій.

Зважаючи на те, що тривалість операцій з локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків є випадковою величиною, то оцінка значення цієї величини буде у найбільшому ступені впливати на відповідність реального графіка запланованому, й, як наслідок, на успішність дій ліквідаційних підрозділів. Для оцінювання часу виконання операцій, як правило, визначаються оцінки щодо тривалості виконуваних операцій  $(i,j)$ :

– оптимістична оцінка  $t_{\text{оп}}(i,j)$ , тобто тривалість операцій  $(i,j)$  за найсприятливіших умов  $t_{\text{оп}}(i,j) = a(i,j)$ ;

– песимістична оцінка  $t_{\text{п}}(i,j)$ , тобто тривалість операцій  $(i,j)$  за найнесприятливіших умов  $t_{\text{п}}(i,j) = b(i,j)$ ;

– найбільша імовірна оцінка  $t_{\text{нр}}(i,j)$ , тобто тривалість роботи  $(i,j)$  за нормальних умов  $t_{\text{нр}}(i,j) = m(i,j)$ .

Іншими словами, тривалість роботи  $(i,j)$  є випадковою величиною, що характеризується певним законом розподілу та відповідними числовими характеристиками – математичним очікуванням  $\overline{t(i,j)}$  і дисперсією  $\sigma^2(i,j)$ .

Закон розподілу має такі властивості: безперервність; унімодальність, тобто має один максимум у кривій розподілу; додатна асиметрія, тобто максимум кривої зміщений вліво відносно медіани. Такі властивості має бета-розподіл.

У загальному випадку формула бета-розподілу випадкової величини  $t$ , заданої на інтервалі  $(0,1)$  має вигляд [6, 282 – 290]:

$$f_1(t, p, q) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0; \\ \frac{1}{B(p, q)} t^{p-1} (1-t)^{q-1} & \text{при } 0 < t \leq 1; \\ 0 & \text{при } t > 1, \end{cases} \quad (5.21)$$

де  $B(p, q)$  – бета-функція, що визначається виразом

$$B(p, q) = \int_0^1 (1-t)^{q-1} t^{p-1} dt = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)}, \quad (5.22)$$

де  $\Gamma(x)$  – гамма-функція, яка визначається з формули

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-y} y^{x-1} dy. \quad (5.23)$$

Відомо, що для цілих  $x$  формула  $\Gamma(x)$  визначається виразом  $\Gamma(x) = (x-1)!$

З огляду на те, що на практиці значення розглянутих вище оцінок для реальних операцій невідомі, для оцінювання цих величин застосовуються експертні або статистичні методи. Важливим завданням при цьому є коректне оцінювання тривалості виконання операцій.

Розробниками методу PERT [282 – 285] отримані такі вирази для оцінювання математичного очікування та дисперсії

$$\begin{aligned} M[t(i, j)] &= \frac{1}{6} [f(i, j) + 4m(i, j) + b(i, j)]; \\ \sigma^2[t(i, j)] &= \frac{1}{6} [b(i, j) - a(i, j)]. \end{aligned} \quad (5.24)$$

У роботі В.С. Попова отримані такі характеристики бета-розподілу [317]:

$$\begin{aligned} M[t(i, j)] &= \frac{1}{7} [a(i, j) + 5m(i, j) + b(i, j)]; \\ \sigma^2[t(i, j)] &= \frac{1}{36} [b(i, j) - a(i, j)]^2. \end{aligned} \quad (5.25)$$

Вирази (5.24) і (5.25) належать до так званого трьохочіночного методу, бо у виразах застосовуються три оцінки  $a(i, j)$ ,  $b(i, j)$  та  $m(i, j)$ .

Хороші результати дає використання двоочіночного методу при застосуванні бета-розподілу. Числові характеристики за такого методу мають вигляд [6, 290]:

$$\begin{aligned} M[t(i, j)] &= 0,2[3a(i, j) + 2b(i, j)]; \\ \sigma^2[t(i, j)] &= 0,04[b(i, j) - a(i, j)]^2. \\ m[t(i, j)] &= \frac{1}{3}[2a(i, j) - b(i, j)]. \end{aligned} \quad (5.26)$$



Застосування двооціночного методу має перевагу в тому, що часто експертам важко отримати оцінку моди, яка не застосовується при цьому методі.

Тривалість шляху  $L$  для  $\beta$ -розподілу згідно з центральною граничною теоремою Ляпунова розподілена за нормальним законом, звідки випливає, що середня тривалість операцій цього шляху визначається як сума середніх значень операцій, що на ньому знаходяться, тобто:

$$\begin{aligned} M[L] &= \sum_{(i,j) \in L} M[t(i,j)], \\ \sigma^2[L] &= \sum_{(i,j) \in L} \sigma^2[t(i,j)]. \end{aligned} \quad (5.27)$$

Оцінка імовірності того, що термін виконання усього комплексу операцій щодо локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків ( $t_{кр}$ ) не перевищить встановленого директивного строку  $T$  визначається співвідношенням:

$$P(t_{кр} < T) = 0,5 + 0,5\Phi\left(\frac{T - t_{кр}}{\sigma_{кр}}\right). \quad (5.28)$$

Якщо, наприклад,  $P(t_{кр} < T) = 0,3$ , то імовірність невиконання директивного терміну виконання ліквідаційного комплексу велика, що спонукає до прийняття додаткових заходів чи зміни варіанта проведення операцій. Коли  $P(t_{кр} < T) > 0,8$ , то з достатнім ступенем надійності можна прогнозувати вчасне виконання комплексу ліквідаційних операцій.

У деяких випадках необхідно визначити максимальний строк виконання ліквідаційних робіт  $T$ , який можливий із заданого імовірністю  $\beta$ . У цьому випадку:

$$T = M[t_{кр}] + z\beta\sigma_{кр}^2, \quad (5.29)$$

де  $z\beta$  – нормоване відхилення випадкової величини, яке визначається за допомогою функції Лапласа  $\Phi(z\beta) = \beta$ ;  $z = \frac{T - t_{кр}}{\sigma}$ .

Розглянемо приклад. Структура сітьової моделі та оцінки тривалості робіт подані у таблиці 5.1. Потрібно отримати усі характеристики сітьової моделі, оцінити імовірність виконання усього комплексу ліквідаційних робіт за 52 год., за 45 год. та оцінити максимально можливий термін виконання усього комплексу операцій з імовірністю  $P = 0,95$  [6].

У трьох перших графах таблиці 5.1 знаходяться вихідні дані, а у двох останніх графах – результати розрахунків за формулами (5.26).

Таблиця 5.1

## Вихідні дані для прикладу розрахунків моделі

Операція (i, j)	Тривалість		Очікувана тривалість $M [t (i, j)]$	Дисперсія $\sigma^2 [t (i, j)]$
	$a (i, j)$	$b (i, j)$		
1	2	3	4	5
(1,2)	7,5	11,25	7,5	0,56
(2,3)	6	9,75	7,5	0,56
(2,4)	4,5	9	4,5	2,25
(2,5)	1,5	8,25	6	0,56
(3,7)	0,75	5,25	1,5	0,81
(4,5)	7,5	11,25	9	0,56
(4,6)	4,5	8,25	6	0,56
(4,9)	7,5	15	10,5	2,25
(5,8)	3	6,75	4,5	0,56
(5,10)	10,5	18	13,5	2,25
(6,9)	0	0	0	0,00
(6,11)	4,5	12	7,5	2,25
(7,10)	6	13,5	9	2,25
(8,10)	3	10,5	6	2,25
(9,10)	1,5	9	4,5	2,25
(10,11)	12	15,75	13,5	0,56

За результатами таблиці отримуємо сітьову модель (рис.5.3)

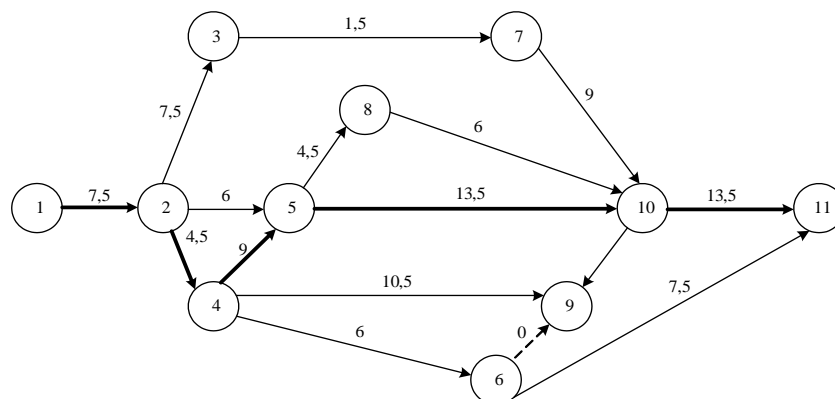


Рис. 5.3. Сітьова модель організації ліквідаційних робіт

Критичний шлях  $L_{кр} = (1,2,4,5,10,11)$ , а його тривалість  $t_{кр} = 48$  год.

Дисперсія критичного шляху складає

$$\sigma_{кр}^2 = \sigma^2(1,2) + \sigma^2(4,5) + \sigma^2(5,10) + \sigma^2(10,11) = 6,18.$$

$$\text{Звідки } \sqrt{\sigma_{кр}} = 2,48.$$

Тоді:

$$P(t_{кр} < 50) = 0,5 + 0,5\Phi\{(52-48)/2,48\} = 0,5 + 0,5\Phi\{1,6\} = 0,5 + 0,5 \cdot 0,89 = 0,945;$$

$$P(t_{кр} < 45) = 0,5 + 0,5\Phi\{(45-48)/2,48\} = 0,5 + 0,5\Phi\{-1,2\} = 0,5 - 0,5 \cdot 0,77 = 0,12.$$

Таким чином, імовірність виконання комплексу робіт за термін часу не більше 52 год. складає  $P = 0,945$ , а за 45 год.  $P = 0,12$ . Практично це означає, що необґрунтоване прагнення до скорочення часу виконання робіт призведе до протилежного результату – зриву їх вчасного виконання!

Для розв'язування оберненої задачі щодо оцінювання максимального строку виконання робіт з імовірністю  $P = 0,95$  знаходимо у таблиці стандартного нормального розподілу найближче значення до  $P = 0,95$ , таке значення буде  $P = 0,9545$ , що відповідає  $z = 1,9$ .

$$\text{Тоді з формули (5.29) маємо: } T = 48 + 1,9 \cdot 2,48 = 52,7 \text{ год.}$$

Таким чином, максимальний термін виконання усього комплексу ліквідаційних операцій при заданому рівні імовірності  $P = 0,95$  складає 52 год. 42 хв.

Окремої уваги заслуговує оптимізація вартості виконання операцій методом «час – вартість», однак це питання потребує додаткового обґрунтування та створення у кожному випадку відповідних математичних моделей [6].

Оптимізація сітьового графіка є процесом поліпшення організації виконання комплексу операцій з урахуванням встановленого терміну його виконання. Використання цього методу передбачає, що зменшення тривалості операцій пропорційне зростанню її вартості. З наведеного вище випливає, що кожна операція  $(i,j)$  характеризується тривалістю  $t(i,j)$ , яка може знаходитися у межах  $a(i,j) \leq t(i,j) \leq b(i,j)$ . Величина  $h(i,j)$ , що дорівнює тангенсу кута  $\alpha$  нахилу апроксимуючої прямої, визначає витрати на прискорення роботи  $(i,j)$  у порівнянні з нормальною тривалістю на одиницю часу, тобто:

$$h(i, j) = \operatorname{tg} \alpha = \frac{c_{\max}(i, j) - c_{\min}(i, j)}{b - a} \quad (5.30)$$

Вартість  $c(i, j)$  операції  $(i, j)$  міститься у межах

$$c_{\min}(i, j) \leq c(i, j) \leq c_{\max}(i, j),$$

де  $c_{\min}(i, j)$  - вартість операції  $(i, j)$  при нормальній її тривалості;

$c_{\max}(i, j)$  – вартість операції при максимальній її тривалості.

Вартість операції  $c(i, j)$  визначається виразом:

$$c(i, j) = c_{\min}(i, j) = \frac{c_{\max}(i, j) - c_{\min}(i, j)}{b - a} = c_{\min}(i, j) + (b - t(i, j))h. \quad (5.31)$$

Допустимий розмір збільшення тривалості даної операції:

$$\Delta t(i, j) = \min\{b - t(i, j), R_c(i, j)\},$$

де  $R_c(i, j)$  – вільний резерв часу  $R_c$  операції  $(i, j)$ , що є частиною повного резерву часу, на яку можна збільшити її тривалість, не змінюючи при цьому ранішнього терміну її кінцевої події. Такий резерв часу можна використовувати при виконанні даної операції, якщо її початкова та кінцева події здійснюються у свої найранішні терміни  $t_p(i)$  та  $t_p(j)$ . Тобто:

$$R_c(i, j) = t_p(j) - t_p(i) - t(i, j). \quad (5.32)$$

Оптимальна тривалість операції  $t_{\text{опт}}(i, j) = t(i, j) + \Delta t(i, j)$ .

Зміна вартості операції  $\Delta c(i, j)$  при скороченні її тривалості виражається формулою:

$$\Delta c(i, j) = \Delta t_{\text{опт}}(i, j) h(i, j). \quad (5.33)$$

У цій формулі  $h(i, j)$  можна вважати коефіцієнтом втрат на прискорення операції. Відтак вартість операції після оптимізації визначається з формули:

$$c_{\text{опт}}(i, j) = c(i, j) - \Delta c(i, j). \quad (5.34)$$

Вартість комплексу операцій після оптимізації буде:

$$\Delta c = \sum_{(i, j)} c(i, j) - \sum_{(i, j)} c_{\text{опт}}(i, j) \quad (5.35)$$

У результаті такої оптимізації сітьового графіка, при незмінній тривалості виконання усього комплексу операцій, за рахунок збільшення тривалості операцій, які мають вільний резерв часу, зменшується вартість виконання усього комплексу операцій.

### 5.3. Науково-прикладні аспекти застосування принципу мережецентричного управління реагуванням на залізничні аварійної ситуації

Підготовка, прийняття та реалізація управлінських рішень щодо здійснення організаційно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення скоординованих дій для ліквідування наслідків залізничних аварійних ситуацій у можливо короткий термін є головним завданням оперативних штабів.

Оперативні штаби ПАТ «Укрзалізниця», об'єднань, державних підприємств, дирекцій залізничних перевезень, установ організацій та структурних підрозділів створюються для безпосереднього керівництва, у межах своєї компетенції, діяльністю сил і засобів функціональної підсистеми щодо ліквідації наслідків аварійних ситуацій [2].

У роботах [62, 156, 159] було доведено, що залізничні аварійні ситуації, характеризуються різкою короткочасною зміною параметрів внутрішніх і зовнішніх процесів розвитку таких ситуацій та станів елементів транспортної системи, що призводять чи можуть призвести до негативного впливу на рухомий склад, вантаж, об'єкти інфраструктури залізниці, загибелі (травмування) людей, тварин і рослин, значних матеріальних втрат та шкоди довкіллю.

Особливо небезпечним є ситуації, які пов'язані з пожежами (вибухами) цистерн з легкозаймистими горючими рідинами та зрідженими (розчиненими під тиском) вуглеводними газами, а також із розливанням (викиданням) горючих рідин і сильнодіючих речовин.

Дії різнорідних за призначенням підрозділів функціональної підсистеми залізничного транспорту щодо ліквідування наслідків аварійних ситуацій визначаються значною складністю, яка обумовлена впливом різнохарактерних небезпечних чинників таких ситуацій на людей, техніку і довкілля, а також складністю організації управління цими підрозділами в складних умовах їхньої роботи.

Для оцінювання обстановки, яка склалася в результаті виникнення і розвитку аварійної ситуації, потрібно мати велику кількість інформації про характер її розвитку у часі та просторі, стан спеціальних підрозділів та результати їхніх дій, забезпеченість матеріально-технічними засобами, засобами

індивідуального захисту тощо, причому ця кількість інформації безперервно зростає разом з розвитком ситуації.

Для зменшення наслідків аварійної ситуації в умовах стрімкого зростання інформаційних потоків і дефіциту часу повстає необхідність у створенні чітко побудованої системи оперативного інформаційно-аналітичного забезпечення аналізу обстановки, вироблення та прийняття рішень щодо управління реагуванням на обставини, що виникли, з широким застосуванням сучасної обчислювальної техніки, інформаційних технологій та систем підтримки прийняття рішень.

Нині в практику управління складними динамічними багатоланковими системами ввійшли управлінські системи типу ситуаційних центрів (СЦ). Назва «ситуаційний центр» залежно від галузі застосування трансформується у назви «Ситуаційний центр або кімната» (situation room), «Центр командування і управління» (command and control center), «кризовий центр» (crisis center), «надзвичайний центр» (emergency center), «зала порад» (corporate boardroom, conference room). При цьому під центром мають на увазі не лише спеціально обладнане приміщення, але й відповідні інформаційні, телекомунікаційні, програмні та методичні засоби, що забезпечують процес доставки, агрегації інформації з метою вироблення відповідного рішення [301 – 305].

Розглянемо більш детально центри управління складними системами.

Перший ситуаційний центр для перших осіб держави був створений під керівництвом Стаффорда Біра наприкінці 70-х рр. Зараз у світі існують біля трьохсот ситуаційних центрів, які використовуються урядами різних країн, керівниками великих корпорацій та управління військами.

З технічної точки зору СЦ є складовими частинами інформаційно-телекомунікаційної системи (ІТКС) організації, в якій вони використовуються. При побудові СЦ застосовуються найсучасніші інформаційно-телекомунікаційні технології (Інтернет/Інтренетпортали, аналітичні програми і бази даних, мультимедійні і, зокрема відеоджерела інформації, геоінформаційні технології, відеоконференції тощо).

На даний час не існує чіткого визначення поняття «ситуаційний центр». З одного боку, це приміщення, яке оснащено потужною сучасною презентаційною технікою, з іншого, «програмного» боку, СЦ – програмне і технічне середовище,

яке дозволяє за допомогою множини різних програм та інформаційних технологій проводити моніторинг, прогнозування, вироблення та прийняття рішення на управління, тобто вживати заходів щодо підтримки прийняття рішення. Таким чином, СЦ можна називати аналітичними центрами або центрами підтримки прийняття рішень.

Усі наведені вище визначення мають ще одну особливість – вони не розглядають питання про те, хто або що формує ситуації й хто здійснює їх аналізування. У цьому аспекті СЦ можна розподіляти на зовнішні та внутрішні. Зовнішні СЦ є технічним або інформаційним середовищем, що необхідне оперативному персоналу для оцінювання обстановки. Внутрішні СЦ оперують поняттям ситуації на рівні відображення, моделювання, аналізування чи управління. Іншими словами, внутрішні СЦ автоматизують обробку самої інформації, а зовнішні – вихідних даних, необхідних для її виявлення і аналізування. Тобто внутрішні СЦ є сукупністю програмно-технічних засобів, науково-методичних методів та інженерних рішень для автоматизації процесів відображення, моделювання, аналізування ситуацій та управління [5, 291].

Структура СЦ містить у своєму складі різні види забезпечення (програмне, технічне, лінгвістичне тощо), які можна розглядати на таких рівнях, як науково-математичний, інженерний, програмний, технічний. Науково-математичний рівень є сукупністю наукових теорій, методів, алгоритмів, досліджень, розробок тощо, які необхідні для реалізації інших рівнів. Він дозволяє обґрунтувати доцільність створення СЦ, визначити ефективність його функціонування, інтегрувати різномірні компоненти, усунути помилки.

Інженерний рівень охоплює конкретні апаратно-програмні засоби, а також необхідні технологічні та конструкторські розрахунки, моделі технічних пристроїв, специфікації програм, алгоритми роботи і т.д. Програмний і технічний рівні містять відповідне забезпечення, яке необхідне для реалізації завдань і функцій, які поставлені на верхніх рівнях.

Усі ці рівні містять такі компоненти: вимірювальний (сенсорне середовище); інформаційний (ситуаційна чи імітаційна модель середовища); середовище інформаційної підтримки; середовище апаратної підтримки; середовище візуалізації; оперативний склад.

До сенсорного середовища СЦ належать апаратно-програмні засоби для отримання інформації про стан середовища, що контролюється (антенні системи, канали зв'язку, датчики тощо).

Інформаційна (ситуаційна або імітаційна) модель середовища є сукупністю понять програмного середовища, які моделюються, просторові відношення між об'єктами моделі та відображення об'єктів моделі за допомогою графічного інтерфейсу. Середовище інформаційної підтримки – це сукупність програм та інформаційних потоків, які забезпечують функціонування інформаційної моделі та середовища візуалізації СЦ. У першу чергу до неї належать системи ситуаційного моделювання, експертні системи і системи імітаційного моделювання. Характерною особливістю будь-якого СЦ є прив'язка ситуаційної моделі до місцевості, тому до його складу можуть входити геоінформаційні системи.

Ситуаційні центри можна класифікувати за низкою ознак [5, 301 – 305]:

- за складом систем ситуаційного моделювання: СЦ нагляду (відображення); аналітичні; повнофункціональні, які поєднують функції відображення та аналізування ситуації;

- за масштабом: стратегічні; оперативні; персональні.

Стратегічний ситуаційний центр розв'язує складні, масштабні завдання, спрямовані на структурну і функціональну перебудову. СЦ такого типу налаштовані на такі об'єкти, як галузь, регіон, акціонерне товариство, складний, просторово-розподілений процес.

Оперативний СЦ розв'язує завдання автоматичного передавання оперативної інформації у ситуаційну модель, яка надає керівнику можливість оперувати об'єктами у режимі реального часу. Об'єктами таких СЦ є підприємство, процес, проект, забезпечення працездатності обладнання тощо. Персональний ситуаційний центр розв'язує завдання експрес-оцінювання ситуації, оперативного доступу до об'єкта керування і дозволяє його керівнику відстежувати стан та процеси об'єкта;

- за розміщенням: стаціонарні; мобільні. Стаціонарні розміщуються у конкретних приміщеннях, де здійснюється аналізування ситуацій. Мобільні СЦ розгортаються на місці подій, у конкретному регіоні. У майбутньому, при



покращенні якості каналів зв'язку, мобільність СЦ може бути досягнута на програмному рівні, при цьому можливе підвищення мобільності не лише технічних засобів, але й оперативного персоналу;

– за ступенем детермінованості завдань, що вирішуються: слабо детерміновані; детерміновані; дуже детерміновані. Детермінованість визначається ступенем хаотичності ситуації, закінченістю постановки завдання, інформаційною відкритістю проблеми, стереотипністю навчальних прикладів та іншими факторами. До завдань цього класу належать стратегічний та мотиваційний контролінг. До детермінованого класу завдань належать завдання всебічного управлінського обліку у системах корпоративного або державного операційного контролінгу. До дуже детермінованих завдань належать завдання регулювання розподілом електроенергії, управління рухом залізничного транспорту;

– за цільовою спрямованістю: ситуаційні центри контролю; управління; кризисні; багатоцільові. Основним завданням СЦ контролю є спостереження за станом складного об'єкта або системи. Головною метою СЦ управління є постійне та активне керування об'єктом (групою об'єктів). Активна робота кризисних СЦ здійснюється тільки під час виникнення екстрених (кризисних, аварійних) ситуацій. Багатоцільові поєднують можливість різних СЦ;

– за способом відображення інформації: колективні; індивідуальні; колективно-індивідуальні. У колективних СЦ встановлюється екран колективного користування, у індивідуальних СЦ використовуються тільки індивідуальні екрани, а у колективно-індивідуальних СЦ – екрани різних типів;

– за універсальністю: спеціальні; налагоджувальні. Спеціальні СЦ створюються для використання тільки для розв'язування завдань однієї предметної області. Налагоджувальні СЦ призначені для широкого використання.

Крім таких класифікаційних ознак, можна класифікувати СЦ ще й за ступенем автоматизації, способами оцінювання ситуації, кількістю приміщень, і персоналу, необхідним часом прийняття рішення, предметною областю, технологіями тощо.

Класифікація ситуаційних центрів за розглянутими вище ознаками приведена на рис. 5.4.

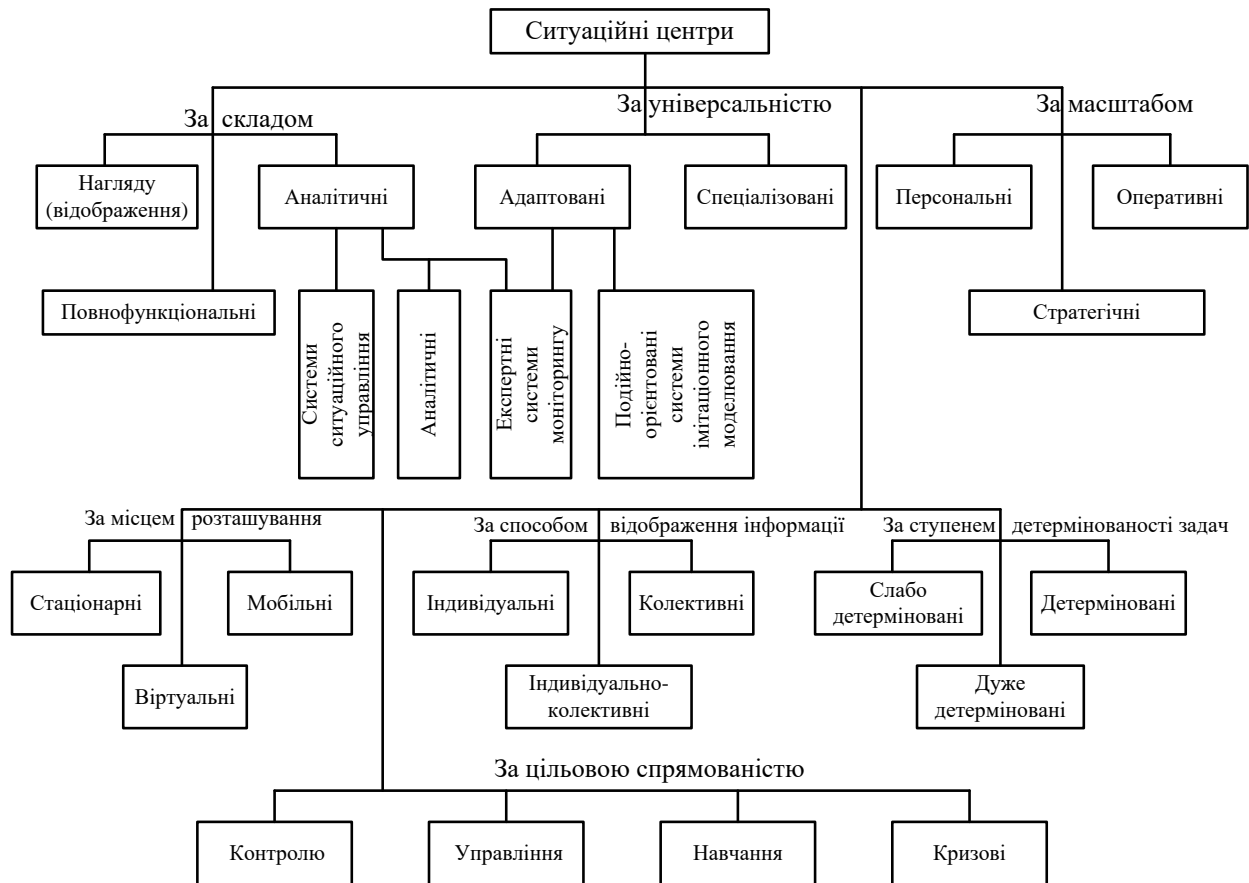


Рис. 5.4. Класифікація ситуаційних центрів

Нині пункти керування залізничним транспортом, по суті, є відповідними ситуаційними центрами керівництва реагуванням на аварійні ситуації і є ієрархічною системою, що відображає структуру управління залізничним транспортом. Найвищим пунктом (першим рівнем) управління є центр управління ПАТ «Укрзалізниця» (потенційно – це майбутній головний ситуаційний центр), другий рівень управління процесами реагування на аварійні ситуації складають існуючі пункти диспетчерського управління регіональних філій залізниць, до третього рівня управління належать пункти управління дирекцій залізничних перевезень залізниць, які безпосередньо керують підрозділами залізничного транспорту, що входять до складу функціональної підсистеми реагування на аварійні ситуації (виконавці). На всіх пунктах управління у разі виникнення аварійних ситуацій створюються оперативні штаби. Оперативний штаб рівня дирекції залізниці, розташовується на місці транспортної події у відновному поїзді (мобільний пункт управління).

Структурна схема стаціонарних ситуаційних центрів пунктів управління ПАТ «Укрзалізниця» надана на рис. 5.5.

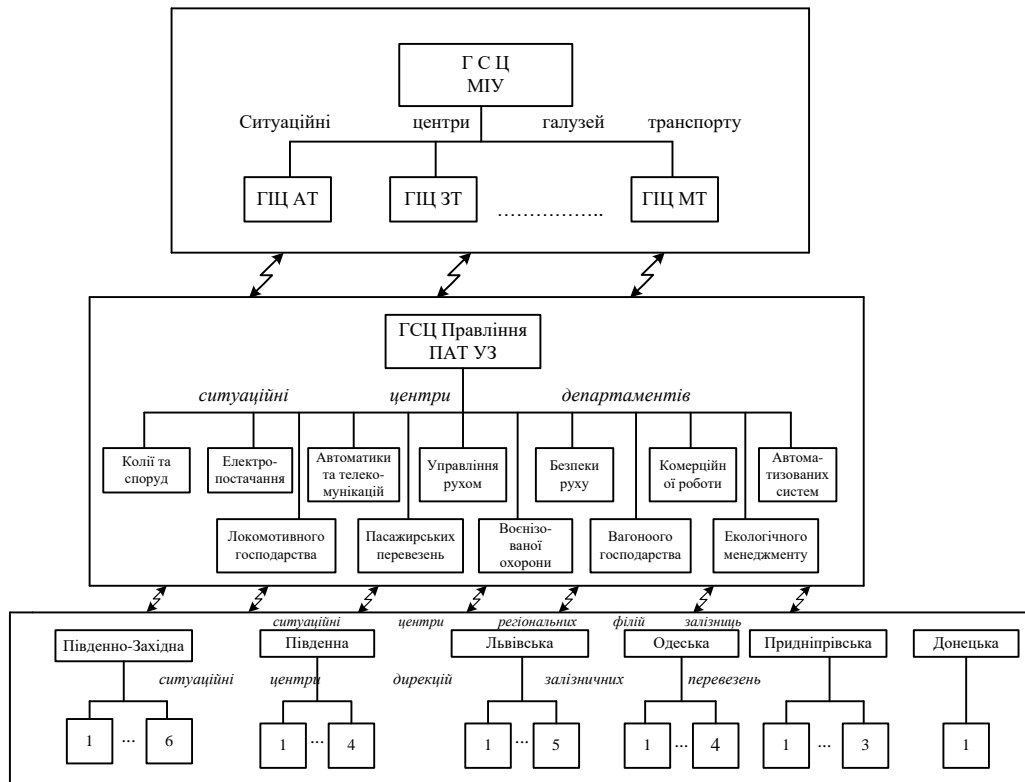


Рис. 5.5. Структурна схема стаціонарних ситуаційних центрів пунктів управління ПАТ «Укрзалізниця»

Схема розташування мобільних ситуаційних центрів на місці транспортної події надана на рис. 5.6.

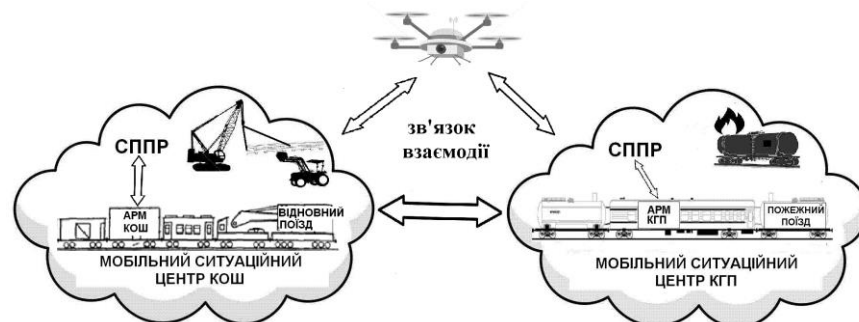


Рис. 5.6. Схема розташування мобільних ситуаційних центрів на місці транспортної події

З метою визначення умов здійснення ефективного управління підрозділами функціональної підсистеми у триланковій ієрархічній структурі залізничного транспорту з раціональним розподілом обсягів інформації між ланками управління, часу ефективної дії командної інформації (наказів, розпоряджень) та потрібної

продуктивності ланок управління щодо оброблення інформації потрібно встановити ситуативні критерії передачі управління реагування на аварійну ситуацію з рівня на рівень ієрархічної структури.

За умови, що для проведення робіт з реагування на аварійну ситуацію, керівництво нижнього рівня (дирекції залізничних перевезень) має достатню кількість спеціальних підрозділів ( $U_{RC}$ ), залучення підрозділів сторонніх організацій не потрібне ( $\bar{U}_{OA}$ ) та є необхідність у змінах в організації перевізного процесу тільки у межах дирекції залізничних перевезень, не виходячи за її межі ( $CT_R$ ), управління проведенням необхідних заходів покладається на керівництво дирекції залізничних перевезень залізниці з відповідного пункту управління.

Продукційне правило такої ситуації управління має ( $MS_1$ ) вираз [5]:

$$MS_1: \left[ \left( U_{RC} \wedge \bar{U}_{OA} \wedge CT_R \right) \rightarrow CL_{III} \right]. \quad (5.36)$$

Якщо для проведення ліквідаційних робіт потрібне залучення тільки спеціальних підрозділів залізниці, за необхідності проведення змін в організації перевізного процесу в межах залізниці, чи коли в ситуації  $MS_1$  необхідні зміни в організації перевізного процесу в межах більш ніж однієї дирекції залізничних перевезень залізниці, то управління реагуванням на аварійну ситуацію здійснюється з пункту управління залізниці.

Продукційне правило цієї ситуації управління ( $MS_2$ ) визначається виразом [5]:

$$MS_2: \left[ \left( \left( U_{RC} \wedge \bar{U}_{OA} \wedge CT_R \right) \vee \left( \bigwedge_{i=1}^q U_{RC} \wedge \bar{U}_{OA} \wedge CT_R \right) \right) \rightarrow CL_{II} \right], \quad (5.37)$$

де  $\bigwedge_{i=1}^q U_{RC}$  – кількість  $q$  спеціальних підрозділів дирекцій залізничних перевезень залізниці, які залучаються до проведення робіт.

За необхідності залучення підрозділів сторонніх організацій продукційне правило ситуації управління ( $MS_{21}$ ) має вигляд [5]:

$$MS_{21}: \left[ \left( \left( U_{RC} \wedge U_{OA} \wedge CT_R \right) \vee \left( U_{RC} \wedge U_{OA} \wedge CT_R \right) \vee \left( \bigwedge_{i=1}^q U_{RC} \wedge U_{OA} \wedge CT_R \right) \right) \rightarrow CL_{OA_{II}} \right], \quad (5.38)$$

яке визначає, що до процесу управління залучаються представники сторонніх організацій, що беруть участь у вжитті заходів з ліквідації екологічно небезпечних наслідків аварійної ситуації.

За умови, що для вжиття заходів з локалізації аварійної ситуації та ліквідування її наслідків залучаються спеціальні підрозділи кількох залізниць та необхідні зміни в організації перевезень в межах усієї мережі залізничного транспорту або під час проведення робіт підрозділами залізниці необхідні такі зміни у перевізному процесі, керівництво цими заходами бере на себе пункт управління ПАТ «Укрзалізниця».

Продукційне правило ситуації управління ( $MS_3$ ) визначається співвідношенням [5]:

$$MS_3 : \left[ \left( (U_{RC} \wedge \bar{U}_{OA} \wedge CT_{RN}) \vee \left( \bigwedge_{j=1}^m U_{RC} \wedge \bar{U}_{OA} \wedge CT_{RN} \right) \right) \rightarrow CL_1 \right], \quad (5.39)$$

де  $\bigwedge_{j=1}^m U_{RC}$  – кількість спеціальних підрозділів залізниць, які залучаються до проведення робіт.

За необхідності участі підрозділів інших міністерств і відомств, до процесу управління залучаються їх фахівці (ситуація управління ( $MS_{31}$ )).

Умови ситуації управління  $MS_{31}$  визначаються за допомогою продукційного правила [5]:

$$MS_{31} : \left[ \left( (U_{RC} \wedge U_{OA} \wedge CT_{RN}) \vee \left( \bigwedge_{j=1}^m U_{RC} \wedge U_{OA} \wedge CT_{RN} \right) \right) \rightarrow CL_{OA_1} \right], \quad (5.40)$$

Наведені приклади формулювання продукційних правил дають науково-методичну основу не тільки для формального опису ситуації, яка потребує управління, але й для визначення необхідного та достатнього рівня управління в цій ситуації. Це забезпечує синергетичний ефект від запровадження принципу мережецентричного управління, адже при цьому в одному пункті управління концентруються усі необхідні повноваження та види ресурсів.

Оцінювання обстановки, різнохарактерне планування заходів, необхідних для реагування на аварійні ситуації, доведення прийнятих рішень до виконавців,

контролювання процесів виконання таких рішень та вироблення корегувальних заходів здійснюється керівниками всіх ланок управління, які правило, в умовах дефіциту часу. Це відбувається зазвичай в умовах невизначеності інформації про обставини транспортної події, наявності загрози людям, об'єктам, пасажирським і вантажним поїздам, при цьому особа, що приймає рішення (ОПР) може знаходитися в стані стресу, крім того, виконання рішення утруднюється чинниками, що властиві залізничному транспорту (наявність контактної мережі, незадовільні умови під'їзду на місцевості тощо).

Тому до складу ситуаційних центрів пунктів управління повинні входити достатньо продуктивні комплекси засобів автоматизації аналізу інформації з метою оперативного та об'єктивного оцінювання обстановки, яка склалася, розв'язування інформаційно-розрахункових завдань щодо прогнозування розвитку екологічно небезпечної аварійної ситуації, вироблення планів дій спеціальних підрозділів для її ліквідації, вжиття заходів щодо всебічного забезпечення таких дій, а також автоматизовані робочі місця оперативного штабу, робочі місця фахівців залізниці та фахівців інших організацій, які залучаються до проведення локалізаційних та ліквідаційних робіт.

На рис. 5.7 наведена схема мережецентричної інформаційної технології управління ліквідацією наслідків залізничних аварійних ситуацій [5].

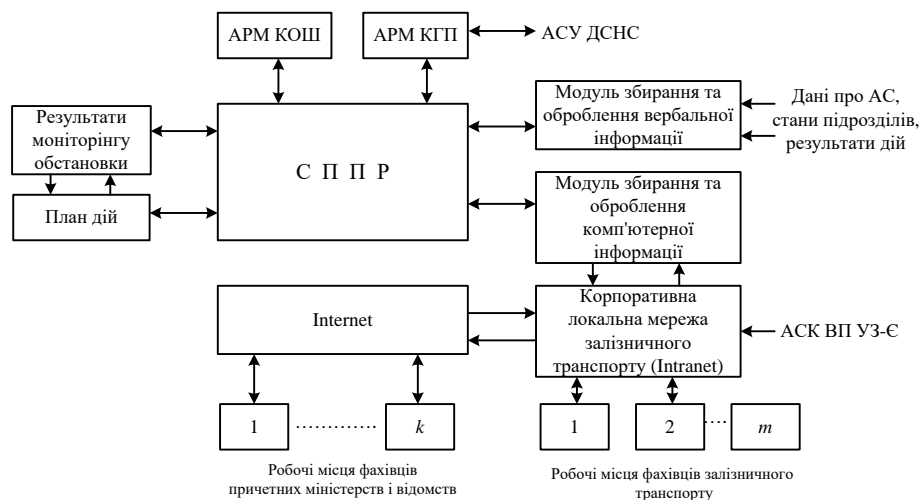


Рис. 5.7. Структурна схема ситуаційного центру управління ліквідацією наслідків залізничних аварійних ситуацій

Оснoву комплексу управлiння складає система пiдтримки прийняття рiшень керiвникiв оперативного штабу i гасiння пожежi (у випадку, коли аварiйна ситуацiя супроводжується пожежею).

Iнформацiя про аварiйну ситуацiю, стани пiдроздiлiв, результати їхнiх дiй по телефонних каналах зв'язку надходять до модуля збирання та оброблення вербальної iнформацiї, де перетворюються у цифрову iнформацiю i далi надходять до СППР. Данi з єдиної автоматизованої системи вантажних перевезень залiзничного транспорту (АСК ВП УЗ-Є) через корпоративну локальну мережу залiзничного транспорту (Intranet) i модуль збирання та оброблення комп'ютерної iнформацiї надходять до СППР, де аналізується. Данi первинного пoviдомлення про аварiйну ситуацiю надходять для аналізу до СППР через вiдповiднi модулi. За потреби цi данi уточнюються за прийнятим на залiзничному транспортi порядком.

Робочi мiсця фахiвцiв залiзничного транспорту, якi пiд'єднанi до Intranet, через вiдповiдний модуль мають доступ до СППР. Такi робочi мiсця можуть безпосередньо знаходитися у ситуацiйному центрi чи працювати з ним дистанцiйно. Автоматизованi робочi мiсця (АРМи) керiвника оперативного штабу i керiвника гасiння пожежi пiд'єднанi до СППР. Робочi мiсця фахiвцiв причетних органiзацiй мають доступ до СППР через Internet, Intranet i вiдповiдний модуль. Такi робочi мiсця мають доступ до АСУ вiдповiдних мiнiстерств i вiдомств.

Якщо аварiйна ситуацiя не супроводжується пожежею (вибухом небезпечного вантажу), то оцiнюється обстановка, яка пов'язана зi сходом рухомого складу з рейок, руйнуванням i пошкодженням вагонiв, локомотивiв, елементiв верхньої будови колiї, контактної мережi, сигналяцiї i зв'язку тощо, просипанням, розливанням або розкиданням небезпечного вантажу. При чому здiйснюється обмiн необхідною iнформацiєю про ступiнь ушкодження цих об'єктiв i рухомого складу, шкоди довкiллю, кiлькiсть постраждалих тощо.

На пiдставi отриманої iнформацiї СППР здiйснює моделювання динамiки розвитку аварiйної ситуацiї, визначаються перелiк i мiсцезнаходження у її небезпечних зонах рухомого складу i об'єктiв iнфраструктури з рiзними ступенями

ушкодження з перебуванням і без перебування людей, характером сходження з рейок аварійного рухомого складу і ушкодження вантажу.

На підставі даних моделювання визначається необхідна кількість ліквідаційних підрозділів та успішність їхніх дій з урахуванням потрібного часу зосередження на місці транспортної події та продуктивності засобів проведення робіт.

З урахуванням вибраних критеріїв здійснюється інтерактивна процедура вибору варіанта рішення, яке може змінюватися за рахунок отримання нових даних про ситуацію

За умови, що аварійна ситуація супроводжується пожежею небезпечного вантажу, оцінювання пожежної обстановки здійснюється керівником гасіння пожежі (КГП) за допомогою відповідного АРМу. Детально дії КГП розглянуті в роботах [55, 60, 152, 219].

Відповідно до прийнятого керівником оперативного штабу (КОШ) рішенням здійснюється планування заходів реагування на аварійну ситуацію по горизонталі та вертикалі. Сітьові графіки проведення операцій (робіт) доводяться до виконавців у вигляді наказів (розпоряджень).

На підставі інформації виконавців відслідковується ступінь відповідності результатів дій підрозділів планам дій. У разі необхідності вносяться необхідні корективи.

При виборі альтернатив керівнику оперативного штабу необхідно враховувати велику кількість суперечних вимог, тобто оцінювати варіанти рішень за багатьма ситуативними критеріями. Суперчливих вимог, неоднозначність оцінювання ситуацій, помилки у виборі пріоритетів дуже ускладнює прийняття рішень. Більшість завдань реагування на аварійні ситуації є багатокритеріальними у зв'язку з чим йому потрібно враховувати велику кількість сил, впливів, інтересів і наслідків, які характеризують варіанти рішень, все це й обумовлює застосування СППР.

Використанню СППР і визначенню їх функціонального призначення присвячена достатня кількість наукових робіт вітчизняних та закордонних



фахівців з різних галузей науки і техніки. Існують різні визначення СППР. У роботах [301 – 304] СППР– це інтерактивні автоматизовані системи, які допомагають особі, яка приймає рішення, використовувати дані і моделі для розв’язування слабоструктурованих проблем.

У роботі [283] розкрита сутність СППР через виконання нею функцій, до числа яких належать:

- функції оцінювання обстановки (ситуацій), вибору критеріїв та визначення їх відносної важливості;
- генерація можливих рішень або сценаріїв дій;
- оцінювання сценаріїв, рішень, дій та вибір найкращих з них;
- забезпечення інформаційного обміну та узгодження групових рішень;
- моделювання рішень, що приймаються (якщо є така можливість);
- динамічне аналізування можливих наслідків рішень, що приймаються;
- збирання даних про результати реалізації прийнятих рішень й оцінювання цих результатів.

Нині для СППР відсутні не тільки загальноприйнятне визначення, але й вичерпна класифікація. Однак вважається, що СППР є одним з сучасних напрямів інформаційних технологій.

Інформаційна технологія (ІТ) є системою методів і способів збирання, накопичення, зберігання, пошуку, обробки, аналізу даних, інформації та знань на підставі застосування апаратних і програмних засобів відповідно до вимог, які висувають користувачі [276, 282, 283, 285, 288 – 290, 307 – 309]. Тобто інформаційні технології є послідовністю дій щодо перетворення інформаційних ресурсів у інформаційні продукти.

Інформаційні технології складаються з таких основних компонент:

- комплексу технічних засобів до складу якого входять обчислювальна, телекомунікаційна та організаційна техніка;
- системи програмних засобів, які складаються із засобів системного (загального) та прикладного (функціонального) програмного забезпечення;
- системи організаційно-методичного і кадрового забезпечення.

Інформаційні системи пройшли декілька етапів свого розвитку.

Інформаційні системи, призначені для обробки електронних даних – СОД (Electronic Data Processing – EDP), були першими в ряду систем, які реалізують інформаційні технології, СОД призначені, як правило, для розв’язування завдань обліку та автоматизують операції збирання, зберігання, обробки, відображення та реєстрації даних. Результати роботи такої системи подаються користувачеві у вигляді відеограм та різноманітних звітів. Подальший розвиток інформаційних технологій дозволив більшу увагу привернути з автоматизації функцій контролю та обліку до автоматизації інших функцій управління.

Інформаційні системи оперативного управління (ІСУ), які з’явилися дещо пізніше СОД, автоматизують операції складання управлінських звітів, за ними з’явилися системи підтримки прийняття рішень (СППР), які значно облегшують розв’язання слабкоструктурованих завдань. Вони призначені для автоматизації функцій обліку, регулювання й, частково, функцій аналізу. До ІСУ (Management Information System – MIS) належать системи, які пов’язані з оперативним керівництвом організацій (установ), системи автоматизації документообігу, а також системи оперативного керування виробничими процесами (автоматизовані системи диспетчерського керування). ІСУ містять у своєму складі СОД та здійснюють пошук і оброблення інформації, яка надходить з СОД і зовнішнього оточення. Такі системи використовуються для розв’язування менш структурованих завдань у порівнянні з СОД. Результатом роботи ІСУ є інформація, яка подана у вигляді, що задовольняє вимогам користувача при прийнятті ним рішення. ІСУ використовується на різних рівнях керування, де рішення приймає користувач [309 – 318].

Подальший розвиток інформаційних систем, які використовуються для автоматизації процесів розроблення управлінських рішень, пов’язаний з процесами моделювання людського розумового процесу, й який отримав назву штучного інтелекту. Важливим добутком штучного інтелекту стали експертні системи – новий клас комп’ютерних інформаційних систем, заснованих на обробленні знань.

Експертні системи (ЕС) – це розділ штучного інтелекту, що використовується у СППР для підвищення їх продуктивності та якості вироблення рішень. Експертні системи у СППР реалізують функції ідентифікації ситуації, яка склалася, її аналізування з визначенням фінального стану її розвитку, вироблення рекомендацій щодо необхідних дій користувача у проблемній ситуації, поповнення бази знань, а також дружнього інтерфейсу [319 – 322, 324 – 334].

Експертні системи, які використовуються для підтримки прийняття рішень складається з блоків, наданих на рис. 5.8.

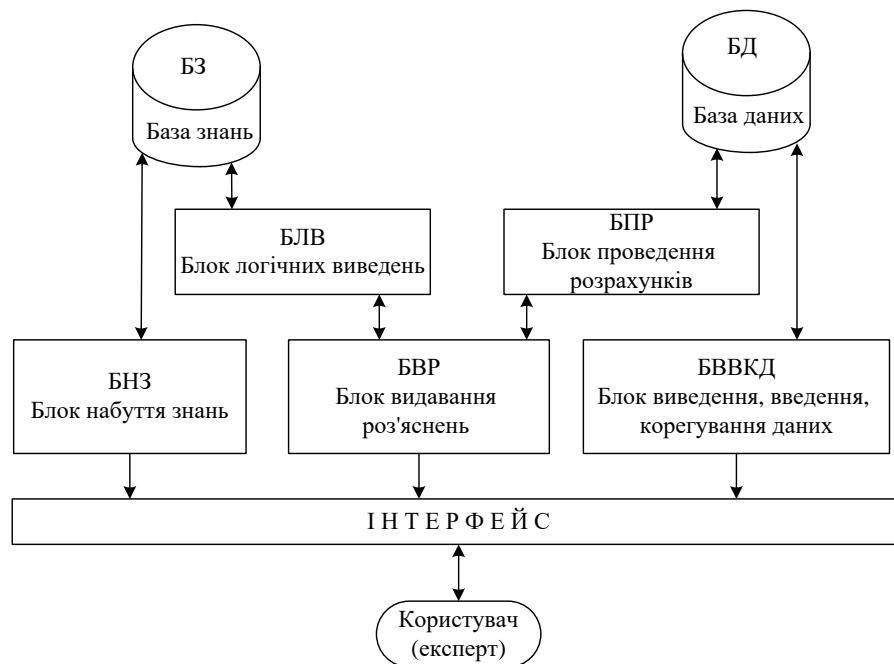


Рис. 5.8. Структура експертної системи підтримки прийняття рішень

Структура ЕС, яка надана на рис. 5.8, містить бази знань і даних, блок логічних виведень, блоки проведення розрахунків, набуття знань, видачі роз'яснень, вводу і виводу даних та користувальницький інтерфейс [325 – 329].

База даних (БД) будується на підставі моделей, за допомогою яких відображаються значення експерта про предметну область, способи аналізу фактів, що надходять, та методи їх виведення, тобто народження нових знань на основі знань, які, є й які знов надходять.

Блок логічних виведень (БЛВ) призначений для здобуття знань з введеної у систему інформації та призначений для роботи з ненадійними даними. Він використовує нечітку логіку, коефіцієнти упевненості, байєсівську логіку, міру

довіри тощо. Цей блок є головним, бо за його допомогою користувач генерує альтернативи та виробляє прийняття рішення.

Блок видачі роз'яснень (БВР) демонструє увесь шлях, яким система дійшла до певного результату. У ЕС, які засновані на правилах, роз'яснення отримують простеженням кроків, які привели до отриманого результату.

База даних (БД), блок проведення розрахунків (БПР), блок введення, виведення та корегування даних (БВВКД) є особливістю будови експертних систем підтримки процесів прийняття рішень. Їх наявність у структурі ЕС визначається великим обсягом та жорсткими вимогами до точності розрахунків, які потрібні для прийняття рішень щодо керування складними системами. У базі даних знаходяться планові, фактичні, розрахункові, звітні та інші показники. Якщо ці блоки, як складові, входять до складу ІСУ чи СОД, то у ЕС вони не розглядаються.

Блок набуття знань (БНЗ) призначений для самонавчання експертної системи, зокрема за надійність і точність рекомендацій, що надаються.

СППР є діалоговою автоматизованою інформаційною системою, яка функціонує за допомогою правил прийняття рішень у певній проблемній області, математичних моделей і баз даних, а також здійснює інтерактивний комп'ютерний процес моделювання.

Вони мають такі основні характеристики: СППР використовують як дані, так й моделі, вони призначені для допомоги ОПР у прийнятті рішень при розв'язуванні слабкоструктурованих і неструктурованих задач, підтримують, а не замінюють, вироблення рішення ОПР; мета СППР – поліпшення ефективності рішень.

Для СППР притаманні такі характеристики: оперує зі слабкоструктурованими рішеннями; призначена для ОПР різних рівнів керування; може бути адаптована для групового та індивідуального використання; підтримує як взаємозалежні, так й послідовні рішення; підтримує такі фази процесу вироблення рішення, як інтелектуальна фаза, проектувальна фаза й фаза вибору; підтримує різноманітні методи і способи вироблення рішення, що може бути корисним при розробленні рішення групою ОПР; є гнучкою й адаптується до змін як організації, так й до її оточення; є простою у користуванні та модифікації; поліпшує ефективність процесу прийняття рішень; дозволяє ОПР керувати процесом прийняття рішень, а не навпаки; підтримує еволюційне використання й легко адаптується до вимог, що

змінюються; легко побудована, за умови, що сформульована логіка конструкції СППР; підтримує моделювання; дозволяє використовувати знання.

Тобто системи підтримки прийняття рішень призначені для інформаційної підтримки ОПР у процесі прийняття неструктурованих рішень в умовах невизначеності, що не дозволяє знайти єдину об'єктивно найкращу альтернативу. Вони є комплексом взаємозв'язаних програм і даних, які використовуються для аналізу аварійної ситуації, формулювання альтернативних рішень і вибору з них найприйнятшого.

#### **5.4. Інформаційні процеси як фактор ефективності ліквідування наслідків аварійних ситуацій**

Як було розглянуто вище, пункти управління силами і засобами залізничної функціональної підсистеми реагування на ситуації техногенного та природного характеру з відповідними оперативними штабами, що створюються при виникненні таких ситуацій, диспетчерським апаратом і черговим персоналом управлінь і служб – це ієрархічна структура, яка відповідає структурі залізничного транспорту.

У контурі керування «пункт управління – ліквідаційні підрозділи» циркулює командна інформація (накази, розпорядження, вказівки тощо) та інформація про параметри небезпечних чинників аварійної ситуації, стан підрозділів, результати їхніх дій, зміну обстановки, матеріально-технічне забезпечення тощо у вигляді відповідних доповідей (повідомлень) [7].

Наприклад, первинне повідомлення про аварійну ситуацію вміщує, зокрема, інформацію про дату, час і місце події; відомості про аварійний поїзд; кількість загиблих і травмованих осіб; ступінь пошкодження рухомого складу, об'єктів і споруд; метеорологічні умови на момент події; характеристику місцевості події, а також інформацію про труднощі доступу до рухомого складу або особливі вимоги, що стосуються прибуття на місце події; інформацію про вантаж, наявність і характер небезпечних вантажів; дані про організацію та проведення аварійно-відбудовних робіт та інші достовірні відомості про транспортну подію, що відомі на момент подання інформації [7, 285].

Так, під час вибору варіанта постановки рухомого складу на рейки оперативним штабом аналізуються повідомлення керівників підрозділів щодо характеру сходження (одного колеса, візка, одного візка повністю або всіх візків, ушкодження конструкції шкворневого з'єднання з рамою вагона та його місце під кузовом рухомого складу, розташування рухомого складу стосовно колії тощо), рельєфу місцевості, наявних поблизу комунікацій, будівель, енергомережі, інших споруд, місцезнаходження та готовності до роботи сил і засобів.

Керівнику оперативного штабу спільно із фахівцями залізничного транспорту потрібно здійснити аналізування великої кількості інформації від керівників різних функціональних підрозділів, що виконують певні функції з реагування на аварійну ситуацію (начальники пожежних та відновних поїздів, аварійно-польових команд, керівники відбудовних підрозділів з відновлення електропостачання, зв'язку тощо). Це інформація про результати розвідки місця події організації і результати проведення робіт з локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків, проведення евакуації людей і техніки, вжиття необхідних заходів безпеки, організації і результатів проведення заходів всебічного забезпечення дій щодо реагування на цю ситуацію тощо.

Дії оперативного персоналу під час різного роду аварійних ситуаціях залежать від самої ситуації, її масштабів та розвитку процесів, які її супроводжують, тобто ці дії можуть бути дуже різноманітними, але при цьому їх можна алгоритмізувати. Алгоритм дій оперативного штабу у залізничних аварійних ситуаціях з небезпечними вантажами розглянутий у третьому розділі цієї роботи.

Кожен із блоків цих алгоритмів є, по суті, кроком у певному порядку виконання робіт щодо аналізу ситуації, організації локалізації та ліквідації її наслідків. Планування та виконання робіт на кожному етапі потребує обміну великою кількістю інформації (накази, доповіді тощо).

Наприклад, нижче наведено графік надходження інформації про виконання технологічного процесу постановки аварійного рухомого складу на рейки (рис. 5.9), що здійснюється відповідно до одного з типових варіантів, передбачених нормативним документом [163].

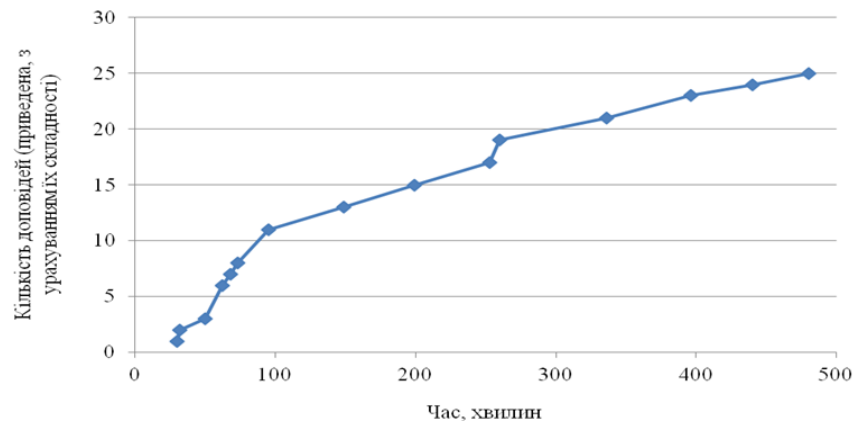


Рис. 5.9. Графік надходження повідомлень про ліквідацію сходу з рейок аварійного рухомого складу

З рис. 5.8 видно, що зовнішній вид графіка технологічного процесу постановки аварійного рухомого складу на рейки дуже нагадує криву експоненціальної залежності кількості повідомлень (з урахуванням їх «складності») від часу їх надходження (на початку та в кінці кожної послідовної роботи) згідно з прийнятим порядком виконання робіт [163].

«Складність» повідомлення визначається тим, що в ньому може міститися декілька «простих» повідомлень, наприклад, про закінчення робіт з прибирання вагона (одне повідомлення) і про початок приведення залізничного вантажопідіймального крана у транспортне положення (друге повідомлення). Складність повідомлення вимірюється коефіцієнтом складності  $k_w \geq 1$ , величина якого залежить від характеру виконуваних робіт.

Припущення про експоненціальний характер залежності потребує підтвердження. Запропонуємо таку математичну модель процесу надходження повідомлень з урахуванням їх складності [7]:

$$I_w(t) = mk_w \left( 1 - e^{-\frac{k_w t}{t_w}} \right), \quad (5.41)$$

де  $I_w(t)$  – кількість повідомлень, з урахуванням їх складності, у поточний момент часу  $t$ , одиниць «простих» повідомлень;  $m$  – кількість робіт (кожна тривалістю  $t_i$ , де  $i = 1, 2, \dots, m$ ), що виконуються послідовно згідно з прийнятим порядком виконання робіт;  $k_w$  – коефіцієнт складності повідомлень при

виконуваних роботах;  $\bar{t}_w$  – середня тривалість виконання однієї роботи, яка дорівнює

$$\bar{t}_w = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i . \quad (5.42)$$

Для перевірки достовірності цього припущення було використано типові технологій виконання робіт та їх нормативні тривалості [163], причому кожна робота, якщо вона виконується вчасно, супроводжується мінімальною кількістю повідомлень ( $r_{min}$ ). Якщо ж роботи виконуються з відхиленням від нормативного графіка, тоді кількість повідомлень може бути й більшою ( $r_{max}$ ). За формулою (5.41) розраховані теоретичні значення кількості повідомлень, які співставленні з нормативними на рис. 5.10.

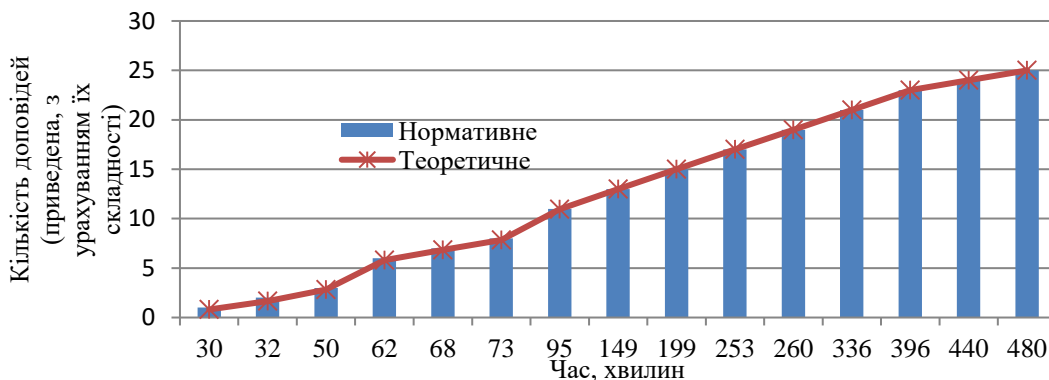


Рис. 5.10. Результати моделювання потоку повідомлень про ліквідацію сходу з рейок аварійного рухомого складу

Графік (рис. 5.10) свідчить, що запропонована математична модель дає надзвичайно близькі до реальних результати – починаючи з 8-ї за порядком роботи розбіжностей між нормативними та теоретичними значеннями практично відсутні, що дає підставу використовувати надалі саме цю математичну модель.

У реальності кількість складних повідомлень коливається між  $r_{min}$  та  $r_{max}$ , причому кожне складне повідомлення може містити декілька простих, а кожне з них – різну кількість «слів» чи інших одиниць інформації, що визначає її загальний обсяг та інтенсивність потоку. Як визначити найбільш ймовірну кількість інформації та інтенсивність її потоку? Використаємо для цього математичну



модель, в основу якої покладено графік, наведений на рис. 5.11 і логіка якої пояснена нижче [7].

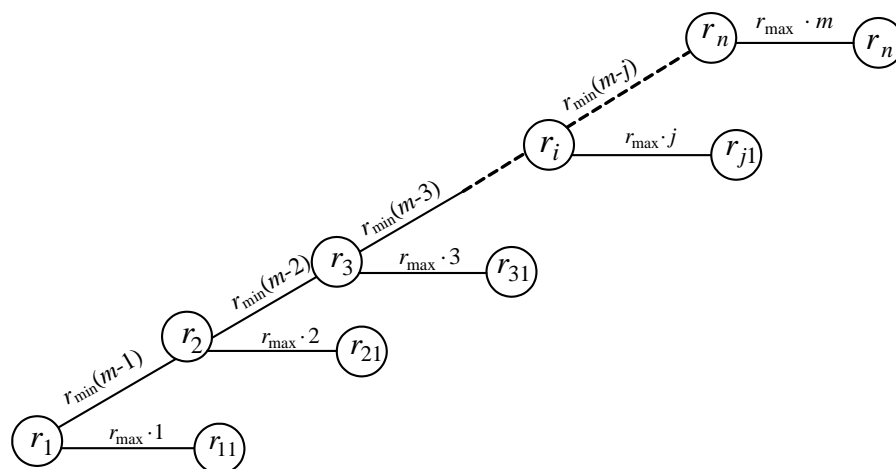


Рис. 5.11. Діаграма розрахунку кількості доповідей

Правилами [57] встановлено, що під час розроблення плану реагування на аварійну ситуацію визначається порядок надання повідомлень (доповідей, донесень) про хід виконання запланованих робіт.

Припустимо, що для усіх  $m$  робіт технологічного графіка встановлений такий порядок надання повідомлень про хід їх виконання: для робіт, що відбуваються у штатному режимі мінімальне число повідомлень ( $r_{\min}$ ), для робіт із порушенням графіка виконання за різних причин – число повідомлень ( $r_{\max}$ ), що відповідає раніше прийнятому порядку надходження повідомлень.

Так, якщо порушення графіка проведення робіт виникло під час виконання однієї роботи, а усі інші роботи виконані своєчасно, то загальне число доповідей ( $r_1$ ) буде:

$$r_1 = r_{\max} \cdot 1 + r_{\min}(m-1). \quad (5.43)$$

У ситуації, коли порушення графіків сталося у двох роботах, а інші виконані своєчасно, загальне число доповідей ( $r_2$ ) становить

$$r_2 = r_{\max} \cdot 2 + r_{\min}(m-2). \quad (5.44)$$

Для  $j$  робіт з порушенням графіків виконання робіт, загальне число доповідей ( $r_j$ ) буде:

$$r_j = r_{\max} \cdot j + r_{\min}(m-j) = r_{j1} + r_{j2}. \quad (5.45)$$

Порушення графіків робіт у всіх  $m$  роботах, число доповідей ( $r_m$ ) становитиме:

$$r_n = r_{\max} m. \quad (5.46)$$

Такі міркування, які ілюструються діаграмою, що подана на рис. 5.10, приводять до того, що загальна кількість доповідей ( $r$ ) становитиме

$$r = \sum_{j=1}^m (r_{\max} j + r_{\min} (m - j)). \quad (5.47)$$

Визначимо імовірності подання доповідей про порушення технологічних процесів виконання робіт ( $P_{j1}$ ):

$$P_{j1} = \frac{r_{j1}}{r} = \frac{r_{\max} \cdot j}{\sum_{j=1}^m (r_{\max} j + r_{\min} (m - j))}. \quad (5.48)$$

Аналогічно імовірності доповідей про нормальний хід технологічних робіт визначається:

$$P_{j2} = \frac{r_{j2}}{r} = \frac{r_{\min} \cdot (m - j)}{\sum_{j=1}^m (r_{\max} j + r_{\min} (m - j))}. \quad (5.49)$$

Математичне сподівання кількості доповідей про порушення ходу робіт становить:

$$M[r_{j1}] = \sum_{j=1}^m \frac{r_{\max} \cdot j}{\sum_{j=1}^m (r_{\max} \cdot j + r_{\min} (m - j))} \cdot j. \quad (5.50)$$

Математичне сподівання кількості доповідей про нормальний хід робіт буде:

$$M[r_{j2}] = \sum_{j=1}^m \frac{r_{\min} \cdot (m - j)}{\sum_{j=1}^m (r_{\max} \cdot j + r_{\min} (m - j))} (m - j). \quad (5.51)$$

Математичне сподівання загальної кількості доповідей (яка й визначає обсяг інформації) становить:

$$M[r] = M[r_{j1}] + M[r_{j2}]. \quad (5.52)$$

Результати проведеного чисельного експерименту щодо визначення характеру зміни величини математичного сподівання повідомлень різної конкретизації про хід проведення ліквідаційних робіт наведений на рис. 5.12.

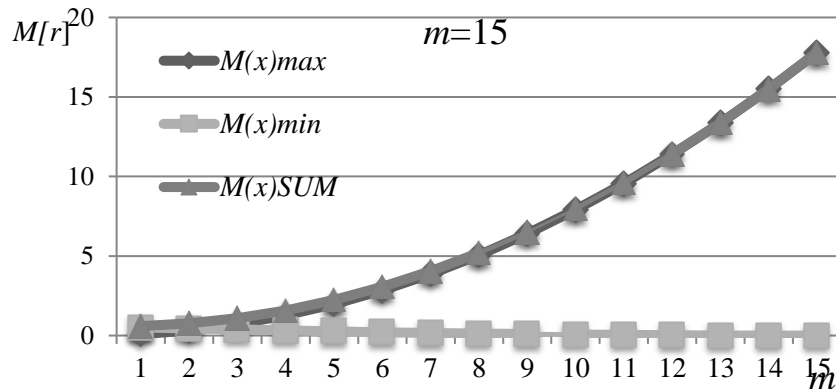


Рис. 5.12. Характер зміни математичного очікування числа повідомлень про хід виконання ліквідаційних робіт

Рис. 5.12 підтверджує, що на характер зміни математичного сподівання  $M[r]$  значно впливає складова  $M[r_{j1}]$ . Наприклад, при  $m = 15$ ,  $r_{min} = 2$ , на цю складову при  $r_{max} = 3$  припадає 73% повідомлень, при  $r_{max} = 7$  – 94% повідомлень а при  $r_{max} = 11$  – 97% повідомлень. Слід зазначити, що на повідомлення з максимальною конкретизацією (деталізацією) припадає й такий самий відсоток часу, необхідний як для їх передавання по каналах зв'язку, так й для усвідомлення ОПР.

Характер залежності зміни  $M[r]$  від максимальної величини конкретизації повідомлення ( $r_{max}$ ) наданий на рис.5.13.

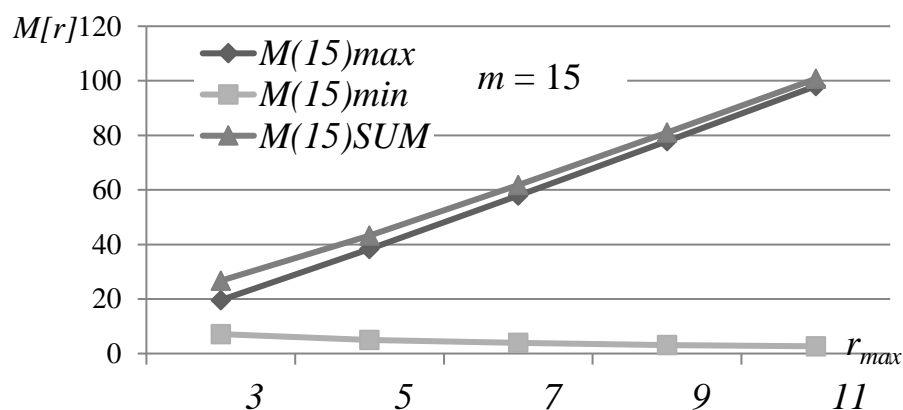


Рис. 5.13. Залежність середньої кількості повідомлень від їхньої максимальної кількості та кількості робіт  $M[r] = f(m, r_{max})$

Рис. 5.13 свідчить, що із збільшенням величини  $r_{\max}$  при визначеній кількості робіт ( $m$ ), величина  $M[r]$  стрімко зростає за лінійним законом.

З огляду на те, що час на прийняття рішення, як правило, є дуже обмеженим, то перед ОПР постає проблема якнайшвидшого осмислення інформації про обстановку, що склалася, аналізування чинників і умов, що впливають на проведення ліквідаційних робіт (тобто на мінімізацію часу) оцінювання обстановки. Зменшення цього часу, на наш погляд, можна здійснити за рахунок впровадження на залізничному транспорті регламенту надання повідомлень про хід виконання відновлювальних та, завдяки формалізації таких повідомлень, значно зменшити обсяг інформації, який необхідно «обробити» ОПР.

Зауважимо, що до формули (5.41) входить величина  $\bar{t}_w = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m t_i$ , де  $t_i$  – тривалість виконання однієї роботи. Враховуючи, що  $\sum_{i=1}^m t_i = T_e$ , а  $k_w = M[r]$  формулу (5.41) можна записати у вигляді [7]:

$$I_w(t) = M[r]m(1 - e^{-\frac{m}{T_e}t}), \quad (5.53)$$

де  $T_e$  – гранично допустимий термін припинення дії небезпечних факторів аварійної ситуації, встановлений наказом (цикл наказу).

Формула (5.42) є інтегральною функцією потоку інформації залежно від часу.

Знайдемо  $\alpha_{ij} = \frac{dI_w(t)}{dt}$ .

$$\alpha_{ij} = \frac{dI_w(t)}{dt} = M[r]m \frac{m}{T_e} e^{-\frac{m}{T_e}t} = \frac{M[r]m^2}{T_e} e^{-\frac{m}{T_e}t}. \quad (5.54)$$

Формула (5.43) дає можливість оцінити щільність потоку інформації на кожному з  $k$  етапів процесу виконання ліквідаційних робіт, на яких роботи виконуються підрозділами різних служб, кожна з яких є окремим джерелом інформації. Тому у формулі

$$\alpha_{ij} = \frac{M[r]m^2}{T_e} e^{-m \frac{t}{T_e}}. \quad (5.55)$$

$\alpha_{ij}$  – щільність потоку інформації  $i$ -ї служби на  $j$ -му етапі проведення робіт.

Визначимо характер залежності  $\alpha_{ij} = f(t)$  для різних значень  $r_{\max}$  при певному  $m$ . Результати обчислювального експерименту надані на рис. 5.14.

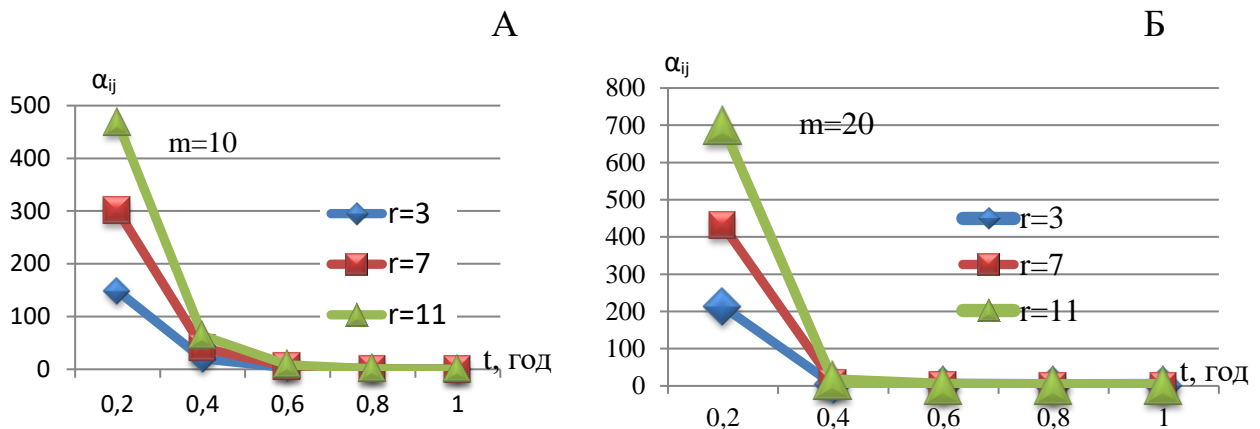


Рис. 5.14. Залежність щільності потоку  $\alpha_{ij}$  інформації  $i$ -ї служби на  $j$ -му етапі проведення робіт від часу  $t$

З моделі, за якою побудовано рис. 5.14 стає зрозуміло, що найбільша щільність інформаційного потоку припадає на початок етапу процесу виконання ліквідаційних робіт. Отже, модель адекватно відображає сутність початкового етапу, коли необхідно надавати максимальний обсяг інформації про умови і фактори, які впливають на їхнє проведення, стан і готовність до дій ліквідаційних підрозділів тощо.

Із збільшенням величини  $r_{\max}$  інтенсивність потоку у цей період значно зростає, але досягнувши деякого часу ( $t_3 = 0,6$  год. для  $m = 10$  рис. 5.14,а) і  $t_2 = 0,4$  год. для  $m = 20$  рис. 5.14,б)) інтенсивність потоку помітно стабілізується та стає практично незмінною до закінчення етапу (часу  $T_e$ ).

Зменшення часу стабілізації інформаційного потоку із збільшенням числа ліквідаційних робіт, на наш погляд, можна пояснити зменшенням відносної «ваги значущості» окремого повідомлення та його впливу на увесь комплекс робіт (кількість яких  $m$ ).

Отриманий результат щодо швидкої стабілізації інформаційного потоку на мінімальному рівні із збільшенням числа ліквідаційних робіт ( $m$ ), які знаходяться в межах горизонту планування, тобто при збільшенні граничного часу ( $T_e$ ) ефективної дії рішення ОПР на проведення більш одного етапу робіт. Це спонукає до розгляду необхідності прийняття ОПР рішення на проведення якнайбільшої кількості послідовних етапів ліквідаційних робіт.

На нашу думку, це можливо за деяких умов. По-перше, необхідно мати різні інструменти (передусім адекватні математичні моделі) проведення точного та якісного прогнозування розвитку небезпечних чинників аварійної ситуації та ефективності дій підрозділів з локалізації такої ситуації та ліквідації її наслідків. Питанням розроблення таких механізмів присвячена низка робіт, зокрема роботи [156, 176 – 178]. По-друге, необхідно мати можливість безпосереднього спостереження за обстановкою на місці проведення ліквідаційних робіт, наприклад, за допомогою БПЛА [175], з метою вироблення рішення ОПР та, у разі необхідності, корегувальної командної інформації.

Враховуючи те, що на  $k$  етапах виконання ліквідаційних робіт беруть участь підрозділи різних служб, загальна кількість яких, наприклад,  $b$ , то доцільним є визначення потоку інформації, який надходить до ОПР певного рівня управління протягом усіх етапів від усіх виконавців робіт.

Інтенсивність загального потоку інформації розрахуємо як

$$\lambda_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^b \alpha_{ij}}{T_e \left( \frac{1}{j} - \frac{1}{k+1} \right)}, \quad (5.56)$$

де  $i$  – порядковий номер служби;

$j$  – порядковий номер етапу;

$\alpha_{ij}$  – потік інформації від  $i$ -ї служби на  $j$ -у етапі;

$k$  – кількість обов'язкових етапів до моменту завершення дії наказу ( $T_e$ );

$t_k = \frac{T_e}{k}$  - середня тривалість етапу всередині циклу;

$b$  – кількість джерел інформації (служб, що оцінюють аварійну ситуацію).

У формулі (5.44) останній  $(k+1)$ -й етап – це етап перевірки повноти виконання усіх робіт та доповіді про це на пункт управління.

На рис. 5.15 подані результати проведеного обчислювального експерименту щодо визначення характеру зміни інформаційних потоків кожної з п'яти служб регіональної філії залізниці на шести етапах циклу відновних робіт. Для розуміння результатів, наведених на рис. 5.15, зазначимо, що умовний порядковий номер служби відповідає її «вагомості значущості» при організації та проведенні ліквідаційних робіт. Наприклад, вагомість служби 1 більше за вагомість служби 2, вагомість служби 2 більша за вагомість служби 3 і т.д.

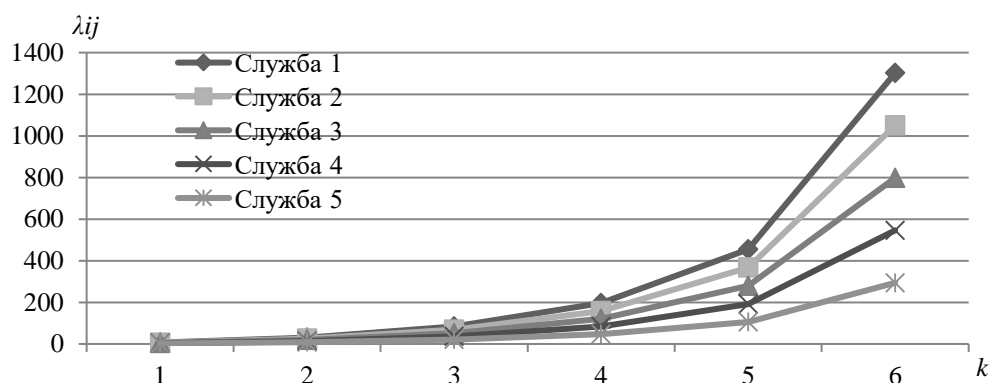


Рис. 5.15. Залежність інтенсивності  $\lambda_{ij}$  загального потоку інформації від потоку інформації  $\alpha_{ij}$  і кількості етапів  $k$

Як бачимо з рис. 5.15, на відміну від результатів, що відображені на рис. 5.14, найбільша щільність інформації припадає на завершальні етапи, бо містить у своєму складі потоки інформації попередніх етапів. Тобто тут моделлю, знову ж таки адекватно, відображається той факт, що інформація, яка використовувалася на кожному з етапів циклу відновних робіт не застаріває до моменту закінчення всього циклу таких робіт.

На рис. 5.16 наданий графік залежності щільності загальної кількості повідомлень по всіх службах на кожному з етапів циклу робіт та при збільшенні сумарних потоків на кожному з етапів.

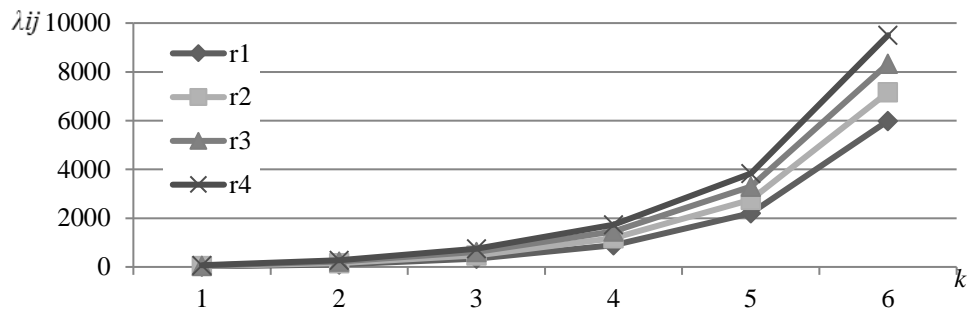


Рис. 5.16. Залежність залежності щільності загальної кількості повідомлень по всіх службах на кожному з етапів циклу робіт та при збільшенні сумарних потоків  $r_i$  ( $r_1 < r_2 < r_3 < r_4$ ) на кожному з етапів

Графіки, що надані на рис. 5.15 і 5.16, більш ніж переконливо відображують «лавиноподібний» характер потоку інформації, що надходить до ОПР. Ця інформація вимагає для її врахування та осмислення певного часу, додатковий час необхідний для вироблення рішення, а також потрібен час на доведення цього рішення до виконавців, причому жоден з цих етапів циклу управління неприпустимо ігнорувати. Тобто ОПР працює в складних умовах «надлишку» інформації, неможливості ігнорувати її деталі, і «цейтноту» часу власне на прийняття рішення.

Зрозуміло, що в таких умовах неможливо обійтися без СППР, яка повинна ґрунтуватися на розгалуженій та високопродуктивній системі збирання та передавання інформації. Ця система повинна використовувати технології об'єктивного оцінювання ситуації онлайн, мати математичні моделі та програмні засоби для прогнозу ситуації, а також використовувати канали зв'язку відповідної потужності.

Архітектура такої СППР має відповідати існуючій єдиній автоматизованій системі вантажних перевезень Укрзалізниці (АСК ВП УЗ-Є) з відповідною мережею передачі даних.

Структура СППР, що пропонується для керівників оперативних штабів майбутніх ситуаційних центрів реагування на аварійні ситуації, надана на рис. 5.17.



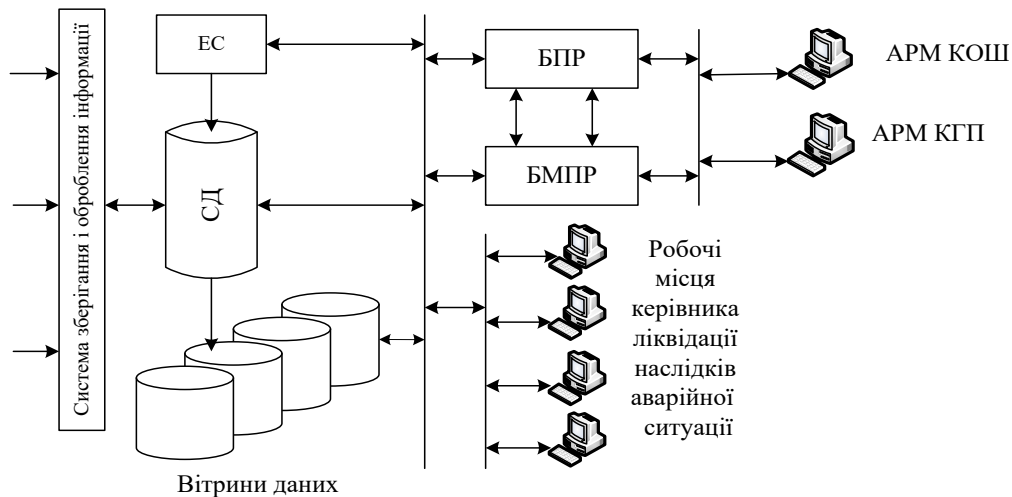


Рис. 5.17. Структура СППР

До складу СППР входять: експертна система (ЕС), сховище даних (СД), вітрини даних керівників ліквідації наслідків аварійної ситуації на об'єктах і в рухомому складі залізничного транспорту (КЛННС), блок методів прийняття рішень (БМПР) і блок підготовки рішення (БПР).

Сховище даних є оптимально організованою базою, що забезпечує максимально швидкий доступ до інформації, яка необхідна під час вироблення рішення.

Кожна конкретна вітрина даних створюється для оцінювання обстановки і вироблення найбільш прийняттого варіанта виконання заходів щодо ліквідації наслідків аварійної ситуації на об'єктах і в рухомому складі господарств залізничного транспорту.

БМПР повинен мати достатню кількість різноманітних методів прийняття рішень з відповідним механізмом аналізу цих методів. До таких методів належать нейронні мережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми, дерева рішень, а також методи математичної статистики, теорії ймовірностей, регресійний аналіз тощо.

З урахуванням того, що дані в СППР можуть подавати у вигляді текстової та графічної інформації, то у складі такої системи повинні використовувати відповідні методи оброблення цієї інформації.

БПР є алгоритмом, який вибирає одне рішення з деякої множини варіантів, які надаються БМПР, або видає ранжований список рішень за встановленими критеріями.

Архітектура СППР, що пропонується, дозволить створювати сховище і вітрини даних, алгоритми аналізування обстановки і вироблення рішень єдиними для усіх ситуаційних центрів ієрархічної системи пунктів управління залізничного транспорту, а також для мобільного пункту управління реагуванням на аварійні ситуації і ліквідації їхніх наслідків, який знаходиться на місці проведення ліквідаційних заходів.

Структурна схема інформаційної технології вироблення варіантів рішень з ліквідування наслідків аварійної ситуації з небезпечними вантажами третього класу безпеки, яка реалізується в СППР, надана на рис. 5.18.

Рис. 5.18 підтверджує, що для вироблення прийнятого варіанта рішення, керівнику оперативного штабу з ліквідування наслідків аварійної ситуації необхідно здійснити ітеративний інтерактивний процес, складові якого були розглянуті вище.

Основними етапами такого процесу є аналізування даних розвідки з місця транспортної події, здійснення прогнозування розвитку небезпечних чинників аварійної ситуації та виявлення об'єктів, які знаходяться у небезпечних зонах аварії, що дає можливість створити єдину інформаційну картину аварійної ситуації для усіх причетних.

На підставі даних про розвиток аварійної ситуації, з урахуванням досвіду дій у аналогічних аварійних ситуаціях, необхідно визначити ситуативні критерії прийняття рішення, розрахувати імовірності успішних дій ліквідаційних підрозділів, розробити узгоджений план проведення ліквідаційних заходів, який довести до причетних, та здійснювати постійний контроль за ходом його виконання, а при необхідності, ввести корективи.

Ефективне розв'язування завдань реагування на аварійні ситуації неможливе без обізнаного досвідченого персоналу пунктів управління.

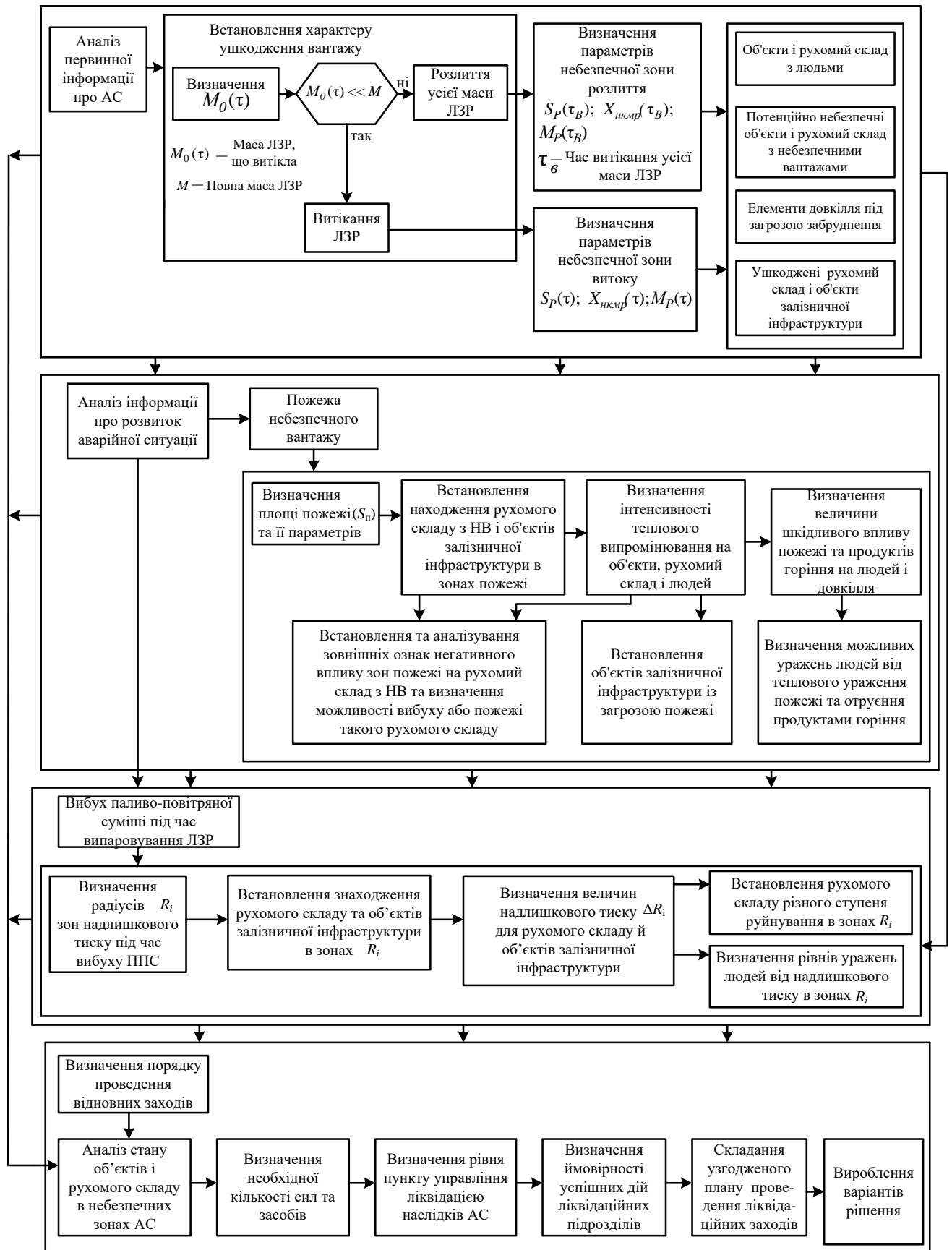


Рис. 5.18. Структурно-логічна схема інформаційної технології вироблення варіантів рішень з ліквідування наслідків аварійної ситуації з небезпечними вантажами 3-го класу безпеки

Проведені, згідно з методикою [338], розрахунки визначення очікуваних від забруднення довкілля небезпечними речовинами внаслідок залізничних аварійних ситуацій під час транспортування небезпечних вантажів за період з 2012р. по 2016р. показує, що при зменшенні часу для підготовки і прийняття керівником оперативного штабу своєчасного раціонального рішення та інтенсифікувати проведення заходів щодо локалізації утворення первинної і вторинної хмар розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері та ліквідації їхнього шкідливого впливу та довкілля та людину на 10-15%, призводить до зменшення таких збитків щорічно від 1,260 тис. грн до 1,6655 тис. грн.

## **Висновки до розділу 5**

У п'ятому розділі дисертаційної роботи на підставі методів загальної теорії систем, штучного інтелекту, теорії та практики мережецентричного управління складними динамічними ергатичними системами отримано такі результати :

1. Вперше запропоновано формальний опис залізничної аварійної ситуації за допомогою системи продукційних правил для створення бази знань та опрацювання в середовищі системи підтримки прийняття рішень керівника оперативного штабу реагування на таку ситуацію рекомендацій щодо локалізації аварійної ситуації та ліквідації її наслідків.

2. Розроблений алгоритм формування бази знань експертної системи, що є складовою СППР, яка може використовуватися як для опрацювання рішень у аварійних ситуаціях, що дозволить скоротити час на прийняття обґрунтованого управлінського рішення, так й для навчання персоналу пунктів управління процедурам прийняття рішень при взаємодії з СППР.

3. Доведено, що застосування в умовах невизначеності часових параметрів ліквідаційних процесів комплексу розрахункових методів мережецентричного управління та мережевого планування дозволяє обґрунтувати терміни успішного виконання таких заходів та створити методологічну основу СППР.

4. Обґрунтовано критерії доцільності передачі функцій прийняття рішень на відповідний рівень управління, запропоновано структуру та функції ситуаційного

центру управління локалізацією залізничної аварійної ситуації та ліквідацією її наслідків.

5. Встановлено, що для зменшення інформаційних потоків та їхньої стабілізації у контурі управління «пункт управління – ліквідаційні підрозділи» доцільним є вироблення рішення керівника оперативного штабу не на один, а одразу на декілька етапів проведення ліквідаційних робіт, для чого необхідні відповідні математичні моделі прогнозування розвитку небезпечних чинників аварійної ситуації та визначення результатів дій ліквідаційних підрозділів та їхніх з'єднань.

6. Запропоновано для опису інформаційних процесів та перевірено обчислювальними експериментами математичні моделі, що адекватно відображають динаміку обміну інформацією в контурі керування «пункт управління – ліквідаційні підрозділи» при будь-якій кількості служб та підрозділів, зайнятих ліквідаційними роботами, та етапів цих робіт.

7. Встановлено, що в умовах дефіциту часу процес надходження різноманітних даних до керівника оперативного штабу набуває лавиноподібного характеру, що ускладнює сприйняття та аналіз ним цієї інформації, у зв'язку з чим для ефективного вироблення рішення з ліквідації наслідків аварійних ситуацій є критично необхідним застосування системи підтримки прийняття рішення (СППР), яка повинна базуватися на розгалуженій високопродуктивній мережі зв'язку та сучасних засобах відеоспостереження, наприклад, БПЛА.

8. Зменшення часу для підготовки і прийняття керівником оперативного штабу своєчасного раціонального рішення та інтенсифікування проведення заходів щодо локалізації утворення первинної та вторинної хмар розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері і ліквідації їхнього шкідливого впливу та довкілля та людину на 10-15%, призводить до зменшення таких збитків щорічно від 1260 тис. грн до 16655 тис. грн.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему зменшення шкідливого впливу на довкілля і життєдіяльність людини негативних чинників аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом шляхом створення методологічних засад управління екологічною безпекою внаслідок удосконалення управління реагуванням на такі аварійні ситуації з використанням інформаційних технологій на основі мережецентричного управління. Основні наукові теоретичні та практичні результати досліджень можна узагальнити таким чином:

1. На основі аналізу сучасного стану перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом України показано, що характерними наслідками аварійних ситуацій при транспортуванні таких вантажів є витікання (80,7%), самозаймання (11,2%) і випаровування (5,6%), що зумовлює необхідність створення комплексу організаційно-технічних заходів, спрямованих на проведення ефективних дій щодо зменшення шкідливого впливу на довкілля та життєдіяльність людини негативних чинників цих ситуацій. Виявлено, що існує антагоністична суперечність між сторонами залізничної аварійної ситуації (природними і техногенними чинниками та цілеспрямованими діями ліквідаційних підрозділів), особливістю якої є наявність екологічної небезпеки «перебування» природних механізмів на місці розв'язування суперечності, тоді як зосередження ліквідаційних підрозділів та організація їхніх дій оперативним штабом ще потребує певних зусиль і часу.

2. Досліджено причини виникнення залізничних аварійних ситуацій внаслідок внутрішніх і зовнішніх ініціюючих подій, здійснена класифікація таких ситуацій за їхніми наслідками. Проаналізовано вплив на довкілля і життєдіяльність людини аварійних небезпечних вантажів за умов їхньої взаємодії з повітрям, водою, лугами, кислотами, металами, нафтопродуктами, а також при нагріванні, горінні і вибуху, на підставі чого розроблені типові сценарії розвитку залізничних аварійних ситуацій з вантажами різних класів небезпеки задля створення бази знань СППР керівників оперативних штабів ліквідації наслідків таких аварійних ситуацій.

3. З метою прогнозування розмірів небезпечних чинників залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами створені та тривалий час

використовуються комп'ютерні програми визначення розмірів вибухонебезпечних зон та надлишкового тиску при вибуху газів і легкозаймистих речовин, зон аварійного розливу легкозаймистих і горючих речовин, щільність теплового випромінювання від факела полум'я і вогняної кулі. Для удосконалення цих комп'ютерних програм запропоновано введення в них відповідних комп'ютерних процедур на основі розробленого методу визначення параметрів зон забруднення верхньої будови залізничної колії при аварійному розливі нафтопродуктів, а також процедур оцінювання ймовірності ураження людини, будівель і споруд від вибуху паливо-повітряної суміші та теплового випромінювання.

4. З метою розширення прогностичних можливостей методу визначення небезпечних для довкілля та життєдіяльності людини чинників залізничних аварійних ситуацій під час перевезення легкозаймистих вантажів запропонований метод оцінювання часової залежності інтенсивності викиду небезпечної речовини, яка інтегрована у сучасну модель атмосферного перенесення таких речовин, що дозволяє врахувати часову мінливість джерела викиду (аварійного рухомого складу) і розрахувати часові залежності концентрації цієї речовини в атмосфері на різних відстанях від джерела викиду.

5. Формалізовано систему залізничних перевезень небезпечних вантажів у разі виникнення аварійних ситуацій залежно від ефективності реагування на такі аварійні ситуації; на підставі чого розроблені математичні моделі визначення ймовірності станів і рівня екологічної безпеки цієї системи. Встановлено, що для зменшення шкідливого впливу залізничної аварійної ситуації з небезпечними вантажами на довкілля і життєдіяльність людини критичне значення має своєчасність і обґрунтованість управлінського рішення щодо проведення узгоджених дій різномірних ліквідаційних підрозділів, що дає синергетичний ефект не лише скорочення часу ліквідаційних робіт, а й зменшення негативних екологічних та інших наслідків аварійної ситуації. Комп'ютерними експериментами встановлено, що скорочення часу прийняття управлінського рішення всього на 15 хвилин призводить до зменшення загальної тривалості цих робіт у середньому від однієї до майже чотирьох годин.

6. За результатами дослідження функціонування ліквідаційних підрозділів та їхніх оперативних з'єднань щодо відновлення безпечного стану і належного рівня

екологічної безпеки залізничної транспортної системи доведена можливість застосування класичних методів теорії масового обслуговування та адаптовано ці методи для обґрунтування та моделювання різних схем організації проведення ними аварійно-відновних робіт та прогнозування і оцінювання результативності дій таких підрозділів. Встановлені кількісні співвідношення між інтенсивністю впливу небезпечних чинників залізничної аварійної ситуації на довкілля та людину, інтенсивністю зосередження і розгортання ліквідаційних підрозділів, продуктивністю їхніх дій та ймовірністю виконання ними ліквідаційних робіт.

7. За результатами проведеного аналізу дій оперативних штабів різних рівнів управління при ліквідуванні наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами доведено, що ефективність реагування на залізничні аварійні ситуації значно підвищується за умови застосування СППР керівника оперативного штабу із відповідними математичними моделями та структурно-логічними схемами дій оперативного штабу за критеріями ефективності системи ліквідування небезпечних для довкілля та життєдіяльність людини наслідків цих ситуацій – збалансованих термінів відновлення руху поїздів (сталого функціонування транспортної системи) і необхідних для цього ресурсів.

8. За результатами дослідження процесів функціонування системи управління реагуванням на аварійні ситуації при транспортуванні небезпечних вантажів обґрунтовано критерії доцільності передачі функцій прийняття рішень на відповідний рівень управління, запропоновано структуру та функції ситуаційного центру реагування на залізничні аварійні ситуації. Запропоновано для опису інформаційних процесів та перевірено обчислювальними експериментами математичні моделі, що адекватно відображають динаміку обміну інформацією в контурі керування «пункт управління – ліквідаційні підрозділи» при будь-якій кількості служб та підрозділів, зайнятих ліквідаційними роботами, та етапів цих робіт. Встановлено, що для зменшення інформаційних потоків та їхньої стабілізації у цьому контурі управління доцільним є вироблення рішення керівника оперативного штабу не на один, а одразу на декілька етапів проведення ліквідаційних робіт. Встановлено, що для ефективного вироблення рішення з ліквідації наслідків аварійних ситуацій в умовах дефіциту часу критично необхідним є застосування СППР, яка повинна базуватися на розгалуженій



високопродуктивній мережі зв'язку та сучасних засобах відеоспостереження. Використання такої СППР при ліквідуванні наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами дає змогу скоротити час на підготовку і прийняття раціонального рішення керівника ліквідації аварійної ситуації та інтенсифікувати проведення комплексу ліквідаційних заходів на 10–15 % у порівнянні з існуючою системою підготовки та прийняття рішень.

9. Створення методологічних засад організації управління екологічною безпекою під час ліквідування наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами, яке полягає в удосконаленні методів, моделей і технологій аналізу обстановки, що склалася, прогнозуванні розвитку небезпечних чинників аварійної ситуації, розробленні узгоджених планів дій ліквідаційних підрозділів, виробленні за допомогою СППР ефективного рішення керівника оперативного штабу і своєчасному доведенні цього рішення до виконавців, впровадженні принципів мережецентричного управління складними ієрархічними динамічними системами, використанні високопродуктивних засобів проведення відновних робіт, здійсненні якісної професійної підготовки працівників оперативних штабів і ліквідаційних підрозділів дозволило за період з 2012р. по 2017р. зменшити шкідливий вплив на довкілля та життєдіяльність людини негативних чинників таких ситуацій щорічно в середньому на 1260 тис. грн і відновити сталє функціонування залізничної транспортної системи у можливо короткий термін.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про залізничний транспорт» // Верховна Рада (ВВР). 1996. – № 40. Ст. – 184.
2. 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 Міністерства транспорту та зв'язку України від 08.12.2006 № 1486. – К.: Міністерств транспорту та зв'язку України, 2006. – 36 с.
3. Кодекс Цивільного захисту України // Верховна Рада України (ВВР). 2013. – № 14. Ст. – 1568.
4. Мироненко В. К. Передумови створення СППР щодо ліквідації наслідків залізничних надзвичайних ситуацій на основі мережецентричних методів управління / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, В. І. Мацюк // Системи обробки інформації. Харків. – № 5(142). – 2016. – С.163–171.
5. Кацман М. Д. Система підтримки прийняття рішень мережецентричного управління реагуванням на надзвичайні ситуації / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Системи озброєння і військова техніка. – № 2(46). – 2016. – С.89–93.
6. Кацман М. Д. Практичне застосування мережецентричних методів для управління реагування на залізничні надзвичайні ситуації / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних сил. – Вип.2(47). – 2016. – С.130–136.
7. Кацман М. Д. Математичні моделі інформаційних процесів при ліквідуванні залізничних надзвичайних ситуацій / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – № 2(23). – 2016. – С.126–134.
8. Кацман М. Д. Методологічні основи створення новітньої системи управління реагуванням на залізничні надзвичайні ситуації/ М. Д. Кацман // Маркетинг і логістика в системі менеджменту на залізничному транспорті:

VI міжнародна науково-практична конференція, 27-29 вересня 2016 р. тези доп. – Запоріжжя, 2016. – С.129–141.

9. Положення про систему управління безпекою руху поїздів у Державній адміністрації залізничного транспорту України : наказ Міністерства інфраструктури України від 01.04.2011 № 27 // Офіційний вісник України. – 2011. – № 48. – ст. 1972. Шляхи вдосконалення функціональної підсистеми URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/zd729-11>.

10. Мельничук В. О. Про стан безпеки руху на залізницях України та заходи щодо його підвищення/ В. О. Мельничук, В. С. Крот // Зб. наук.-практ. матеріалів «Перспективи впровадження технічних засобів безпеки руху на залізницях України». – Судак, 2005. – С.3–9.

11. Lapin. V. I.S. Blioh (1836 – 1901) Railway magnate and peacemaker, prominent scientist-railroader: economist, statistician and financier / V. Lapin, O. Kryvopishyn, M. Katsman. – San Diego, USA. – Reliability: theory & applications. – Vol. 2.№ 04(23). –2011. – P. 149–155.

12. Дружинин Г. В. Человек в моделях технологий / Г. В.: Дружинин: уч.пособие в 3-х частях / Часть 1. Свойства человека в технологических системах. – М.: МИИТ, 1996. – 124 с.

13. Лысенков В. М. Статистическая теория безопасности движения поездов/ В. М. Лысенков : учебник для вузов. – М.: ВИНТИ РАН, 1999. – 332 с.

14. Белов П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере / П. Г. Белов – М.: Изд.центр «Академия», 2003. – 512 с.

15. Акимов В. А. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски / В. А. Акимов, В. Д. Новиков, Н. Н. Радаев. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2001. – 344 с.

16. Кацман М.Д. Застосування інноваційних методик для забезпечення безпеки залізничного транспорту/ М. Д. Кацман, В. А. Жуков // Українська залізниця. – 2017. – №7–8 (49–50). – С. 47–51.

17. Бусленко Н. П. Лекции по теории сложных систем / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко. – М. : Наука, 1973. – 440 с.

18. С. Ринальди. Теория систем в приложение к проблемам защиты окружающей среды / Под ред. С. Ринальди. – К.: Высшая школа, 1981. – 264 с.
19. L. von Bertalanffy, General System Theory - A Critical Review, «General Systems». – Vol. VII. – 1962. – P. – 1–20.
20. Quad E.S. "Analysis For Military Decisions"/ - RAND Mc NALLY & COMPANY — CHICAGO, 1969. – 520 p.
21. Капица С. П. Синергетика и прогноз будущего / С. П. Капица, С. П. Курдюмов, Г. Г. Малинацкий. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 288 с.
22. Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного анализа/ А. А. Колесников – КомКнига, 2006. – 240 с.
23. Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем / А. И. Уемов. – М.: Мысль, 1979. – 272 с.
24. Кацман М. Д. Аналіз рекомендованих дій підрозділів залізниці у разі витоків, розливів та розсіпів небезпечних вантажів при їх перевезенні залізничним транспортом / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, М. І. Адаменко, М. М. Горбаха // Зб. наук. праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства інфраструктури України: Серія «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2012. – Вип.21. – С.152–159.
25. 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. Харків, 2012. – Вип. 5(103). – С.158–164.
26. Моисеев Н. А. Математические задачи системного анализа / Н. А. Моисеев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.
27. Joseph O'Connor, Ian McDermott. The Art of Systems Thinking: Essential Skills for Creativity and Problem Solving. – Thorsons. – 1997. – 265 p.
28. Ларичев О. Н. Объективные модели и субъективные решения / О. Н. Ларичев. – М. : Наука, 1987. – 142 с.

29. Качала В. В. Основы теории сложных систем и системного анализа : уч.пособие для вузов / В. В. Качала. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 216 с.
30. Антонов А. В. Системный анализ / А. В. Антонов. – М. : Высшая школа, 2004. – 456 с.
31. Волкова В. Н. Теория систем : учебник для студентов вузов / В. Н. Волкова, А. А. Денисов. – М. : Высшая школа, 2006. – 311 с.
32. Денисов А. А. Современные проблемы системного анализа: Информационные основы : уч.пособие / А. А. Денисов. – СПб : Из-во СПб ГТУ, 2005. – 295 с.
33. Kalman R. Essays on the mathematical theory of systems / R. Kalman, P. Falb, M. Arbib. – М. : Editorial URSS, 2004. – 400 p.
34. Новосельцев В. И. Системный анализ: современные концепции (издание второе, исправленное и дополненное) / В. И. Новосельцев. – Воронеж : Из-во «Кварта», 2003. – 360 с.
35. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки : постанова Кабінету Міністрів України від 16.12.2009 № 1390 // Офіційний вісник України. – 2009. – № 101. – ст. 3523. URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/card/1390-2009-п>.
36. Дружини В. В. Проблемы системологии (проблемы теории сложных систем) / В. В. Дружинин, Д. С. Конторов. – М. : Сов.радио, 1976. – 296 с.
37. Mesarović M. Theory of Hierarchical Multilevel Systems / M. Mesarović, D. Мако, Y. Takahara. – New York : Academic, 1970. – 294 p.
38. Прангишвили И. В. Системный подход и общесистемные закономерности / И. В. Прангишвили. – М. : СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
39. Сурмин Ю. П. Теория систем и системный анализ : уч.пособие / Ю. П. Сурмин. – К. : МАУП, 2003. – 368 с.
40. Hall, A. D., A Methodology for Systems Engineering, D. Van Nostrand Company Inc., Princeton, NJ, 1962. – 488 p.
41. Горстко А.Б. Модели управления эколого-экономическими системами/ А.Б.Горстко, Ю.А.Домбровский, Ф.А.Сурков. – М.: Наука.1984. – 199 с.

42. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа (синергетика: от прошлого к будущему) / Н. Н. Моисеев. – М. : УРСС, 2012. – 488 с.
43. Haken H. Information and Self-Organization: A Macroscopic Approach to Complex System, Germany, Springer, 2000. – 232 p.
44. Словник української мови в 11 томах (Академічний тлумачний словник української мови) – Том 9. – 1979. – С. 846.
45. Системный анализ и принятие решений. Словарь-справочник : уч.пособие для вузов / Под ред. В. Н. Волковой, В. Н. Козлова. – М.: Высшая школа, 2004. – 616 с.
46. Веревкин А. П. Теория систем / А. П. Веревкин, О. В. Кирюшин. – К. : УГНТУ, 2003. – 100 с.
47. Зеленько Ю.В. Сучасні принципи управління станом навколишнього середовища в процесах транспортування та використання нафтопродуктів на залізничному транспорті/ Ю.В.Зеленько, С.В. Бойченко, Ю.В.Білокопитов, А.Л. Лещинська. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-printsipy-upravleniya-sostoyaniem-okruzhayushey-sredy-v-protsessah-transportirovki-i-ispolzovaniya-nefteproduktov-na>.
48. Дружинин В. В. Системотехника / В. В. Дружинин, Д. С. Конторов. – М.: Радио и связь, 1993. – 223 с.
49. Мироненко В. К. Науково-методичні підходи до оцінки безпечності системи залізничних перевезень пасажирів і вантажів / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, О. Г. Родкевич // Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті: II Міжнародна науково-практична конференція, 20–22 вересня 2011р.: тези доп. – Київ, 2011. – С. 120–122.
50. Кацман М. Д. Раціоналізація застосування пожежних поїздів для підвищення транспортної безпеки на залізницях / М. Д. Кацман, В. П. Лапін, О. Г. Родкевич // Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології: V Міжнародна науково-практична конференція. – Сер. «Техніка, технологія», 15–16 березня 2011 р.: тези доп. – Київ, 2011. – С.178–179.

51. Положення про систему управління безпекою руху поїздів у Державній адміністрації залізничного транспорту України : наказ Міністерства інфраструктури України від 01.04.2011 № 27 // Офіційний вісник України. – 2011. – № 48. – ст. 1972. URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/zd729-11>.

52. Справочник по инженерной психологии/ Под ред. Б.Ф.Ломова. – М.Машиностроение, 1982. – 368 с.

53. Henly E.L., Kumamoto H. Reliability engineering and risk assessment. – New York (USA) : PrenticeHall, 1985. – 375 p.

54. Беляев Ю. К. Надежность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.

55. Юхимчук С. В. Модели автоматизації вироблення рекомендацій керівнику гасіння пожежі на залізничному транспорті.: монографія / С. В. Юхимчук, М. Д. Кацман. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2008. 144 с.

56. М. Д. Кацман. Деякі питання організації ліквідації надзвичайних ситуацій з небезпечними вантажами/ М. Д. Кацман //Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті: IV Міжнародна науково-практична конференція, 23–25 вересня 2014 р. тези доп. – Одеса, 2014. – С 124–129.

57. Правила безпеки та порядок ліквідації наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами при перевезенні їх залізничним транспортом : наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 25.11.2008 № 1431. Дніпропетровськ: ТОВ «НВП Поліграфсервіс», 2009. – 753 с.

58. Тюленева В. А. К вопросу исследования фильтрации нефти в почвах / В. А. Тюленева, В. А., Солякин, И. В., Васькина В. С., Шалугин // Вісник КДПУ. – Випуск 2(37). – Ч. 2. Кременчук, 2006. – С. 110–112.

59. Сорока М. Л., Технология ликвидации разливов нефтепродуктов с превентивным накоплением сорбентов в зоне образования и локализации разлива / М. Л. Сорока, Л. А. Ярышкина URL: <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1284881>.

60. Кацман М. Д. 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.

61. Зеркалов Д. В. Наукові основи техногенно-екологічної безпеки : монографія [Електроний ресурс]. Д. В. Зеркалов, М. Д. Кацман, М. Д. Адаменко, О. Г. Родкевич, Т. В. Пічкур/ За ред. Д. В. Зеркалова. – К.: «Основа», 2014 – 372 с.

62. Кацман М.Д., Підхід до створення математичних моделей оцінювання ризиків при перевезенні залізницями небезпечних вантажів/ М.Д. Кацман, В.В. Маліцький // Матеріали другої міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в навігації і управлінні: стан та перспективи розвитку: II міжнародна науково-практична конференція, 8 – 9 червня 2011 р.: – тези доп. Київ, 2011. – С. 33.

63. Сокол Э. Н. Крушение железнодорожных поездов (Судебная экспертиза, теории и практика) : монография / Э. Н. Сокол. – К. : «Феникс», 2009. – 376 с.

64. Замышляев А.М. Прикладные информационные системы управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте/ А. М. Замышляев. – Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2013. – 143 с.

65. Мироненко В. К. Фактори оптимізації системи перевезень небезпечних вантажів / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, О. Г. Родкевич // Вагоний парк. – 2011. № 8. – С.39–41.

66. Кацман М. Д. Розробка моделі управління гасінням пожеж та реагуванням на аварійну ситуацію на залізничному транспорті / М. Д. Кацман // Проблеми інформатики і моделювання: IX міжнародна науково-технічна конференція, 26–28 листопада 2009 р. : тези доп. – Харків, 2009. – С. 68.

67. Кацман М. Д. Ліквідація аварій, пов'язаних з вибухово-пожежною небезпекою на об'єктах Укрзалізниці / М. Д. Кацман // Системи обробки інформації. – Харків. – 2006. – Вип. 4(53). С.219–220.

68. Кацман М. Д. Оцінювання і прогнозування надзвичайних ситуацій на транспорті / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, О. Г. Родкевич, О. Г. Стрелко //



Безпека життєдіяльності людини як умова сталого розвитку сучасного суспільства : IV Міжнародна науково-практична конференція, 8–9 червня 2011р. тези доп. – Київ, 2011. – С. 300–302.

69. Рекомендації щодо вживання термінів та визначень з безпеки руху поїздів: наказ Міністерства транспорту України від 03.06.2004 № 464. – Мінтранс України, 2004. – 200 с.

70. 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. Харків. – 2015. – Вип. 1(41). – С.168–172.

71. Бабков В.С. Анализ математических моделей распространения примесей от точечных источников / В.С. Бабков, Т.Ю. Ткаченко // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика, обчислювальна техніка». Вип. 13(185) – 2011. – С. 147 –155.

72. Белихов А.Б. Современные компьютерные модели распространения загрязняющих веществ в атмосфере /А.Б. Белихов, Д.Л. Лесотин, А.К. Сухов // Вестник Костромского государственного университета им. Н.А.Некрасова. – Кострома – 2013 - № 1. – С.14 –19.

73. Замай С.С. Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохоронных служб крупного города / С.С. Замай, О.Э. Якубайлик. Уч. пособ. // Красноярск. гос. ун., 1998. – 104с.

74. Techniques and decision making in the assessment off-site consequences of an accident in a nuclear facility/ Safety series, №86, International Atomic Energy Agency. Vienna, 1987, 185p.

75. Zannetti P. Numerical simulation modelling of air pollution: an overview/ Air pollution. Southampton, Computations Mechanics publications, 1993, pp.3 –14.

76. Шило Ар. С. Сравнительный анализ программных средств исследования загрязнения атмосферы составляющими дымовых газов/ Ар.С. Шило, Ан.С. Шило. URL: [http://nf3hg5dfnu.nnygsltvme.nblz.ru/ua/shylo\\_ecolog/](http://nf3hg5dfnu.nnygsltvme.nblz.ru/ua/shylo_ecolog/).

77. Шаталов А.А. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеивания тяжелого газа/ А.А.Шаталов, М.В.Лисанов, А.С. Печеркин А.В., А.В.Пчельников, С.И. Сумской// Вопросы безопасности в промышленности 2004, с.46-52. URL: [http://ojuxg23qojxw\\_2ltsou.nblz.ru/\\_ld/0/39\\_VTP\\_2004\\_9\\_toxi.pdf](http://ojuxg23qojxw_2ltsou.nblz.ru/_ld/0/39_VTP_2004_9_toxi.pdf).

78. Official CALPUFF Modeling System. URL: <http://o53xo.onzggldn5wq.nblz.ru/>

79. ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres). 5.4.4 URL: <http://Os.mrxwgz3pfzxezy.nblz.ru/aloha-tech-doc>.

80. Зеленко Ю.В. Розробки принципів і методів оцінки екологічних ризиків виникнення надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті/ Ю.В.Зеленко, А.Л. Лешинська, С.В. Бойченко. URL: <http://cyberlinika.ru/article/n/tkologichiskie-aspekty-na-trnsporte>.

81. Плахотник В.М. Ліквідація наслідків аварій під час перевезення основних екологічно небезпечних вантажів по залізницях України/ В.М. Плахотнік, Л.О. Яришкіна. URL: [ukrdok.com.ua/text/45595/index4.html](http://ukrdok.com.ua/text/45595/index4.html).

82. Забезпечення вдосконалення профілактичних заходів під час перевезень небезпечних вантажів / І.Я.Переста, Л.О. Яришкіна, С.І.Музикіна, Ю.В.Зеленько. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/zabezpechennya-vdoskonalennya-profilaktichnih-zahodiv-pid-chas-perevezen-nebezpechnih-vantazhiv>.

83. Макарова Е.И. Научные основы защиты окружающей среды при ликвидации, обезвреживании и блокировании загрязнений железнодорожного транспорта: автореферат на соискание научной степени доктора технических наук: спец. 03.02.08 - Экология (по отраслям)/ Макарова Елена Игоревна: Ростовский государственный университет путей сообщения – Ростов-на-Дону, 2007. – 42 с.

84. Мартынюк И.В. Повышение безопасности железнодорожных перевозок опасных грузов с учетом взаимодействия с другими видами транспорта и окружающей средой : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.22.01 – транспортные и транспортно-технологические системы страны и её регионов и городов, организация производства на транспорте

(технические науки)/ Мартынюк Игорь Владимирович: Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2007. – 28 с.

85. Попов В.Г. Оценка риска от аварийных происшествий/ В.Г.Попов, Ф.И.Сухов, С.В. Петров. URL: <http://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/785/1134>

86. Гапанович В.А. Основные направления развития интеллектуального железнодорожного транспорта / В.А. Гапанович, И.Н. Розенберг. URL: [http://www.zdt-magazine.ru/publik/pravlenie/2011/05-11/05-11\\_2.htm](http://www.zdt-magazine.ru/publik/pravlenie/2011/05-11/05-11_2.htm).

87. Косенко Є.Я. Удосконалення реагування на аварійні ситуації при перевезенні небезпечних вантажів / Є.Я. Косенко, С.В. Кухлівський, Б.М. Бондаренко, І.І. Подзігун. Дніпропетровськ: Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В.Лазаряна – вип. 2(44), 2013. – С.28–34.

88. Медведев В.И. Методы управления безопасностью перевозочного процесса опасных грузов и пути повышения экологической безопасности на железнодорожном транспорте: автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук: спец. 05.22.08 – управление процессами перевозок/ Медведев Владимир Ильич: Сибирский государственный университет путей сообщения. – Новосибирск, 2001. – 40 с.

89. Бутько Т.В. Інтелектуальні аспекти формування системи підтримки рішень оперативного персоналу прикордонних станцій / Т.В.Бутько, Г.С.Бауліна// Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – № 2, 2003. – С.8–12.

90. Лаврухін О.В. Розробка моделі системи підтримки прийняття рішень на залізничному транспорті/ О.В. Лаврухін. URL: [stp.diit.edu.ua/article/download/18671/16412](http://stp.diit.edu.ua/article/download/18671/16412).

91. Цуриков А.Н. Интеллектуальная советующая система управления ликвидацией последствий чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте/ А.Н. Цуриков // Бюллетень Объединённого ученого совета ОАО «РЖД». Москва, 2013. – № 3. – С.70–76.

92. Акимов В.А. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах/ В.А. Акимов, В.В.Лесных, Н.Н. Радаев -Учебное пособие. – Москва.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.

93. Моисеенкова Д.А. Задача принятия управленческих решений на железнодорожном транспорте/ Д.А.Моисеенкова. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/zadacha-prinyatiya-upravlencheskih-resheniy-na-zheleznodorozhnom-transporte>.

94. Годяев А.И. Методологические основы и принципы построения системы поддержки принятия решений в задачах обеспечения безопасности управления движением на железнодорожном транспорте: автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук: спец: 05.22.08 – управление процессами перевозок/ Годяев Александр Иванович: Московский государственный университет путей сообщения. – Москва, 2010. – 40 с.

95. Правила перевезення небезпечних вантажів : наказ Міністерства транспорту та зв'язку України від 05.11.2009 № 1135. – К.: Міністерства транспорту та зв'язку України, 2009. – 672 с.

96. Вантажі небезпечні. Класифікація: ДСТУ 45-3:2008. – [Чинний від 2008-04.08]. – К.: Держспоживстандарт України, 2008. – 76 с.

97. Правила перевозок опасных грузов к Соглашению о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС). Приложение 2. Изд. в 2-х томах. К.: Укрзалізниця, 2006. – Т.1 – 576 с.

98. Посібник до регламенту про міжнародні залізничні перевезення небезпечних вантажів (RID) / Л. М. Тригуб. К.: Укрзалізниця. 2006. – 238 с.

99. Правила перевезень вантажів залізничним транспортом України. Ч.1 / С. П. Алєнічев, В. Р. Івашук, Л. П. Шевченко, М. В. Мартинов, Г. С. Мозяж, В. І. Ходаківський, Л. П. Ярош / під кер. Мостового М. В.: наказ Міністерства транспорту України від 09.12.2002 № 873. – К.: ТОВ «Видавничий дім» САМ, 2004. – 432 с.

100. Правила перевезень вантажів залізничним транспортом України. Ч.2 / В. І. Ходаківський, Л. М. Тригуб, Г. С. Мозяж / під кер. Мостового М. В. : наказ

Міністерства транспорту України від 18.04.2003 № 299. – К.: ТОВ «Видавничий дім» САМ, 2004. – 218 с.

101. Кацман М. Д. Інформаційно-комп'ютерні технології автоматизації роботи керівників ліквідації аварій за участю небезпечних вантажів / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, О. Г. Родкевич // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 6. – С. 50–53.

102. Кацман М. Вероятностная модель определения эффективности действий по локализации экологических последствий транспортных событий / М. Кацман, С. Мирошниченко // RIADENIE BEZPEČNOSTI ZLOŽITÝCH SYSTÉMOV: Zborník vedeckých a odborných prác Medzinárodná vedecko-odborná konferencia, 24–28.02.2014 r.: abstrakty, Liptovský Mikuláš, Slovakia 2014. – С.265–272.

103. Кацман М. Д. Экологически негативное влияние железнодорожных аварий с опасными грузами / М. Д. Кацман, Н. И. Адаменко, Ю. А. Кулиш, А. С. Испулатова // Вестник Кокшетауского технического института Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. – № 1(13). – Кокшетау.: КТИ МЧС РК. – 2014. – С. 10–18.

104. Юхимчук С. В. Продукційні моделі оцінювання можливого розвитку аварії на залізничному транспорті при перевезенні радіоактивних речовин / С. В. Юхимчук, М. Д. Кацман, А. В. Вознюк // Весник Херсонського НТУ, 2009. – № 1(34). – С. 438–440.

105. Кацман М. Д. Математична модель визначення ймовірностей можливих екологічних наслідків залізничних аварій/ М. Д Кацман . // Зб. наук. праць ХУПС. Харків. – 2013. – Вип. 1(34). – С. 182–185.

106. Юхимчук С. В. Використання інтелектуальних технологій для аналізу надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті/ С. В. Юхимчук, Т. О. Савчук, М. Д Кацман // Системні дослідження та інформаційні технології. НТУУ «КПІ», м. Київ, 2009. – № 4. – С. 53–61.

107. Основи цивільного захисту / О. В. Бикова, О. Ч. Болієв, Д. М. Деревинський, В. Н. Єлісеєв, С. М. Миронець, С. І. Осипенко, Ю. О. Півень, В. І. Плетньов, Л. В. Попов, І. П. Соколовський; за заг. ред. М. В. Болотських. – К.:

МНС України, Ун-тет цивільного захисту України, Ін-тут держ. упр. у сфері цивільного захисту, 2008. – 223 с.

108. Katsman M., Mathematical models of decision support system for the head of the fire-fighting department on railways/M. Katsman, O. Kryvopishyn, V. Lapin. – San Diego, USA. – Reliability: theory & applications. – Vol. 2.№ 03(22). –2011. – P. 86–93.

109. Katsman M. D. Problematic 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.

110. Кацман М. Д. Математичні моделі розвитку та ліквідації залізничних аварій з небезпечними вантажами / М. Д. Кацман // Безопасность жизнедеятельности. Экологические и здоровье сохраняющие технологии: I Українська наукова конференція, 15,16 березня 2013 р.: тези доп. – Харків, 2013. – С. 10–11.

111. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды/ Ю.А. Израэль– М.Гидрометеиздат. 1984. – 560 с.

112. Основи цивільного захисту : Навч.посібник / В. О. Васійчук, В. Є. Гончарук, С. І. Качан, С. М. Мохняк. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 417 с.

113. Моделювання і прогнозування стану довкілля: підручник / В. І. Лаврик, В. М. Боголюбов, Л. М. Полетаєва та ін. К.: ВЦ «Академія», 2010. – 400 с.

114. Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. НАПБ Б.03.002-2007 : наказ Міністерства надзвичайних ситуацій України від 03.12.2007 № 833.

115. Берланд М. Е. Прогнозирование и регулирование загрязнения атмосферы/ М. Е. Берланд Ленинград: Гидрометеоиздат, 1985. – 272 с.

116. Адаменко М. І. Інформаційне та технічне забезпечення екологічної безпеки критично небезпечних промислових об'єктів : автореферат на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: спец. 21.06.01 «Екологічна безпека»/ Адаменко Микола Ігорович, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків, 2011. – 38 с.

117. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н. В. Варгафтик, Л. П. Филлипов, А. А. Турзиманов, Е. Е. Тоцкий. М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
118. Баратов А. Н. Пожарная безопасность / А. Н. Баратов, В. А. Пчелинцев. – М.: Изд-во АСВ, 1997. – 176 с.
119. Williams F.A. Combustion Theory. Second Edition. Westview Press, 1985. – 704 p.
120. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность : справочное издание / А. Н. Баратов, Е. Н. Иванов, А. Я. Корольченко и др. – М.: Химия, 1987. – 272 с.
121. Spalding D. V. Some Fundamentals of Combustion. Butterworth's, London, 1955. – 320 p.
122. Щетинков Е. С. Физика горения газов/ Е. С. Щетинков. М.: Наука, 1965. – 739 с.
123. Wong H. Y. Handbook of essential formulae and data on heat transfer for engineers: Longman London New York, 1977. – 216 с.
124. Семенов Н. Н. Цепные реакции/ Н. Н. Семенов. М.: Наука, 1986. – 534 с.
125. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике/ Д. А. Франк-Каменецкий . 2-е изд., доп. и перераб. М.: Наука, 1967. – 491 с.
126. Зельдович Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. Н. Баренблат, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. М.: Наука, 1980. – 478 с.
127. Блинов В. И. Диффузное горение жидкостей / В. И. Блинов, Г. Н. Худяков. М.: Из-во АН СССР, 1961. – 208 с.
128. Монахов В. Т. Методы исследования пожарной опасности веществ/ В. Т. Монахов. М.: Химия, 1972. – 416 с.
129. Baker W. A. Explosion Hazards and evaluation // W. A. Baker, P. A. Cox, P. S. Westine, [J. J. Kulesz](#), [R. A. Strehlow](#) / Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam, Oxford, New York, 1983. – Vol. 1. – 319 p.

130. Тодес О. М. Радиационный механизм формирования и развития фронта пламени в аэродисперсных системах / О. М. Тодес, А. Д. Гольцикер, С. А. Чивилихин. Докл. АН СССР, 1973. – Т. 213. – № 2. – С. 321–324.
131. Крапивин В. Ф. Математическое моделирование глобальных биосферных процессов / В. Ф. Крапивин, Ю. М. Свиричев, А. М. Тарко. М.: Наука, 1982. – 272 с.
132. Вентцель Е. С. Прикладные задачи теории вероятностей / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. М.: Радио и связь, 1983. – 418 с.
133. Ларичев О. И. Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений / О. И. Ларичев, Е. М. Мошкович. М.: Мир, 1996. – 208 с.
134. Орлов А. И. Теория принятия решений/ А. И. Орлов : уч. пособие. М.: Из-во «Март», 2004. – 656 с.
135. Ralph L. Keeney, Howard Raifa. Decision With Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. With contribution by Richard Meyer Jonh Wiley&Sons. New York, 1979. – 560 p.
136. [Saaty](#) T. L. The Analytic Hierarchy Process, Planning, Piority Setting, Resource Allocation. McGraw-Hill, New York, 1980. – 278 p.
137. Fishburne P. Utility theory for decision making. John Wiley&Sons, inc. New York, London, Sydney, Toronto, 1970. –352 p.
138. Ус С. А. Методи прийняття рішень/ С. А. Ус : навч.посібник. Д.: Національний гірничий університет, 2012. – 212 с.
139. Raiffa H., Schlaifer R. Applied statistical decision theory, Harvard University Press, Boston (MA), 1961. – 395 p.
140. Muschik E., Müller P. Entscheidungspraxis Ziele verfahren Konsequenzen VEB Verlag Technik, Berlin, 1987. – 208 s.
141. Грешилов А. А. Математические методы принятия решений/ А. А. Грешилов. учеб.пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 584 с.
142. Neumann J., Morgenstern O. Theory of games and economic behavior. Princeton University Press, 1953. – 703 p.



143. Бельская Е.Н. Методика расчета экологических рисков/ Е.Н. Бельская, О.В. Бразговка., Е.В. Сугак. [URL:http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15755](http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15755).
144. Методика определения рисков и их приемлемых уровней для декларирования безопасности объектов повышенной опасности. Приказ Министерства труда и социальной политики Украины от 04.12.2002 г. № 637. URL: <http://www.dnaop.com/article/187>
145. Методика оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру [URL:http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-п](http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-п).
146. Юхимчук С. В. Людино-машинний алгоритм СППР керівника гасіння пожежі в рухомому складі залізничного транспорту / С. В. Юхимчук, В. П. Лапін, М. Д. Кацман: Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології» (17-19 травня., Чернівці). 2006. С. 73–74.
147. Юхимчук С. В. Структура програмного забезпечення для прийняття рішень щодо ліквідації пожежі в рухомому складі залізничного транспорту / С. В. Юхимчук, В. О. Леонтєв, М. Д. Кацман, Ю. В. Поремський, В. О. Гричина // Вестник Херсонского национального технического университета. Херсон: 2006. – № 2(25). – С. 532–536.
148. Кацман М. Д. Напрямок автоматизації процесу оцінки обстановки при аваріях за участю деяких небезпечних вантажів / М. Д. Кацман, В. П. Лапін, І. І. Слуговін : науково-практична конференція «Актуальні проблеми пожежної автоматики» (15,16 березня м. Харків). Харків: АІДЗУ, 2006. – С.41–43.
149. Пожежна тактика : підручник / П. П. Ключ, В. Г. Палюх, А. С. Пустовой, Ю. М. Сенчихін, В. В. Сиrowsий. Х.: Основа, 1998. – 592 с.
150. Повзик Я. С. Пожарная тактика : учебник для пож.-тех.училищ / Я. С. Повзик, П. П. Ключ, А. И. Матвейкин. М.: Стройиздат, 1990. – 335 с.

151. Рекомендації з гасіння пожеж на об'єктах та на рухомому складі залізничного транспорту : наказ Укрзалізниці від 24.05.2005 № 133-Ц. К.: Укрзалізниця, 2005. – 174 с.

152. Кацман М. Д. Інформаційна модель ідентифікації екологічно небезпечних надзвичайних ситуацій / М. Д. Кацман, О. Г. Родкевич // Зб. наук. праць ХУПС. Харків. – 2015. – Вип. 1(42). – С.126–131.

153. Великодний В. В. Розширення функціональних можливостей АСК ВП Укрзалізниці / В. В. Великодний, М. Д. Кацман, О. І. Коліков, С. В. Юхимчук// Залізничний транспорт України. – 2009. – № 1. – С. 21–23.

154. Кацман М. Д. Деякі проблеми створення СППР керівника оперативної групи з ліквідації екологічно небезпечних залізничних транспортних подій / М. Д. Кацман // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління : V міжнародна науково-технічна конференція, 23,24 квітня 2015 р. тези доп. – Полтава, 2015. – С. 52.

155. Кацман М. Д. Інформаційна підтримка організації цивільного захисту на об'єктах Укрзалізниці / М. Д. Кацман // Проблеми автоматизації: V міжнародна науково-технічна конференція, 12–13 листопада 2015 р. тези доп. – Полтава, 2015. – С. 63.

156. Кацман М. Д. Математичні моделі екологічно небезпечних транспортних подій / М. Д. Кацман, В. К. Мироненко, В. І. Мацюк // Системи обробки інформації. Харків. – 2015. – Вип. 3(128). – С.125–131.

157. Katsman M. D., Myronenko V. K., Matsiuk V. I. Mathematical models of ecologically hazardous rail. Trafficaccidents / M. D. Katsman, V. K., Myronenko, V. I. Matsiuk // Reliability: theory&applications. – Vol. 10, № 1(36). – San Diego, USA – 2015. – P. 28–39.

158. Мироненко В. К. Підвищення ефективності бойового застосування підрозділів ліквідації наслідків надзвичайної ситуації при залізничних перевезеннях небезпечних вантажів з урахуванням екологічного аспекту / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, В. І. Мацюк // Системи озброєння і військова техніка. Харків. – 2015. – Вип.2(42). – С.168–72.

159. Мироненко В. К. Математична модель станів та надійності залізничної транспортної системи при перевезенні небезпечних вантажів / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, М. М. Горбаха, В. І. Мацюк // Системи обробки інформації. Харків. – 2015. – Вип. 9(134). – С.161–167.

160. Правила технічної експлуатації залізниць України : наказ Міністерства транспорту України від 20.12.1996. – № 411. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97>.

161. Інструкція з руху поїздів і маневрової роботи на залізницях України. ЦД-0058 : наказ Міністерства транспорту України від 31.08.2005 № 507. – К.: Міністерства транспорту та зв'язку України, 2005. – 162 с.

162. Інструкція з сигналізації на залізницях України. ЦШ-0001. К.: Міністерства транспорту та зв'язку України, 2008. – 159 с.

163. Методичні рекомендації щодо визначення нормативів часу на проведення аварійно-відновлювальних робіт з використанням основних технічних засобів відбудовних поїздів залізниць України : наказ Укрзалізниці від 17.12.2008 № 548-Ц / В.Г. Пузир, В.С.Крот, О.І. Панасенко, С.Я. Ребриков – К.: Укрзалізниця, 2009. – 148 с.

164. Інструкція з організації відбудовних робіт при ліквідації наслідків транспортних подій на залізницях України : наказ Міністерства транспорту України від 27.04.2001 № 258. – К.: МТУ, 2001. – 23 с.

165. Інструкція про порядок відбудови пошкодженої контактної мережі електрифікованих залізниць: наказ Укрзалізниці від 14.03.2013 № 071-Цод. – К.: Укрзалізниця, 2013. – 41 с.

166. Інструкція з забезпечення безпеки руху поїздів при виконанні колійних робіт на залізницях України. ВНД УЗ 32.6.03.004-2012 ЦП / А. П. Татуревич, О. В. Губар, О. А. Верхняцький, М. І. Уманов, В. С. Андреев / Керівник розробки Рибкін В.В. – К.: Укрзалізниця, 2012. – 37 с.

167. Рекомендації з гасіння пожеж на об'єктах та рухомому складі залізничного транспорту. ЦУО-0026. – К.: Укрзалізниця, 2005. – 175 с.

168. Інструкція з забезпечення безпеки руху поїздів при виконанні колійних робіт. – Дніпропетровськ: АТЗТ ВКФ «Арт-прес», 2001. – 132 с.
169. Шитов В. М. Восстановительные работы на железнодорожном транспорте / В. М. Шитов, Н. А. Шелобытко. – М.: Транспорт, 1993. – 167 с.
170. Правила і технологія виконання робіт по поточному утриманню залізничної колії. – К.: Транспорт України, 2002. – 156 с.
171. Положення про ремонтно-відбудовні летючки зв'язку на залізничному транспорті України : наказ Укрзалізниці від 09.06.1997. – № 23-ЦЗ. – 36 с.
172. Родкевич О. Г. Закономірності використання факторів ефективності системи перевезення небезпечних вантажів : автореферат дис. на здобуття наукового ступеня кандидат технічних наук: спец. 05.22.01 «Транспортні системи» / Родкевич Оксана Григорівна: Державний економіко-технологічний університет транспорту. – Київ, 2013. – 27 с.
173. Мироненко В. К. Перспективи використання безпілотних літальних апаратів у ліквідації наслідків залізничних транспортних подій / В. К. Мироненко, П. В. Лапін, М. Д. Кацман // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 4. – С. 43–48.
174. Положення про відновний поїзд залізниць України. ЦРБ-0035. К.: Укрзалізниця, 2012. – 107 с.
175. Положення про пожежні поїзди на залізницях України. ЦУО-0030, НАПБ 02.13-2006. К.: Укрзалізниця, 2006. – 31 с.
176. Гержод Ю. В. Модернізація пожежних поїздів на залізницях країни / Ю. В. Гержод, М. М. Горбаха, В. М. Дидківський, М. Д. Кацман. // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 3/4. – С. 14-16.
177. Кацман М. Д. Підвищення ефективності бойового застосування пожежних поїздів / М. Д. Кацман, В. П. Лапін, В. К. Мироненко, О. Г. Родкевич, О. Г. Стрелко // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 1. – С. 39–41.
178. Кацман М. Д. Застосування пожежних поїздів для ліквідації транспортних подій з небезпечними вантажами/ М. Д. Кацман // Науковий вісник

НЛТУ України: зб. наук.-техніч. праць. – Л.: РВВ НЛТУ України. – 2012.12 – Вип. 22. – С. 96-101.

179. Кацман М. Д. Використання математичних моделей для оптимізації чисельності пожежних поїздів/ М. Д. Кацман// Маркетинг і логістика в системах менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті: III Міжнародна науково-практична конференція, 18-20 вересня 2012 р. : тези доп. – Харків, 2012. – С. 122–127.

180. Великодний В. В. Система підтримки прийняття рішень керівником при гасінні пожежі в рухомому складі / В. В. Великодний, Ю. Ф. Потетюєв, О. М. Головченко, С. В. Юхимчук, І. Ф. Зіненко, М. Д. Кацман // Залізничний транспорт України, 2002. – № 3. – С. 34–35.

181. Потетюєв Ю. Ф. Необхідність розробки автоматизованої системи підтримки прийняття рішень керівників ліквідації аварійних ситуацій на залізничному транспорті / Ю. Ф. Потетюєв, І. Ф. Зіненко, М. Д. Кацман, С. В.: Юхимчук// VII Міжнародна науково-практична конференція «Наука і освіта 2004» (Дніпропетровськ, 5,6 вересня 2004) – С. 65–68.

182. Юхимчук С. В. Функціональні можливості системи підтримки прийняття рішень керівником гасіння пожежі в рухомому складі залізничного транспорту/ С. В. Юхимчук, Ю. Ф. Потетюєв, С. Ю. Потетюєв, Ю. В. Поремський, М. Д. Кацман// зб. наук. праць Міжнародної наукової конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій» (Херсон, 6,7 червня 2005). – Херсон: Видавництво Херсонського морського інституту, 2005. – Том 2. – С. 163–164.

183. Кацман М. Д. Необхідність розробки системи підтримки прийняття рішень керівника локалізації екологічно небезпечних залізничних надзвичайних ситуацій / М. Д. Кацман// Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур: VI всеукраїнській науковий семінар, 23-25 вересня 2014 р.: тези доп. – Харків, 2014. – С. 11.

184. Кацман М. Д. Використання залізничних формувань у медичному забезпеченні військ та населення в історичному та сучасному аспектах / М. Д.

Кацман, П. В. Лапін, О. Г. Родкевич, О. А. Горецкий : зб. наук. праць ДЕГУТ Серія «Транспортні системи і технології». – Київ, 2014. – Вип. 24. – С. 208-213.

185. Депутат О. П. Цивільна оборона : підручник / О. П. Депутат, У. В. Коваленко, І. С. Мужик; за ред. В. С. Франчука, 2-е вид. доп. – Львів: Афіша, 2001. – 336 с.

186. Хімічні та біологічні фактори небезпек. URL: <http://dppc.ru/data/attachments/library/lekcija-07-himichni-ta-biologichni-factory-nebezpek-26163.pdf>

187. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (с изменениями и дополнениями). М.: Госгортехнадзор, 2001. – 35 с.

188. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. – 76 с.

189. Юхимчук С. В. Система підтримки прийняття рішень керівників ліквідації аварії і пожежі небезпечних вантажів / С. В. Юхимчук, М. Д. Кацман //Автоматизация: проблемы, идеи, решения: международная научно-техническая конференция, 10-15 сентября 2007г. : тезисы доп.– Севастополь, 2007 г. – С.241–243.

190. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. Санкт-Петербург, 2000. – 16 с.

191. Методика оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру : постанова Кабінету Міністрів України від 15.02.2002 – № 175. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-п>.

192. Відомчі норми техногенного проектування «Визначення категорій приміщень та будівель підприємств залізничного транспорту за вибухопожежною та пожежною безпекою та переліку об'єктів, що підлягають обладнанню автоматичними установками пожежогасіння та пожежної сигналізації». НАПБ В.06.11-2012/510 : наказ Укрзалізниці від 23.02.12 № 061-Ц. К.: Укрзалізниця, 2012. – 154 с.

193. Мироненко В. К. Моделирование влияния времени локализации та ліквідації аварійного розливу нафтопродукту на характеристики зони забруднення верхньої будови залізничної колії / В. К. Мироненко, М. Д. Кацман, О. А. Горещкий // Стратегия качества в промышленности и образовании: XI международная конференция, 5–12 июня 2015 г. тезисы доп. – Варна, 2015. – С. 113–117.

194. Неронов А. А. Моделирование влияния времени локализации и ликвидации аварийного разлива нефти на характеристики зоны загрязнения. А. А. Неронов, И. А. Чуб // зб. наук. праць НУГЗУ. Харків: НУГЗУ, 2012. – Випуск 15. – С.98–103.

195. Неронов А. А. Анализ методик определения количественных характеристик аварийных разливов нефти на суше/ А. А. Неронов, И. А. Чуб // Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ, 2013. – Випуск 17. – С. 93–98.

196. Рятувальні роботи під час ліквідації надзвичайних ситуацій: посібник / В. Г. Аветисян, Ю. М. Сенчихін, С. В. Кулаков та ін. За ред. В.М. Пшеничного, Ч.1. – К.: Основа, 2006 – 240 с.

197. Ориентировочные значения коэффициентов фильтрации для разных грунтов/Основные механические свойства грунтов. URL: [http://old.sckompleks.ru/stroy\\_96.html](http://old.sckompleks.ru/stroy_96.html).

198. Берланд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнений в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

199. Бызова Н.Л., Гарнер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчет распространения примеси. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 368 с.

200. Moussiopoulos , N. Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models Copenhagen, European Environment Agency, 1996 Topic Report № 19.

201. Бицадзе А.В. Уравнение математической физики. – М.: Наука, 1976. – 296 с.

202. John H. Seinfeld. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. New York, John Wiley and Sons, 1986

203. Scire J.S., Strimaitis, D.G., Yamartino, R.J., 2000. A user's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5). USA, Concord: Earth Tech, Inc., 2000.

204. Ковалец И.В., Мадерич В.С., Железняк М.И., 2009. Моделирование атмосферного переноса продуктов горения желтого фосфора в результате железнодорожной аварии 16 июля 2007 г. возле с. Ожидов Львовской области // Зб. доп. V-ї дист. наук.-практ. конф. з міжнар. участю “Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. СППР’2009”, (Київ, 8 червня 2009). – К.: НАН України, Ін-т проблем математичних машин і систем, 2009. – С. 133–137

205. Халченков А.В., Ковалец И.В., 2012. Реализация и тестирование модуля атмосферного переноса в программе Ecolago // Зб. Наук. Пр. Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. – 2012. – №.65 – С.3-10

206. Kovalets I.V., Asker C., Khalchenkov A.V., Persson C., Lavrova T.V. (2017) Atmospheric dispersion of radon around uranium mill tailings of the former Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine // J. of Environmental Radioactivity, V.172, 173 –190, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.03.025>

207. Britter R. E.: 1989, Atmospheric dispersion of dense gases, Ann. Rev. Fluid Mech., 21, 317 –344.

208. Kovalets I.V., Maderich V.S., 2006. Numerical simulation of the interaction of the heavy gas cloud with the atmospheric surface layer. Environmental Fluid Mechanics, 6(4), 313 –340.

209. Запорожець О.І. Оцінювання наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами / О. І. Запорожець, І. В. Ковалець, М. Д. Кацман // Система управління, навігації та зв'язку. Зб. наук. праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Полтава, 2017. – № 6 (46). – С. 224-232.

210. Юхимчук С. В. Продукційні моделі для визначення небезпечних ситуацій в спеціалізованих комп'ютерних системах підтримки і прийняття рішень/ С.В. Юхимчук, Л.М. Захарченко, М.Д. Кацман // Вісник Хмельницького національного університету. Хмельницький: 2005. – № 4. – Ч. 1. – Т. 2(68). – С. 16–19.



211. Кацман М. Д. Продукційні моделі для вироблення рекомендацій щодо гасіння пожеж небезпечних вантажів у СППР керівників ліквідації надзвичайних ситуацій/ М. Д. Кацман // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. Вінниця:, 2005. – № 3. – С. 58–63.
212. Лефевр В. А. Алгебра конфликта/ В. А., Лефевр, Г. Л. Смолин// М.: Знание, 1968. – 50 с.
213. Лефевр В. А. Конфликтующие структуры/ В. А. Лефевр. Издание второе, перераб. и доп. Советское радио, 1973. – 92 с.
214. Исаев В. С. Методика оценки эффективности мероприятий по повышению устойчивости функционирования критически важных объектов и объектов жизнеобеспечения в условиях угроз террористического характера/ В. С. Исаев, Ю. Д. Макиев, В. П. Малышев, А. А. Таранов, В. Д. Камзолкин. URL: [CyberLeninka.ru/article/n/metodika-otsenki-effect](http://CyberLeninka.ru/article/n/metodika-otsenki-effect).
215. Вишняков Я. В. Основы противодействия терроризму: уч. пособие / Я. В. Вишняков, Г. А. Бондаренко, С. Г. Васин и др. Под ред. Я. В. Вишнякова. – М.: Академия, 2006. – 237 с.
216. Радаев Н. Оценка террористической угрозы для объекта/ Н. Радаев , А. Бочков. URL: [http://mx1.algorithm.org/arch/77/77\\_3.pdf](http://mx1.algorithm.org/arch/77/77_3.pdf).
217. Бобро Д. Загрози критичній інфраструктурі та оцінка її «критичності»/ Д.Бобро. URL: [http://www.niss.gov.ua/public/File/2015\\_table/0915\\_Bobro.pdf](http://www.niss.gov.ua/public/File/2015_table/0915_Bobro.pdf).
218. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. РД 03-418-01. URL: [http://www.ikcpte.ru/lib\\_files/npb/1/rd\\_03-418-01.doc](http://www.ikcpte.ru/lib_files/npb/1/rd_03-418-01.doc).
219. Юхимчук С. В. Модель прийняття рішень в СППР ліквідації надзвичайних ситуацій в умовах неповної визначеності/ С. В. Юхимчук, О. А Шаригін , М. Д. Кацман// Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології : міжнародна науково-практична конференція, 19 – 21 травня 2004 р.: тези доп. – Чернівці, 2004. – С. 27–28.
220. Кацман М. Д. Математичні моделі вироблення рекомендацій на ліквідацію аварій, що супроводжуються пожежами небезпечних вантажів/ М. Д.

Кацман: VIII Міжнародна конференція «Контроль і управління в складних системах (КУСС–2005)» (Вінниця 24–27 жовтня, Вінниця ) Вінниця, 2005. – С. 19.

221. Кацман М. Д. Необхідність застосування новітніх інформаційних технологій для організації ліквідації екологічних наслідків залізничних надзвичайних ситуацій/ М. Д. Кацман // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: четверта міжнародна науково-технічна конференція, 4–5 грудня 2014 р. тези доп. – Полтава, 2014. – С. 69.

222. Вентцель Е. С. Исследование операций/ Е. С. Вентцель. М.: Сов.радио, 1977. – 552 с.

223. Kleinrock L. Queneing system. V. I: Theory. A Willy Intercince Publications. Jhn Willy&Sons, New York, 1975. – 675 p.

224. Wagner G. The fundamentals of operations research. V. 3. Printice-Hall, 1969. – 504 p.

225. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерное приложение / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. М.: Наука, 1991. – 383 с.

226. Tomas L. Saaty. Elements of Queuing Theory With Application. Mc GRAW-Hill Book Company. Inc. New York, 1961. – 423 p.

227. Tomas L. Saaty, Kevin P. Kears Analytical The Organization of Systems Pergamon Press. Oxford, 1978. – 240 p.

228. Bertsekas D., Gallager R.. Data Networks. Prentict-Hall International, Ins., 1986. – 544 p.

229. Лецкий Э. К. Информационные технологии на железнодорожном транспорте : уч.пособие / Э. К. Лецкий, В. И. Панкратов, В. В. Яковлев и др.; под ред. Э. К., Яковлев, Э. С. Поддавашкина, В. В. Яковлева/ М.: УМК МПС РФ, 2001. – 668 с.

230. Новиков В.О. Прикладные вопросы теории массового обслуживания./ О.А. Новиков, С.Н. Петухов. – М.: Сов. Радио, 1969. – 328 с.

231. Гнеденко Б. В. Лекции по теории массового обслуживания / Б. В. Гнеденко, И. Н Коваленко. – М.: Наука, 1975. – 315с.

232. Денисов А. А. Теория больших систем управления/ А. А. Денисов, Д. Н. Колесников// Л.: Энергоиздат, 1982. – 288 с.
233. Крайников А. В. Вероятностные методы в вычислительной технике А. В. Крайников, Б. А. Кудрявцев// М.: Высшая школа, 1986. – 224 с.
234. Ушаков И. А. Вероятностные модели надежности информационно-вычислительных систем/ И. А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1991. – 132 с.
235. Шуенкин В. А. Прикладные модели теории массового обслуживания : уч.пособие/ В. А. Шуенкин, В. С. Домченко – К.: НКМ ВО, 1992. – 398 с.
236. Гнеденко Б. В. Введение в теорию массового обслуживания/ Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. – М.: Наука, гл.ред. физ.-мат.лит., 1991. – 384 с.
237. Лукин А. И. Системы массового обслуживания. Анализ систем массового обслуживания и военной практике/ А. И.Лукин . – М.: Воениздат, 1980. – 189 с.
238. Основы теории вычислительных систем / Под ред. Майорова С. А. – М.: Высшая школа, 1978. – 408 с.
239. Жерновий Ю. В. Марковські моделі масового обслуговування/ Ю. В. Жерновий : тексти лекцій. – Львів: Видавничій Центр ЛНУ ім. І. Франка, 2004. – 154 с.
240. Ивченко Г. И. Теория массового обслуживания : учебное пособие для вузов/ Г. И. Ивченко, В. А. Каштанов, И. Н. Коваленко – М.: Высшая школа, 1982. – 256 с.
241. Крылов В. В. Теория телетрафика и ее приложения/ В. В. Крылов, С. С. Самохвалов. – БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
242. Бочаров П. П. Теория массового обслуживания / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. – М.: Изд-во РУДН, 1995. – 529 с.
243. Боровков А. А. Вероятностные процессы в теории массового обслуживания/ А. А. Боровков. – М.: Наука, 1972. – 368 с.
244. Косоруков О. А. Исследование операций : уч. Пособие / О. А. Косоруков, А. В. Мищенко. – М.: Экзамен, 2003. – 326 с.

245. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей/ Б. В. Гнеденко: учебник. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 448 с.
246. Хинчин А. Я. Работы по математической теории массового обслуживания/ А. Я. Хинчин. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1963. – 236 с.
247. Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории массового обслуживания/ Л. А. Овчаров. М.: Машиностроение, 1968. – 326 с.
248. Алиев Т. Н. Основы моделирования дискретных систем/ Т. Н. Алиев: учеб. пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
249. Карагодова О. О. Дослідження операцій : навч.посібник / О. О. Карагодова, В. Р. Кігель, В. Д. Рожок . – К.: Центр учбової літератури, 2007. – 256 с.
250. Падня В. А. Применение теории массового обслуживания на транспорте (железнодорожном, автомобильном, водном и воздушном)/ В. А. Падня . – М.: Изд-во «Транспорт», 1968. – 208 с.
251. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем/ П. С. Давыдов . – М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.
252. Коваленко И. Н. Полумарковские модели в задачах проектирования систем управления летальными аппаратами/ И. Н. Коваленко, М. К. Москатов, Е. Ю. Барзилович. – М.: Машиностроение, 1973. – 176 с.
253. Королюк В. С. Полумарковские процессы и их приложения/ В. С. Королюк, А. Ф. Турбин. – К.: Наукова думка, 1976. – 184 с.
254. Ложковский А. Г. Теория массового обслуживания в телекоммуникациях/ А. Г. Ложковский : учебник. – Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2012. – 112 с.
255. Креденцер Б. П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью/ Б. П. Креденцер. – К.: Наукова думка, 1978. – 238 с.
256. Moudera J., Elmagrabi C. Handbook of Operations Research: Models and applications. Van Nostrand Reinhold Company New York, Cincinnati, Atlanta, Dallas, San, London, Toronto, Melbourne, 1978. – 677 p.

257. Волков И. К. Исследование операций : уч. пособие 2-е изд./ И. К. Волков, Е. А. Загоруйко, под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 436 с.
258. Дынкин Е. Б., Управляемые марковские процессы и их приложения/ Е. Б. Дынкин, А. А. Юшкевич . – М.: Наука, 1975. – 341 с.
259. Матвеев В. Ф. Системы массового обслуживания/ В. Ф. Матвеев, Ушаков В. Г. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 242 с.
260. [Russell L. Ackoff](#) [Maurice W. Sasieni](#). Fundamentals of Operations Research. Wiley, New York, 1968. – 536 p.
261. Hamdy A. Taha. Operations Research an Introduction.: Upper Saddle River New Jersey, 1999. – 912 с.
262. Афанасьев М. Ю. Прикладные задачи исследования операций : уч. пособие/ М. Ю. Афанасьев, К. А. Багринский, В. М. Матюшок . – М.: Инфра-М, 2006. – 352 с.
263. Шикин Е. В. Исследование операций : уч. пособие / Е. В. Шикин, Г. Е. Шикина. – М.: Проспект, 2006. – 280 с.
264. Катулев А. Н. Исследование операций и обеспечение безопасности: прикладные задачи : уч. пособие для вузов/ А. Н. Катулев, Н. А. Северцев Г. М. Соломаха. – М.: Физматлит, 2005. – 240 с.
265. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения/ Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров . – М.: Наука, 1971. – 520 с.
266. Климов Г. П. Теория массового обслуживания/ Г. П. Климов . – М.: Из-во МГУ, 2011. – 312 с.
267. Таранцев А. А. Инженерные методы теории массового обслуживания/ А. А. Таранцев . – М.: Наука, 2007. – 176 с.
268. Рыжиков Ю. И. Теория очередей и управление запасами/ Ю. И. Рыжиков : учеб. для вузов. – СПб, Питер, 2001. – 384 с.
269. Дружинин В. В. Идея, алгоритм, решение (принятие решений и автоматизация/ В. В., Дружинин, Д. А. Конторов. – М.: Воениздат, 1972. – 238 с.

270. Геловани В. А. Интеллектуальные системы поддержки решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды/ В. А. Геловани, А. А. Башлыков, В. Б. Притков, Б. Д. Вязимов . – М.: Эдиториал УРСС, 2001. – 304 с.

271. Егоров А. Ф., Модели и методы решения задач оперативного управления безопасностью непрерывных химико-технологических систем. Ч. 2 Продукционные модели представления знаний в СППР/ А. Ф. Егоров, Т. В. Савицкая, П. Г. Михайлова // Проблемы управления. 2006. – № 3 – С. 25–30.

272. Орлов А. И. Принятие решений. Теория и практика разработки управленческих решений/ А. И. Орлов : уч. пособие. – М.: Март, 2005. – 496 с.

273. Литвак Б. Т. Экспертные оценки и принятие решений/ Б. Т. Литвак . – М.: Патент, 1996. – 271 с.

274. Шершаков В. М. Сетецентрические методы компьютерной поддержки управления ликвидацией последствий чрезвычайных ситуаций/ В. М. Шершаков, Э. А. Трахтенгерц, Д. А. Камаев. – М.: Ленанд, 2015. – 160 с.

275. Трахтенгерц Э. А. Сетецентрические методы компьютерного противодействия катастрофам и рискам/ Э. А. Трахтенгерц. УБС, 2013. – Вып. 41. – С. 162–248.

276. Alberts D. S., Gorstka I. I. Stein F. P. Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority // ССКР Publ 2 nd Edition (Revised). Ang. 1999, Second Print Fev 2000. – P. 284. URL: [http://www.dodccrp.org/files/ncw\\_report/report/ncw\\_main.pdf](http://www.dodccrp.org/files/ncw_report/report/ncw_main.pdf).

277. Парадигма сетецентрического управления и ее влияние на процессы управления войсками/ В. А. Короленко, В. К. Синявский, С. И. Верещагин, И. Х. Гочиев . URL: <http://www.agat.by/pres/statia %20nayka-3.pdf>.

278. Васильев А. Первая сетецентрическая война. URL: <http://topwar.ru/34855-pervaya-setecentricheskaya-voyna.html>.

279. Демиденко Р. А. Опыт реализации сетецентрической системы управления с использованием ГИС/ Р. А. Демиденко «Оператор». Геопрофи, 2013. – № 1. – С. 8–11.

280. Паршин С. Концепция сетецентрического управления ВС США, Великобритании и ОВС НАТО. Общее и различия (2010)/ С. Паршин, Ю. Кожанов // Зарубежное военное обозрение, 2010. – № 4. – С.7–18.

281. Савин Л. В. Сетецентрические методы в государственном управлении/ Л. В. Савин, С. Н. Федорченко, О. К. Шварц. – М.: ООО «Сам полиграфист», 2015. – 146 с.

282. George F. Luger. Artificial Intelligence: structures and Strategies for Complex Problem Solving. Fourth Edition. – Addison Wesley An Imprint of Person Education, Boston, 1999. – 864 p.

283. Earl B. Hunt. Artificial Intelligence. Academic Press New York, 1975. – 558 p.

284. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка формирования целей и стратегий/ Э.А. Трахтенгерц. – М.: Синтез, 2009. –224 с.

285. Малинецкий Г. Г. Сценарии, стратегические риски, информационные технологии/ Г. Г. Малинецкий // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2002. – № 4. – С.8–108.

286. Вишняков Я. Д. Общая теория рисков/ Я. Д. Вишняков, Н.Н.. Радаев. – М.: Академия, 2008. – 363 с.

287. Егоров А.Ф. Модели и методы решения задач оперативного управления безопасностью непрерывных технологических систем. Ч. 2 Продукционные модели представления знаний в системах поддержки принятия решений/ А.Ф. Егоров, Т. М. Савицкая, Михайлова П. Г. // Проблемы управления. 2000. – № 3. – С. 25–30.

288. Першина Е. Л. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений: комплексы программ, модели, методы, приложения/ Е. Л. Першина, О. А., Попова, С. Н. Чуканов: монография. – Омск: СибАДИ, 2000. – 204 с.

289. Еремеев А. П. Методы и инструментальные средства проектирования систем поддержки принятия решений производственного типа : автореф. дис. на соискание ученой степени доктора тех. наук: спец. 05.13.11 «Информационное и

программное обеспечение вычислительных машин, комплексов, систем и сетей» / Александр Павлович Еремеев; Московский энергетический институт. – М.: 1999. – 40 с.

290. Филлипов С. Ж. Параметрическая идентификация систем поддержки принятия решений на основе параллельных генетических алгоритмов : автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата тех. наук: спец. 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям). Санкт-Петербургский Университет «ЛЭТИ». – СПб, 2003. – 28 с.

291. Балашов О. В. Подход к извлечению продукционных правил для систем поддержки принятия решений/ О. В., Балашов, В. В. Круглов. URL: <http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-12-html/borisov/balashov-2/balashov-2.htm>.

292. Голенко Д. И. Стратегические методы сетевого планирования и управления/ Д. И. Голенко. – М.: Наука, 1966. – 400 с.

293. Кофман А. Сетевые методы планирования. Применение системы ПЕРТ и ее разновидностей при управлении производственными и научно-исследовательскими проектами/ А. Кофман, Г. Дебазей Г.: пер. с фран. – М.: Прогресс, 1968. – 182 с.

294. Аньшин В. М. Управление проектами: фундаментальный курс/ В. М. Аньшин, А. В. Алешин, К. А. Багратиони и др.: учебник. – М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2013. – 624 с.

295. Garcia-Diaz A., Phillips D. Methods of network analysis. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs N.J, 1981. – 486 p.

296. Сетевые методы планирования. URL: [http://edu.dvgups.ru/metdoc/ekmen/etr/ek\\_matm\\_m/metod/u\\_p\\_pr/webumk/frame/3.htm](http://edu.dvgups.ru/metdoc/ekmen/etr/ek_matm_m/metod/u_p_pr/webumk/frame/3.htm).

297. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей/ Б. В. Гнеденко / Издание 8-е перераб. и дополн. – М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. л-ры, 1988. – 447 с.

298. Чистяков В. П. Курс теории вероятностей/ В. П. Чистяков. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. л-ры, 1978. – 224 с.



299. Смирнов Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений/ Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1969. – 512 с.

300. Сетевое моделирование целенаправленных процессов. URL: [http://fs.guap.ru/k82/docs/meth/mat\\_model\\_2.pdf](http://fs.guap.ru/k82/docs/meth/mat_model_2.pdf).

301. Филиппович А. Ситуационные центры: определения, структура и классификация/ А. Филиппович. URL: <http://www.pcweek.ru/idea/article/detail.php?ID=64861>.

302. Трофимов Л. Н. Управленческие решения (методы принятия и реализации)/ Л. Н. Трофимов : уч. пособие. URL: <http://studok.net/book/182-upravlencheskie-resheniya-metody-prinyatiya-i-realizacii-uchebnoe-posobietrofimova-la.html>.

303. Морозов А. А. Системи підтримки прийняття рішень типу ситуаційні центри. Вклад ПІММС НАН України/ А. А. Морозов, Г. Е. Кузменко, В. І. В'юн, В. А. Литвинов. URL: [http://www.immsp.kiev.ua/publications/2007\\_3\\_4/index.html](http://www.immsp.kiev.ua/publications/2007_3_4/index.html).

304. Марутян Р. Р. Ситуаційні центри як основа стратегічного управління у сфері національної безпеки/ Р. Р. Марутян. URL: [http://www.dsaua.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=171:2012-10](http://www.dsaua.org/index.php?option=com_content&view=article&id=171:2012-10).

305. Кацман М. Д. Напрямок автоматизації оцінки обстановки і рішень керівників ліквідації надзвичайних ситуацій та гасіння пожеж небезпечних вантажів/ М. Д. Кацман, С. В. Юхимчук // Маркетинг і логістика в системі менеджменту пасажирських перевезень на залізничному транспорті: I міжнародна науково-практична конференція, 15-18 вересня 2009 р.: тези доп. – Львів, 2009. – С. 73–75.

306. Кацман М. Д. Проблеми ліквідації аварій за участю небезпечних вантажів при їх перевезенні залізницями/ М. Д. Кацман, В. В. Маліцький // Сучасні напрямки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: II міжнародна науково-технічна конференція, 15–16 грудня 2011 р.: тези доп. – Київ, 2011. – С. 60.

307. Gorry G. A., Scott M. S. Norton Framework for Management Information Systems. Sloan Management Review. – 1971. – № 1. – p. 55–70.
308. Edwards D. S. Expert Systems in Management and Administration – Are they really different from Decision Support Systems // Europeans darnel of Operational Research, 1997. – Vol. 1. – P. 144–121.
309. Ситник В. Ф. Системи підтримки прийняття рішень/ В. Ф. Ситник: навч. посіб. – К.: КНЕУ, 2004. – 614 с.
310. Шапот М. Интеллектуальный анализ данных в системе поддержки принятия решений/ М. Шапот // Открытые системы. – 1988. – С. 30–36.
311. Eric Sperley. The Enterprise Data Warehouse. Planning, Building, and Implementation. V. 1. – Publ Williams, 1999. – 333 p.
312. Пономаренко В. С. Проектування інформаційних систем : посібник/ В. С. Пономаренко, О. І. Пушкар, І. В., Журавльова, С. В Мухін . – К.: Видавничий центр «Академія», 2002. – 486 с.
313. Стеклов В. К. Проектування телекомунікаційних мереж : підручник/ В. К. Стеклов, Л. Н. Беркман. За ред. В. К. Стеклова. – К.: Техніка, 2002. – 792 с.
314. Симонович С. В. Общая информатика. Новое издание/ С. В. Симонович. – СПб: Питер, 2007. – 428 с.
315. Sodersron T., Stoica P. System Identification. – London: Prentice-Hall International HENCE Hempstead, 1989. – 198 p.
316. Барчегян А. А. Методы и модели анализа данных: OLAR и Data-mining / А. А. Барчегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко и др. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 336 с.
317. Попов Э. В. Экспертные системы/ Э. В. Попов. – М.: Наука, 1987. – 288 с.
318. Пушкар О. І. Системи підтримки рішень слабоформалізованих задач розвитку підприємств/ О. І. Пушкар. – Харків, РВВ ХДЕУ, 1997. – 140 с.
319. Goodwin G. C. Control Systems Design S.F. / G. C. Goodwin, Graebe and Mario E. Salgado, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2001. – 908 p.
320. Mehr Sicherheit Experten Systeme / Metr Dicter Bundesbahn. – 1989 – № 6. – С. 497–500 (ФРГ).

321. Anexpert Systeme for train-traffic control / K. Komaya, N. Fukuda // Mitsubishi Elec.Adk. – 1988-43. – № 6. – P. 25–28.
322. Un.Sistema esparto treni / Barfolucci V., Carehesio. – М.: Tech.prof., 1988. – № 7. – 383–390 (итал.).
323. Адаменко М.І. Аналіз існуючих математичних моделей і комп'ютерних програм для прогнозування розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері/ М.І.Адаменко, М.Д.Кацман, Є.С. Білецька// Системи обробки інформації. Харків. – 2018. – Вип. 1(151). – С. 155–162.
324. Сапожников В. В. Экспертные системы железнодорожной автоматки и телемеханика /В. В. Сапожников, М. Н. Василенко, В. П. Быков, Н. И. Рубинштейн // Автоматика, телемеханика и связь. – 1992. – № 6. – С. 13–16.
325. Баранов Л. А. Системы поддержки принятия решений / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, В. В. Сапожников, М. Н. Василенко, В. П. Быков // Железнодорожный транспорт. – 1995. – № 12. – С. 19–21.
326. Ключко В. И. Архитектура систем поддержки принятия решений / В. И. Ключко, Е. А. Шумков, А. В. Власенко, Р. О. Карнизьян // Научный журнал КубГАУ, 2013. – № 86(02). – С. 27–36.
327. Цыгичко В. Н. Синтез иерархических систем: теория и практика / В. Н. Цыгичко, А. Ю. Попович. – М.: КРАСАНД, 2012. – 280 с.
328. Васильев В. Н. Интеллектуальные системы управления: теория и практика/ В. Н. Васильев, Б. Г. Ильясов. – М.: Радиотехника, 2009. – 392 с.
329. Сальникова Г. В. Информационные технологии в перевозочном процессе: учебное пособие / Г. В. Сальникова, Т. А. Одуленко. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2012. – 111 с.
330. Haettenschwiler P. Neues anwenderfreundliches Konzept der Entscheidungs-Unterstützung. Gutes Entscheiden in Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Zürich: Hochschulverlag AG, 1999. – S. 189–208.
331. Briet A. History of Decision Support Systems. Editor, [DSSResources. COM](http://dssresources.com), World Wide Web <http://dssresources.com/history/dsshistoryv28.html>.
332. Marakas G. M. Decision support systems in twenty first century. Upeer Saddle River, N.I.: Prentice Hall, 1999.

333. Simon H. A. The new science of management decision / H. A. Simon. – Englewood Cliffs, N.I: Prentice-Hall Inc,1975. – 224 p.

334. Поспелов Г. С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии/ Г. С. Поспелов. – М.: Наука, 1988. – 280 с.

335. Логунова Е. А. Обзор подходов к разрешению недостатков продукционных баз знаний систем логического вывода/ Е. А. Логунова // Современные наукоёмкие технологии. – 2015. – № 9. – С.46–48.

336. Кацман М.Д. Деякі шляхи забезпечення транспортної безпеки об'єктів залізничної інфраструктури і рухомого складу публічного акціонерного товариства «Українська залізниця»/ М.Д. Кацман, В.А. Жуков // Проблеми і перспективи інноваційного розвитку економіки у контексті інтеграції України в Європейській науково-інноваційний простір: ХХІІ міжнародна науково-практична конференція, 11-13 вересня 2017 р. : тези.доп. – Одеса, 2017р. – С. 102 – 112.

337. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2001. p. № 19 ; [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1103\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1103_scr.pdf)

338. Постанова Кабінету Міністрів України від 15 лютого 2002 р. N 175 Київ (Із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ N 862 від 04.06.2003) Про затвердження Методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру. <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-%D0%BF>

## Додаток А

## Класифікація небезпечних вантажів та їх властивості

Таблиця А.1

## Класифікація небезпечних вантажів класу 1

Група сумісності	Опис речовин або виробів	Класифікаційний шифр підкласу Відносна кількість вантажів за групами, %					
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
A	Первинна ВР	<u>1.1A</u> 7,7	-	-	-	-	-
B	Виріб, який містить первинну ВР і не має двох чи більше ефективних запобіжних пристроїв.	<u>1.1B</u> 7,7	<u>1.2B</u> 12,5	-	<u>1.4B</u> 14,9	-	-
C	Метальна ВР чи інша здатна до дефлаграції ВР або виріб, який містить таку ВР	<u>1.1C</u> 30,8	<u>1.2C</u> 12,5	<u>1.3C</u> 55,6	<u>1.4C</u> 21,4	-	-
D	Вторинна детонувальна ВР, димний порох або виріб, який містить вторинну детонувальну ВР, без засобів ініціювання і метального заряду. Виріб, який містить первинну ВР з двома або більше ефективними запобіжними пристроями	<u>1.1D</u> 15,4	<u>1.2D</u> 12,5	-	<u>1.4D</u> 14,9	<u>1.5D</u> 100	-
E	Виріб, який містить вторинну детонувальну ВР, без засобів ініціювання, але з металевим зарядом	<u>1.1E</u> 7,7	<u>1.2E</u> 12,5	-	<u>1.4E</u> 7,1	-	-
F	Виріб, який містить вторинну детонувальну ВР, з власними засобами ініціювання, з металевим зарядом або без метального заряду	<u>1.1F</u> 7,7	<u>1.2F</u> 12,5	-	<u>1.4F</u> 7,1	-	-
G	Піротехнічна речовина або виріб, який містить первинну речовину, а також виріб, який містить як ВР, так і освітлювальну, запалювальну, сльозоточиву речовину чи речовину, що утворює дим	<u>1.1G</u> 7,7	-	<u>1.3G</u> 11,2	<u>1.4G</u> 14,9	-	-
L	ВР або виріб, який містить ВР, що виявляє особливу небезпеку і потребує ізоляції кожного виду	<u>1.1L</u> 15,4	<u>1.2L</u> 35,7	<u>1.3L</u> 22,2	-	-	-

Продовження табл. А1

N	Виріб, який містить тільки надзвичайно нечутливі детонуючі речовини	-	-	-	-	-	$\frac{1.6N}{100}$
S	ВР або виріб, які упаковані або сконструйовані так, що будь-які небезпечні наслідки випадкового спрацьовування не виходять за межі їхнього пакування, а у випадку пошкодження пакування під час пожежі будь-які ефекти вибуху чи розкидання значно обмежені	-	-	-	$\frac{1.4S}{21,4}$	-	-

Таблиця. А.2

## Відносна кількість вантажів класу 2 за їх властивостями

Види газів	Небезпечні властивості	Класифікаційний код	Відносна кількість найменувань вантажів за властивостями, <u>всього у класі</u> , % у виді класу
Стиснені гази			<u>22</u>
	задушливі	1 А	44,4
	окисники	1 О	11,1
	легкозаймисті	1 F	22,2
	отруйні	1 Т	11,1
	отруйні, корозійні	1 ТС	11,1
	отруйні, окислювальні	1 ТО	11,1
	отруйні, легкозаймисті, корозійні;	1 TFC	11,1
	отруйні, окислювальні,	1 ТОС	11,1
Скраплені гази			<u>43,9</u>
	задушливі	2 А	22,2
	окисники	2 О	5,6
	легкозаймисті	2 F	22,2

## Продовження табл.А2

Скраплені гази	отруйні	2 T	11,1
	отруйні, корозійні	2 TF	11,1
	отруйні, окислювальні	2 TC	5,6
	отруйні, легкозаймисті, корозійні;	2 TO	5,6
	отруйні, легкозаймисті, корозійні.	2 TFC	5,6
	отруйні, окислювальні, корозійні	2 TOC	5,6
Охолоджені рідкі гази			<b><u>7,3</u></b>
	задушливі	3A	33,3
	окисники	3O	33,3
	легкозаймисті	3F	33,3
Гази, розчинені під тиском		4	<b><u>2,4</u></b>
Аерозольні упаковки і малі ємкості, які містять газ		5	<b><u>4,9</u></b>
Інші вироби, що містять газ під тиском			<b><u>12,2</u></b>
	задушливі	6A	60
	легкозаймисті	6F	40
Зразки газів			<b><u>7,3</u></b>
	легкозаймисті	7F	33,3
	отруйні	7T	33,3
	отруйні, легкозаймисті	7TF	33,3

Таблиця А.3

## Дані про властивості речовин та виробів 3-го класу небезпеки

Група властивості	Властивість	Відносна кількість речовин та виробів, %	
		з усіх груп класу;	з підгруп групи;
F	Легкозаймисті рідини без додаткової небезпеки	46,8	
F1	легкозаймисті рідини з температурою спалаху не вище 61°C		95,6
F2	легкозаймисті рідини з температурою спалаху вище 61°C, які перевозяться або пред'являються до перевезення при температурі, яка дорівнює їхній температурі спалаху або такі, що перевищують її (речовини при підвищеній температурі)		4,4
FT	Легкозаймисті рідини, отруйні	38,7	
FT1	легкозаймисті рідини отруйні		37,5
FT2	пестициди		62,5
FC	Легкозаймисті рідини, корозійні	8,1	
FTC	Легкозаймисті рідини, отруйні, корозійні;	1,6	
D	Рідкі десенсибілізовані вибухові речовини.	4,8	

Таблиця А.4

## Дані про відносну кількість властивостей речовин та виробів класу небезпеки 4.1

Група властивості	Властивість	Відносна кількість речовин та виробів, %	
		з усіх груп класу;	з підгруп групи;
F	Легкозаймисті тверді речовини без додаткової небезпеки	25,6	
F1	органічні		40
F2	органічні розплавлені		10



Продовження табл.А4

F3	неорганічні		50
FO	Легкозаймісті тверді окислюючі речовини	2,6	
FT	Легкозаймісті тверді отруйні речовини	5,1	
FT1	органічні отруйні		50
FT2	неорганічні отруйні		50
FC	Легкозаймісті тверді корозійні речовини	5,1	
FC1	органічні корозійні		50
FC2	неорганічні корозійні		50
D	Тверді десенсибілізовані вибухові речовини без додаткової небезпеки	10,3	
DT	Тверді десенсибілізовані отруйні вибухові речовини	25	
SR	Самореактивні речовини	51,3	
SR1	такі, що не потребують регулювання температури		50
SR2	такі, що потребують регулювання температури		50

Таблиця А.5

**Дані про відносну кількість властивостей речовин та виробів класу небезпеки 4.2**

Група властивості	Властивість	Відносна кількість речовин та виробів, %	
		з усіх груп класу	з під-груп групи
S	Самозаймісті речовини без додаткової небезпеки	51,3	
S1	органічні рідкі		10
S2	органічні тверді		25
S3	неорганічні рідкі		10
S4	неорганічні тверді		30
S5	металоорганічні		25
SW	Самозаймісті речовини, що при взаємодії з водою виділяють займісті гази	23,1	
SO	Самозаймісті окислюючі речовини	2,6	
ST	Самозаймісті отруйні речовини	5,1	
ST1	органічні отруйні рідкі		25
ST2	органічні отруйні тверді		25
ST3	неорганічні отруйні рідкі		25

Продовження табл. А5

ST4	неорганічні отруйні тверді		25
SC	Самозаймисті корозійні речовини	12,8	
SC1	органічні корозійні рідкі		20
SC2	органічні корозійні тверді		20
SC3	неорганічні корозійні рідкі		20
SC4	неорганічні корозійні тверді		40

Таблиця А.6

**Дані про відносну кількість властивостей речовин та виробів  
класу небезпеки 4.3**

Група властивості	Властивість	Відносна кількість речовин та виробів, %	
		з усіх груп класу	з підгруп групи
W	Речовини, які виділяють займисті гази при взаємодії з водою, без додаткової небезпеки, а також вироби, що містять у собі такі речовини	25,6	
W1	рідкі		39,1
W2	тверді		52,2
W3	вироби		8,7
WF1	Рідкі самозаймисті речовини, які виділяють займисті гази при взаємодії з водою	2,8	
WF2	Тверді самозаймисті речовини, які виділяють займисті гази при взаємодії з водою	5,7	
WS	Тверді само нагрівні речовини, які виділяють займисті гази при взаємодії з водою	8,6	
WO	Тверді окислюючі речовини, які виділяють займисті гази при взаємодії з водою	2,8	
WT	Отруйні речовини, які виділяють займисті гази при взаємодії водою	5,7	
WT1	рідкі		50
WT2	тверді		50
WC	Легкозаймисті корозійні речовини, які виділяють займисті гази при взаємодії з водою	8,6	
WC1	рідкі		33,3
WC2	тверді		66,7

Таблиця А.7

**Дані про відносну кількість властивостей речовин та виробів  
класу небезпеки 5.1**

Група властивості	Властивість	Відносна кількість речовин та виробів, %	
		з усіх груп класу;	з підгруп групи;
О	Окислюючі речовини без додаткової небезпеки або вироби	74,1	
О1	рідкі		40
О2	тверді		55
О3	вироби		5
OF	Окислюючі тверді легкозаймісті речовини	3,7	
OS	Самонагрівні окислюючі речовини	3,7	
OW	Тверді окислюючі речовини, які виділяють легкозаймісті гази при взаємодії з водою	3,7	
OT	Отруйні окислюючі речовини	7,4	
OT1	рідкі		50
OT2	тверді		50
OC	Корозійні окислюючі речовини	7,4	
OC1	рідкі		50
OC2	тверді		50

Таблиця А.8

**Дані про відносну кількість властивостей речовин та виробів  
класу небезпеки 6.1**

Група властивості	Властивість	Відносна кількість речовин та виробів, %	
		з усіх груп класу;	з підгруп групи;
Т	Отруйні речовини без додаткової небезпеки	67,9	
	Органічні:	32,3	
Т1	органічні рідкі		58,1
Т2	органічні тверді		41,9

Продовження табл.А8

T3	металоорганічні		9,4
	Неорганічні:	24	
T4	неорганічні рідкі		34,8
T5	неорганічні тверді		65,2
	Пестициди:	32,3	
T6	рідкі, що використовуються як пестициди		48,4
T7	тверді, що використовуються як пестициди		51,6
T8	зразки		1
T9	інші отруйні речовини		1
TF	Отруйні легкозаймісті речовини	18,1	
TF1	рідкі		34,6
TF2	рідкі, що використовуються як пестициди		57,7
TF3	тверді		7,7
TS	Самонагрівні тверді отруйні речовини	0,7	
TW	Отруйні речовини, що виділяють займісті гази при взаємодії з водою	2,8	
TW1	рідкі		75
TW2	тверді		25
TO	Отруйні окислюючі речовини	2,8	
TO1	рідкі		75
TO2	тверді		25
TC	Отруйні корозійні речовини	7	
TC1	рідкі органічні		50
TC2	тверді органічні		10
TC3	рідкі неорганічні		30
TC4	тверді неорганічні		10
TFC	Отруйні легкозаймісті корозійні речовини	1,4	

**Дані про відносну кількість властивостей речовин та виробів  
класу небезпеки 8**

Група властивості	Властивість	Відносна кількість речовин та виробів, %	
		з усіх груп класу;	з підгруп групи;
C1-C10	Корозійні речовини без додаткової небезпеки	70,7	
C1-C4	Неорганічні та органічні		
	Неорганічні:	50	
C1	неорганічні рідкі		55,6
C2	неорганічні тверді		44,4
	Органічні:	50	
C3	органічні рідкі		55,6
C4	органічні тверді		44,4
C5-C8	Речовини, які мають властивості основ	24,4	
	Неорганічні:	40	
C5	неорганічні рідкі		75
C6	неорганічні тверді		25
	Органічні:	60	
C7	органічні рідкі		50
C8	органічні тверді		50
C9-C10	Інші корозійні речовини	31,8	
C9	рідкі		46
C10	тверді		75
C11	Вироби	7	
CF	Корозійні легкозаймисті речовини	8,6	
CF1	рідкі		80
CF2	тверді		20
CS	Корозійні самонагрівні речовини	3,4	
CS1	рідкі		50
CS2	тверді		50
CW	Корозійні речовини, що виділяють самозаймисті гази при взаємодії з водою	3,4	
CW1	рідкі		50
CW2	тверді		50
CO	Корозійні окислюючі речовини	3,4	
CO1	рідкі		50

Продовження табл.А9

CO2	тверді		50
СТ	Отруйні корозійні речовини	3,4	
СТ1	рідкі		50
СТ2	тверді		50

Таблиця А.10

**Дані про відносну кількість властивостей речовин та виробів класу небезпеки 9**

Група властивості	Властивість	Відносна кількість речовин та виробів, %	
		з усіх груп класу;	з підгруп групи;
M1	Речовина, дрібний пил яких при вдиханні може бути небезпечним для здоров'я	8,6	
M2	Речовини та прилади, які при пожежі можуть виділяти діоксини	77,1	
M3	Речовини, що виділяють легкозайmistі пари	5,7	
M4	Батареї літєві	8,6	
M5	Засоби рятувальні	14,3	
M6-M8	Речовини, що є небезпечними для довкілля	8,6	
M6	забруднювач водного середовища рідкій		33,3
M7	забруднювач водного середовища твердий		33,3
M8	генетично змінні мікроорганізми та організми		33,3
M9-M10	Речовини, які перевозяться при підвищеній температурі	8,6	
M9	рідкі		50
M10	тверді		50
M11	Речовини, що являють собою небезпеку при перевезенні, але не відповідають визначенням інших класів	31,4	

## Додаток Б

### Дослідження впливу наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті на стан екологічної безпеки навколишнього середовища

Для побудови теоретичних моделей впливу наслідків процесів горіння та вибуху на стаціонарні виробничі об'єкти застосовують системи диференціальних рівнянь, які описують різноманітні фізико-хімічні процеси розповсюдження забруднення продуктами горіння та вибуху атмосфери, ґрунту, річок і водойм при різних граничних умовах, що враховують поширення таких забруднень при заданих метеорологічних умовах, потужність джерел забруднень і фізичні властивості підстилаючої поверхні (її рельєф, забудови, лісопаркові зони та ін.). Широко також застосовуються методи лінійного регресійного аналізу, розпізнавання образів, послідовної графічної регресії та інші [122,123].

На наш погляд, поруч з розглянутими вище моделями, для прогнозування наслідків екологічно небезпечних залізничних аварійних ситуацій за участю небезпечних вантажів доцільно застосовувати математичні моделі теорії масового обслуговування. При цьому, як показало дослідження, ці моделі потребують суттєвої адаптації до специфічних умов залізничної екологічно небезпечної надзвичайної ситуації. Лише така адаптація дозволить практично застосовувати ці моделі для ліквідації наслідків таких ситуацій.

Розглянемо екологічну систему «аварійний рухомий склад – навколишнє середовище» як марковську систему масового обслуговування (СМО) [96,107].

У марковській 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 чинників аварійної ситуації (НЧАС) 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 –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 НЧАС). Обслуговування заявки-порції у такій СМО складається з двох фаз.

Суть обслуговування заявок-порцій у першій фазі полягає в тому, що концентрація небезпечних чинників аварійної ситуації (НЧАС) 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 НЧАС являє собою простішу одноканальну СМО-1 з чергою та «розігріванням» каналу обслуговування, функціонування якої розглянуто у [123]. «Розігріванням» каналу обслуговування в даному випадку є реалізація інерційної властивості системи.

Граф такої СМО-1 наданий на рис.Б.1.

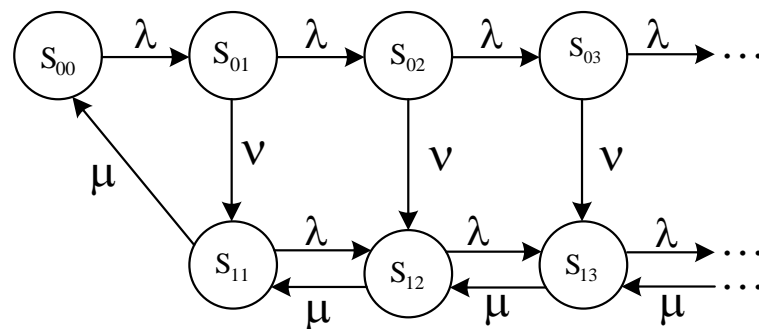


Рис. Б.1. Граф станів СМО-1 з чергою і розігріванням каналу обслуговування

Стани СМО-1 (рис.Б.1) наступні [95,97,121]:

$S_{00}$  – канал вільний, не розігрітий;

$S_{01}$  – прийнята одна порція НЧАС й очікує, канал розігрівається, діє інерційність системи;



$S_{11}$  – канал розігрійтий, одна порція НЧАС обслуговується, черги немає;

$S_{02}$  – канал розігрівається, у черзі дві порції НЧАС;

.....

$S_{0k}$  – канал розігрівається, у черзі  $k$  порцій НЧАС;

$S_{1k}$  – канал обслуговує одну порцію НЧАС,  $(k-1)$  порцій стоять у черзі; і т.д.

Система рівнянь для фінальних ймовірностей першої фази:

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

На другій фазі обслуговування, коли чергова  $(s+1)$ -ша порція НЧАС 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. Б.2).

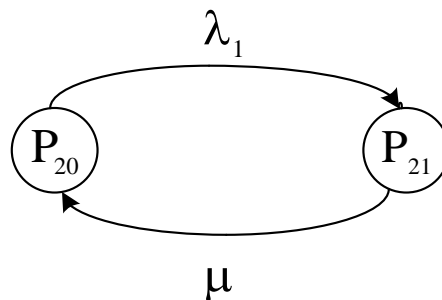


Рис. Б.2. Граф станів СМО-2

Рівняння для фінальних ймовірностей будуть такі:

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

Звідки ймовірність катастрофічного наслідку аварії буде:

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

На рисунках Б.3а), Б.3б) та Б.3в) подані графіки залежностей імовірності катастрофічного наслідку аварійної ситуації для наведеного прикладу від інтенсивності відновлювальних процесів системи  $\mu$  при різних значеннях інерції  $\nu$  та  $\lambda_1$ . На цих рисунках нижні і верхні індекси при величині інтенсивності або інерційності, наприклад  $\nu_3^{IV}$ , означають відповідні серії реалізації обчислювального експерименту.

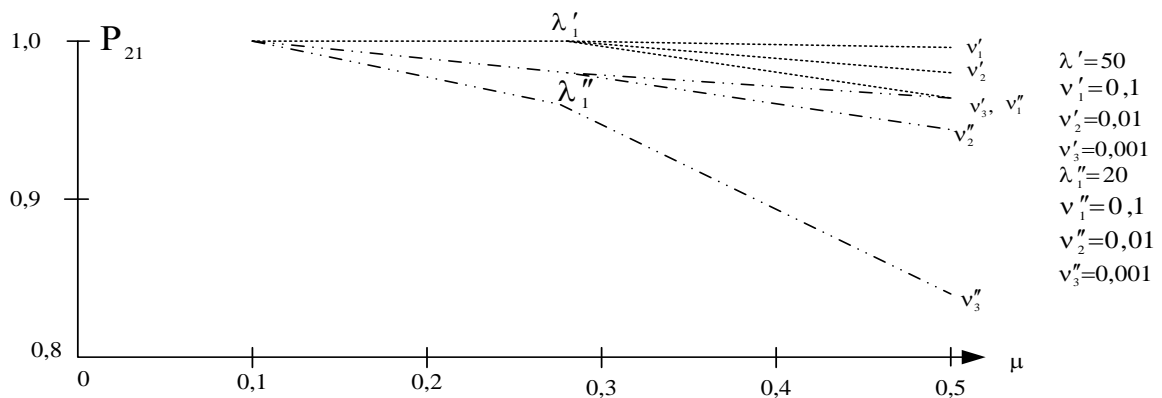


Рис. Б.3а. Графік залежності ймовірності катастрофічного наслідку аварії  $P_{21}$  від інтенсивності самовідновлення системи  $\mu$  при великих значеннях інтенсивності потоку НЧАС  $\lambda_1$  та малих значеннях інерційності системи  $\nu$

З рис. Б.3а видно, що при великих значеннях інтенсивності надходження порцій НЧАС на вхід СМО-2, які отримали відмову у СМО-1, значно менших за інтенсивності протидії системи щодо порушення стану її рівноваги  $\nu$  (при

великому значенні середнього часу інерції системи) та при збільшенні інтенсивності відновлювальних процесів  $\mu$  (зменшення значення математичного сподівання часу відновлення), імовірність катастрофічного наслідку аварії  $P_{21}$  для прикладу, що розглядається, дещо знижується, але залишається досить високою.

На рис.Б.3б подані графіки залежності  $P_{21}$  при помірних значеннях  $\lambda_1$  та малих значеннях  $v$ .

Б

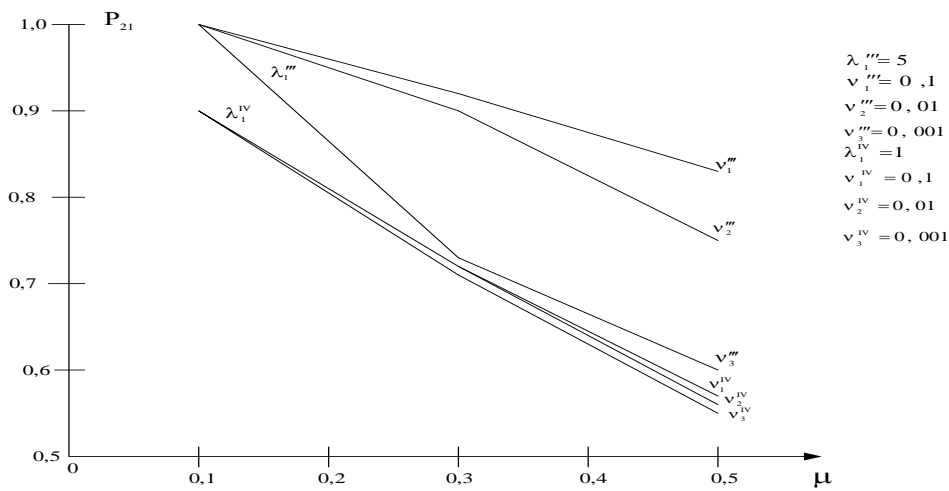


Рис. Б.3б. Графік залежності  $P_{21}$  від  $\mu$  при помірних значеннях  $\lambda_1$  та малих значеннях  $v$

З розгляду графіків на рис. Б.3б видно, що при помірних значеннях вхідного потоку  $\lambda_1$ , низьких інтенсивності інерційності системи  $v$  та збільшенні інтенсивності відновлення системи  $\mu$ , імовірність  $P_{21}$  має тенденцію до зниження своєї величини. Найбільше зниження значення імовірності катастрофічного наслідку відбувається при зменшенні інтенсивності надходження порцій НЧАС 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 імовірність катастрофічного наслідку аварій для прикладу, що розглядається, ще залишається значною.

При збільшенні величин  $\nu$  (зменшенні середнього часу інерції системи) та зменшенні середнього часу відновлення системи (збільшення  $\mu$ ), імовірність  $P_{21}$  значно знижується й при зменшенні  $\lambda_1$  стає незначною (рис. Б.3в).

В

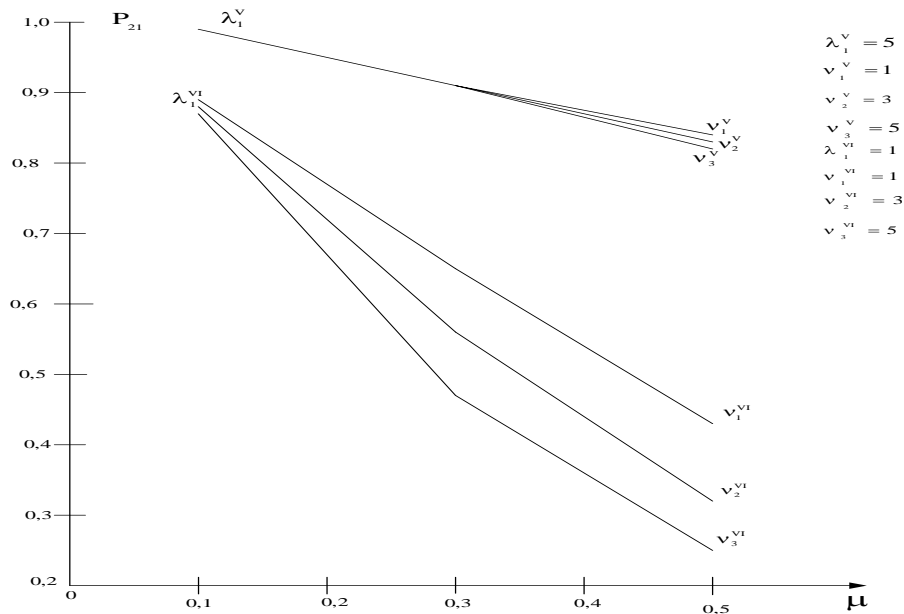


Рис. Б.3в. – Графік залежності  $P_{21}$  від  $\mu$  при помірних значеннях  $\lambda_1$  та  $\nu$

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

Аналогічні висновки можна зробити й при  $\lambda_1^{IX} = 20$ ,  $\lambda_1^X = 50$  та  $\nu = 10; 20; 30$ , 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. Б.3) використовувалися певною мірою, безрозмірні (відносні) значення інтенсивностей потоків та обслуговування заявок-порцій НЧАС в даній математичній моделі. Це дало можливість сфокусуватися на демонстрації можливостей нового теоретичного підходу, що пропонується для даного класу задач. В конкретних практичних застосуваннях цього теоретичного підходу і математичної моделі застосовуються відповідні величини та їх параметри.

## Додаток В

**Особливості ліквідування та рекомендовані дії щодо локалізації екологічно небезпечних аварійних ситуацій з різними класами небезпечних вантажів, а також можливі склади пожежних аварійно-рятувальних і відновних поїздів**

### **В.1 Особливості ліквідування екологічно небезпечних аварійних ситуацій з різними класами небезпечних вантажів**

При ліквідуванні екологічно небезпечних залізничних аварійних ситуацій з речовинами і матеріалами класу 1 ураховується їхня особлива небезпека, спроможність завдати значної шкоди життю та здоров'ю людей, а також житловим і виробничим об'єктам, транспортній інфраструктурі.

При плануванні аварійно-відбудовних робіт з вибуховими речовинами і матеріалами передусім ураховується підклас вантажу, що зазначений в аварійній картці.

Порядок дій спеціалізованих підрозділів визначається відповідними правилами та іншими чинними нормативними актами [1,9,72-84].

Гази стиснені, зріджені і розчинені під тиском в ємкостях (цистернах, балонах), де створюється надлишковий тиск, який значно підвищується зі збільшенням температури і може призвести до розгерметизації ємкості або до її руйнування.

Цистерни зі зрідженими та стисненими газами охолоджуються незалежно від природи газу.

У разі пошкодження котла цистерни з негорючим і нетоксичним газом (підклас 2.2) цистерна відводиться в безпечне місце і перебуває під наглядом. Ліквідація витікання або переливання вантажу в порожню цистерну здійснюється в присутності фахівців відправника (одержувача).

При розгерметизації цистерни і витіканні горючого газу (підклас 2.1), густина якого більша за густину повітря, з метою уникнення створення вибухонебезпечної концентрації і виникнення потужного вибуху або об'ємного загоряння газ, що виходить, під контролем фахівців підпалюють і при

інтенсивному охолодженні котла цистерни дають йому вигоріти. Рішення про підпалення газу приймається керівником робіт на основі письмового повідомлення фахівців після визначення зони загазованості, евакуації людей і оцінки можливих наслідків об'ємного загоряння газоповітряної суміші.

Під час піднімання цистерн з вантажами цього класу небезпеки стежать, щоб підіймальні засоби і самий процес піднімання не призводили до розгерметизації цистерн.

У разі витікання отруйних і токсичних газів (підклас 2.3) для ізоляції газу створюється водяна завіса.

При пошкодженні критого вагона або контейнера з балонами зі стисненими або зрідженими газами вагон (контейнер) відкривають, уникаючи іскроутворення і пожежі. Перевірка цілісності балонів, наявності витікання газу і ступеня загазованості здійснюється з дотриманням передбачених аварійною карткою заходів безпеки. Якщо виявляються ушкоджені балони, то їх віддаляють на відстань, не меншу 100 м від колії на перегоні, будинків і споруд, занурюють в ємкість із розчином відповідно до аварійної картки або ємкість з водою. До повного виходу газу встановлюється охорона і спостереження.

Порожні цистерни з-під займистих зріджених газів мають підвищену небезпеку, поводження з ними унеможливує пошкодження котла з причини падіння надлишкового тиску в об'ємі котла, де може утворитися вибухонебезпечна суміш газу з повітрям. В умовах пожежі порожні цистерни прогриваються з великою швидкістю і через підвищення тиску можливі їх розгерметизація або руйнування.

Загальною властивістю вантажів класу 3 (легкозаймисті рідини) у разі витікання є здатність створювати над поверхнею розлитої рідини горюче середовище з пожежонебезпечною концентрацією парів при температурах навколишнього повітря вище температури спалаху. Горюча концентрація може поширюватися від місця виникнення на відстань понад 2 км, а низькі температури самозаймання парів (100 – 300<sup>0</sup>С) призводять до їх займання від нагрітих тіл і поверхонь. Насичені пари ЛЗР з підвищенням температури навколишнього середовища створюють у цистерні значний тиск, здатний призвести до її розгерметизації. Перед початком робіт з цистернами, що містять ЛЗР,

переконуються в їх герметичності тому, що вони не нагріті. Розігріті цистерни, особливо верхні їх частини, які не контактують з рідкою фазою, можуть спричиняти загоряння парової фази внаслідок переміщення рідкої фази і гідроудару при зсуві цистерн з місця сильними ривками. Тому під час роботи відновних засобів з цистернами передбачається можливість негайного відчеплення тягової техніки і відведення її на безпечну відстань. При цьому протипожежні засоби перебувають у повній готовності, забезпечуючи прикриття відновних робіт.

Під час пошкодження цистерни з такими речовинами, що супроводжується витіканням небезпечного вантажу, уживаються заходи щодо усунення витікання, відведення цистерни на безпечну відстань і перевантаження рідини у порожню цистерну. Якщо при витіканні легкозаймистої рідини виникає пожежа, то на шляху рідини, яка горить, будується земляна загата, пожежа гаситься або підтримується контрольоване горіння до повного вигорання рідини, що витікає.

Під час робіт з нагрітими цистернами з цими речовинами уживаються заходи щодо їх інтенсивного охолодження водою до температури навколишнього середовища і усунення витікання парової і рідкої фаз. Недеформовані цистерни піднімаються або переставляються на залізничні колії за допомогою техніки відновного поїзда і виводяться за межі небезпечної зони.

Порядок дій з порожніми цистернами аналогічний до порядку для навантажених.

У разі гасіння пожеж з вантажами класу 4.1 (легкозаймисті тверді речовини) враховується, що недостатнє зволоження вантажу сприяє самозайманню після припинення горіння. Після гасіння пожежі таких вантажів здійснюється додатковий контроль появи повторних вогнищ.

Якщо в аварійну ситуацію потрапили вагони з небезпечними вантажами класу 4.2 (речовини, що здатні до самозаймання), особлива увага звертається на те, що окремі з них (фосфор жовтий, металоорганічні сполуки) самозаймаються при контакті з киснем повітря. У цьому разі виникнення процесу горіння уникнути практично неможливо. При горінні утворюються токсичні речовини. Продовження робіт можливе після гасіння загоряння вогнегасними речовинами, зазначеними в аварійній картці.

Вантажі класу 4.3 Речовини, які виділяють займісті гази, при взаємодії з водою) характеризуються високою активністю щодо води. Взаємодія з водою має характер вибуху. У ході хімічної реакції утворюються займісті (горючі) гази. Більшість вантажів цього підкласу є горючими. Ці властивості враховуються при проведенні робіт поблизу водоймищ та річок, у дощову погоду або взимку.

Властивостями небезпечних вантажів класів 5.1 (речовини-окисники) і 5.2 (органічні пероксиди) є здатність розкладатися при нагріванні з утворенням кисню (розкладання пероксидів може мати характер вибуху), що сприяє розвитку пожежі в умовах аварійної ситуації; утворювати з горючими речовинами суміші, які самозаймаються в момент їх утворення або займаються при наявності джерела запалювання; утворюють токсичні речовини в контакті з неорганічними речовинами. Горючі речовини прибираються з місця розсипу або розливу вантажу.

Вантажі класу 6.1 (отруйні (токсичні) речовини) в аварійних ситуаціях спричиняють отруєння та захворювання при попаданні до організму або контакті зі шкірою.

Особливо небезпечними є легколеткі речовини, які при аварійних ситуаціях можуть створювати небезпечні концентрації і призвести до отруєння не тільки в зоні аварійної ситуації, а й на значній відстані від неї. Більшість вантажів цього підкласу є горючими речовинами і при горінні утворюють газоподібні токсичні речовини (ціанід водню, фосген, хлороводень, оксиди азоту й таке інше). У разі пожежі нагрівання призводить до випаровування і розкладання негорючих і малолетких отруйних вантажів, що підвищує небезпеку отруєння.

До небезпечних вантажів 7 класу безпеки належать радіоактивні матеріали, тобто будь-які матеріали, що містять радіонукліди, у яких питома активність, а також повна активність вантажу перевищує межі, встановлені нормами і правилами МАГАТЕ № TS-R-1 та Правилами ядерної та радіаційної безпеки при перевезенні радіаційних матеріалів (ПБПРМ-2006).



Деактивація та використання вагонів, їх обладнання і елементів повинна здійснюватися, за можливістю, в найбільш короткий термін до рівня, який вказаний у відповідних аварійних картках.

При роботах з небезпечними вантажами 8 класу (їдкі, корозійні) речовини враховується, що при безпосередньому контакті ці речовини спричиняють ушкодження живої тканини, а при витіканні і просипанні - пошкодження і руйнування вантажів та транспортних засобів. Окремі вантажі цього класу є горючими речовинами, які утворюють при горінні токсичні продукти, виявляють окиснювальні властивості, запалюють горючі речовини (матеріали).

До небезпечних вантажів класу 9 належать речовини (включаючи суміші й розчини), матеріали та вироби, які під час транспортування становлять небезпеку, не характерну іншим класам.

До таких вантажів, зокрема, відносяться речовини, дрібний пил який у разі вдихання може бути небезпечним для здоров'я; речовини і вироби, які у разі пожежі виділяють діоксини; речовини, що виділяють легкозаймисту пару; літєві батареї; речовини, які небезпечні для навколишнього та водного середовища; речовини, що надаються до перевезення за підвищеною температурою; намагнічений матеріал.

Таблиця В.1

**Залежність інтенсивності та тривалості витоків зріджених вуглеводневих газів скрізь пробоїну у казані цистерни**

Площа пробоїни	0,3	0,5	1	2	3	5	10	25
Інтенсивність витоків, кг/с:								
Пароподібної фази (пробоїна у верхній частині казана)	0,04	0,06	0,12	0,20	0,30	0,60	1,2	3,5
Рідкої фази (пробоїна у нижній частині казана)	0,28	0,45	0,9	1,8	2,7	4,5	9	23
Тривалість витоків, год:								
- пароподібної фази	200	120	60	32	20	15	8	5
- рідкої фази	24	15	7,5	3,7	2,4	1,5	0,8	0,5

Таблиця В.2

**Залежність втрат вантажу та терміни часу витікання легкозаймистих рідин з аварійних цистерн від площі пробоїни та універсального зливного пристрою**

	Об'єм котла маса ЛЗР, кг	Діаметр казана, м	Площа пробоїни УЗП, см <sup>2</sup>	Втрата ЛЗР, кг/хв	Термін часу витоку, хв.
1	$\frac{61,2}{42000}$	2,8	78,5	840	50,0
			176	1878	22,4
			314	3348	12,5
2	$\frac{73,1}{49700}$	3,0	78,5	864	57,5
			176	1944	25,6
			314	3468	14,3
3	$\frac{85,6}{69200}$	3,2	78,5	900	64,7
			176	2010	29,0
			314	3600	16,2
4	$\frac{140}{95200}$	3,0	78,5	864	110,0
			176	1944	49,0
			314	3468	26,5
5	$\frac{161,6}{109900}$	3,2	78,5	900	122,0
			176	2010	54,7
			314	3600	30,5

У другій графі цієї таблиці у чисельнику поданий повний об'єм цистерни, а у знаменнику – маса ЛЗР при середній густині 800 кг/м<sup>3</sup> та ступені заповнення у 85%.

Таблиця В.3

**Рекомендовані дії щодо локалізації екологічно небезпечних наслідків залізничних аварійних ситуацій з вантажами першого класу небезпеки**

Рекомендовані дії	Відносна кількість речовин, %
Припинити рух поїздів, автотранспорту та маневрові роботи в зоні аварії	100
Усунути джерело вогню та іскроутворення	99,5
Розсип виробів зібрати під наглядом спеціалістів	8,6
Забороняється застосовувати інструмент з чорного металу	8,1
Розкидані вироби і розсипи зібрати в чисті паперові або поліетиленові пакети	12,6
Ушкоджені упаковки з виробами і зібраним розсипом накрити мокрим брезентом	1,3

## Продовження табл. В.3

Ушкоджені упаковки з виробами і зібраним розсипом складати на відстані від будівель та споруд: більше 35 м/ більше 100 м	0,7
Горючі речовини віддалити від розсипаних виробів	13,9
Повідомити СЕС	24,5
Невеликі ділянки розливів опрацювати 2% розчином соди з водою	98,7
Під керівництвом спеціалістів розливу речовину зібрати алюмінієвим відром в алюмінієві ємкості і залити водою	1,0
Розсипи у вагон не повертати	1,3
Місце розливу обробити водою	1,3
Передбачити заходи пожежогасіння	0,5
У разі розгерметизації виробу і витіку наповнювача виріб засипати піском або ґрунтом з наступним їх видаленням і знищенням під керівництвом спеціалістів	1,8
Нейтралізацію місцевості не робити (шлаки шкідливі)	0,5
Непошкоджені вироби вкласти в упакування і закріпити	0,5
У разі розгерметизації виробів рідкі вибухові речовини прибрати дрантям методом змочування. Дрантя помістити в алюмінієвий посуд	0,5
Гас, що розлився, засипати піском, землею	0,5
Використовувати тонкорозпилену воду для осадження парів	0,7
Пошкоджені вироби та вміст виробів, що розсипалися, під керівництвом спеціалістів зібрати в ємкість з машинним маслом, запобігаючи удару	0,2
За умов розливу в середині вагону без його розгерметизації відвести вагон у безпечне місце і вжити заходів щодо усунення аварії під керівництвом спеціалістів	0,7
У разі розгерметизації вагону і течі з нього розливу обвалувати	0,5
У разі витікання речовини змити її без напору великою кількістю води	0,7
Місце розливу продуктів засипати піском, землею або іншим негорючим матеріалом, потім нейтралізувати під керівництвом спеціаліста	0,7

Таблиця В.4

**Рекомендовані дії щодо локалізації екологічно небезпечних наслідків залізничних аварійних ситуацій з вантажами 2-9 класів небезпеки**

Рекомендовані дії	№ класу небезпеки						
	2	3	4.1, 4.2, 4.3	5.1, 5.2	6.1, 6.2	8	9
Припинити рух поїздів, автотранспорту та маневрові роботи в зоні аварії	100	100	5,6	12,5	6,0	8,6	

Продовження табл. В4

Усунути джерело вогню та іскроутворення	64,1	100	99,7	82,1	71,4	79,0	
Повідомити СЕС	100	100	100	100	71,4	100	-
Викликати газорятувальну службу району	100	84,8			13,8	0,5	
Усунути течі з дотриманням запобіжних заходів	67,1				71,4		59,1
При інтенсивному витіканні дати газу вийти	57,4					0,3	
Ізолювати район доти, доки газ не розсіється	100				0,8		1,3
Не допускати попадання речовини у водоймища, підвали, каналізацію	26,2	88,4	64,3	53,0	100	90,6	81,6
Місце розливу обвалувати	26,2	100	8,5	33,3	77,2	80,6	58,1
Організувати евакуацію людей з урахуванням напрямку руху токсичного газу	27,4				0,3	0,3	
Не допускати зіткнення рідкого газу з горючими речовинами (мастилом, нафтопродуктами)	5,1						
Усунути течі або перекачати в цілу ємкість з додержанням запобігаючи заходів	20,7	100	16,7	31,5		79,0	
При інтенсивні течі газу за узгодженням з пожежною охороною газ, який виходить, підпалити і дати вигоріти під контролем водних струменів	30,4						
Осаджувати пари тонкорозпиленою водою		15,6			11,5	1,1	
Розливи промити великою кількістю води		4,0	3,0	7,1	0,5	22,0	
Розливи засипати піском, ґрунтом, інертним матеріалом		17,4	8,5				34,1
Зібрати засипане інертним матеріалом в сухі ємкості і герметично закрити		3,4	8,5				
Розсипи засипати піском, іншим інертним матеріалом, зібрати в сухі ємкості			90,5			1,3	
Розсипи огородити ґрунтовим валом			73,8	78,6	6,5	29,6	40,6
Не допускати контакту з окиснювачами, вугіллям, маслами, жирами			16,7				
Не допускати попадання води в ємкість і на вантаж			21,3	6,5		0,5	
Перекачати вміст у справну суху ємкість		3,0	18,5	51,2		58,1	
Не допускати контакту з горючими речовинами і нафтопродуктами			98,8	0,5	0,3	1,0	
При розсіпці речовини викликати спеціалістів вантажовідправника (вантажоодержувача)			47,0				
Забрати із зони аварії горючі матеріали і металеві вироби або захистити від попадання на них речовини				1,7	0,2	22,0	

З табл. В.3 та В.4 видно, що одним з основних заходів щодо ліквідації надзвичайних ситуацій з небезпечними вантажами є припинення руху поїздів, автотранспорту та маневрової роботи, повідомлення про надзвичайну ситуацію у СЕС і виклик газорятувальної служби, а також усунення джерел вогню та іскроутворення.

Привертає увагу заборона чіпати та переміщувати вироби до прибуття спеціалістів при ліквідації надзвичайних ситуацій з вантажами 1 класу небезпеки.

Вагому частку рекомендованих дій становлять заходи щодо усунення витікання небезпечного вантажу з дотриманням запобіжних заходів, не допущення попадання речовини у водоймах, підвали і каналізацію і обвалування місць розливу.

З цією метою споруджуються загати, котловани, ями, пастки, ставки-відстійники для збирання і накопичення речовини, а також відвідні канали, тимчасові самопливні лотки, прокладаються жолоби і труби каналізації стоку небезпечної речовини, влаштовується дренаж тощо.

Для здійснення заходів щодо проведення таких робіт застосовуються трактори на гусеничному та колісному ході, які є у складі відбудовного поїзда, а також у підрозділах цивільного захисту, підприємств і організацій залізничного транспорту, Міністерства оборони України та інших організацій, які залучаються до ліквідації надзвичайної ситуації, що склалася.

Своєчасність зосередження цих сил і засобів залежить від ступеню узгодженості дій між керівниками таких підрозділів, а також від рельєфу місцевості, погодних умов, питань матеріально-технічного забезпечення тощо.

Значне місце у рекомендованих аварійними картками діях посідають заходи щодо усунення течі небезпечних вантажів або перекачування їх у цілі ємкості з додержанням запобіжних заходів.

## **В. 2 Прогнозування значень параметрів небезпечних чинників екологічно небезпечних залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами**

Таблиця В.5

## Класифікація зон руйнування

Клас зони	Коефіцієнт, $K_i$	P, кПа	Ступінь руйнування будівель і споруд
1	3,8	>100	Повне руйнування
2	5,6	53	Сильне руйнування, 50% повного руйнування
3	9,6	28	Середнє пошкодження, руйнування без обвалення. Резервуари нафтопродуктів руйнуються
4	28	12	Помірне руйнування, ушкодження внутрішніх перегородок, рам, дверей
5	56	3	Малі ушкодження, розбито не більше 10% скла

Таблиця В.6

## Надлишковий тиск та ураження людини

Рівень ушкодження	AP, кПа
Безумовне смертельне ураження	500
Летальний наслідок, 50% випадків	350
Поріг смертельного ураження	200
Тяжка ступінь ураження	100
Поріг ураження людини	3

Таблиця В.7

## Значення умовної ймовірності ураження людини у залежності від величини пробіт-функції [166,168]

Умовна ймовірність ураження, %	Величина пробіт-функції									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
-	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Таблиця В.8

**Значення коефіцієнта  $\eta$  залежно від швидкості повітряного потоку та температури повітря**

Швидкість повітряного потоку у приміщенні, м·с <sup>-1</sup>	Значення коефіцієнта $\eta$ за температури повітря у приміщенні $t$ , °С				
	10	15	20	30	35
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

Таблиця В.9

**Ймовірність смертельного ураження у залежності від індексу зони**

Частина тих, хто отримав смертельне ураження	Індекс дози, I
0,1	$10^7$
0,5	$2,3 \cdot 10^7$
0,99	$6,5 \cdot 10^7$

Таблиця В.10

**Середньоповерхнева густина теплового випромінювання полум'я залежно від діаметра вогнища і питома масова швидкість вигорання для деяких видів рідкого вуглеводневого палива**

Паливо	$E_f$ , кВт · м <sup>-2</sup>					$M_v$ , кг · м <sup>-2</sup> · с <sup>-1</sup>
	d = 10 м	d = 20 м	d = 30 м	d = 40 м	d = 50 м	
ЗВГ (Метан)	220	180	150	130	120	0,08
ЗВГ (Пропан-бутан)	80	63	50	43	40	0,10
Бензин	60	47	35	28	25	0,06
Дизельне паливо	40	32	25	21	18	0,04
Нафта	25	19	15	12	10	0,04

Таблиця В.11

## Оцінка наслідків у потерпілих при термічному ураженні

Ступінь важкості ураження	Загибель	Інвалідність	Придатність до праці
I	-	-	100
II	10	20	70
III	60	35	5
IV	100	-	-

Таблиця В.12

## Допустима тривалість перебування людей у зонах теплової дії пожежі

Густина теплового потоку, кВт/м	Допустима тривалість перебування людей, хв.	Необхідний захист	Ступінь теплової
3,0	Не обмежується	Без захисту	Больові відчуття відсутні
4,2	Не обмежується	У бойовому одязі	Переносима біль через 20 с
7,0	5	У бойовому одязі	Непереносимий біль миттєво
8,5	5	У бойовому зволоженому водою одязі	Опіки через 20 с
10,5	5	У бойовому зволоженому водою одязі під захистом струменів води	Миттєві опіки
14,0	5	У тепло-відбивальному костюмі під захистом струменів	Миттєві опіки
85,0	1	У тепло-відбивальному костюмі під захистом струменів з засобами захисту	Миттєві опіки



### В 3. Пожежні аварійно-рятувальні поїзди модульного типу.



Рис. В. 1. Самохідна платформа пожежного аварійно-рятувального поїзда



Рис.В.2. Цистерна модульного пожежного аварійно-рятувального поїзда



Рис. В.3. Самохідна платформа з приладами подавання вогнегасної речовини і електросиловим обладнанням



Рис. В.4. Самохідна платформа з рятувним модулем для надання медичної допомоги потерпілим

На рис. В.5 подані можливі склади вітчизняного самохідного модульного автоматизованого пожежного поїзда.

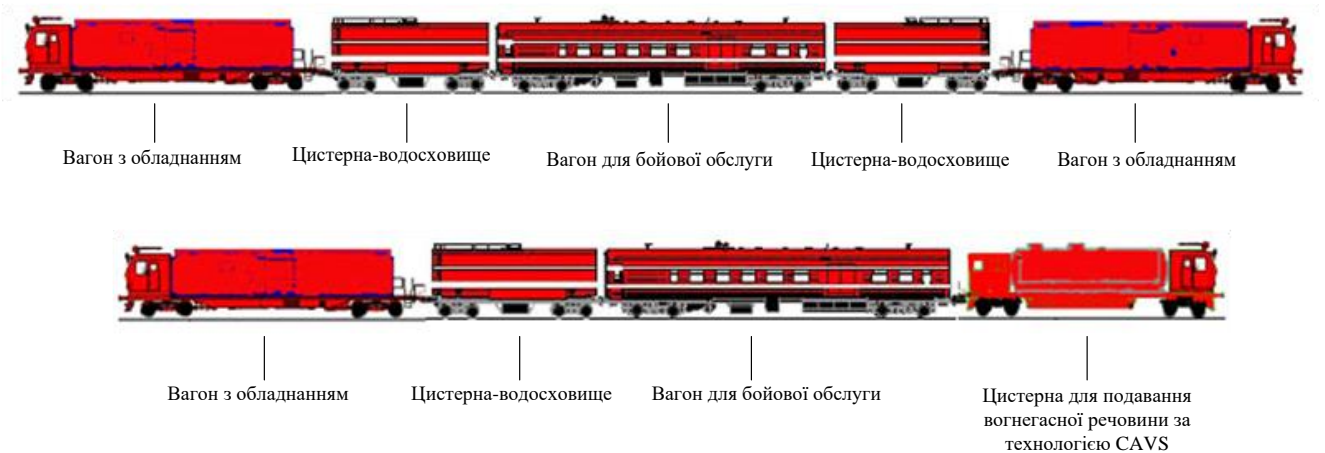


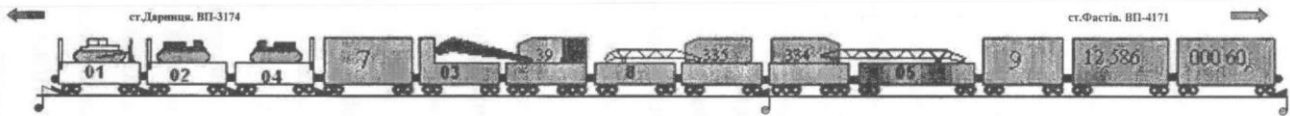
Рис.В.5. Можливі склади вітчизняного самохідного модульного пожежного поїзда



Рис. В.6. Модульний пожежний поїзд виробництва ФРН



Рис. В.7. Пожежний робот Швейцарії



Тара	22	22	22	22	22	102	22	80	111	24,6	22,6	50	50
Вага	50	50	50	26	32	102	32	80	111	36	26	52	52
№ Гальмівного башмака	№ 24, 25 з маяком подвійний	№ 23	№ 22	№ 21 № 6,7,8,9,10, 11,12,13,14,15,17,18,19,20 знаходяться у вагоні № 7				№ 16 з маяком			№ 4, 5 знаходяться у вагоні № 9	№ 2, 3 знаходяться у вагоні № 12586	№ 1 з маяком

Загальний склад 56 вісей, 699 тонн. Усього в поїзді 25 гальмівних башмаків. Гальмівні башмаки № 26,27,28 зберігаються у чергового по поїзду. Стоянка на колії № 20 ст. Київ-Пасажирський.

01-трактор ДЕТ-250  
02-тягач БТС-4 №2  
04-тягач БТС-4 №1

7-електростанція, колійне обладнання  
03-підстрілова платформа крана EDK-50  
39-кран EDK-50

8-підстрілова платформа крана EDK-300  
335-кран EDK-300  
334-кран EDK-500  
05-підстрілова платформа крана EDK-500

9-електростанція, такелажне обладнання  
12586, 00060 –вагони для перевезення кранових бригад та екіпажів тягачів

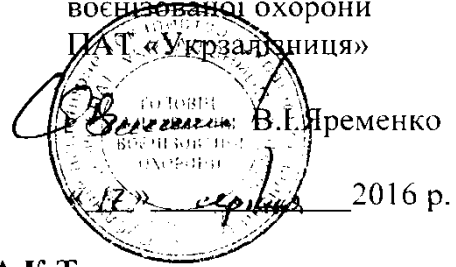
Рис. В.8. Базова схема формування відбудовного поїзда

**Додаток Г**

**Акти впровадження дисертаційного дослідження**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Начальник Головного управління  
воєнізованої охорони  
ПАТ «Укрзалізниця»

**А К Т**

**про використання результатів дисертаційного дослідження  
Кацмана Михайла Давидовича**

Складений комісією Головного управління воєнізованої охорони ПАТ «Укрзалізниця» у складі:

Голова	Начальник управління організації охорони вантажів, об'єктів і посадових осіб	Кривенко І.А
Члени комісії:	Заступник начальника управління з моніторингу та впровадження перспективних засобів охорони, к.е.н.	Жуков В.А.
	Начальник відділу організації пожежного нагляду та пожежогасіння	Шевченко С.М.

Комісія, розглянувши результати дисертаційного дослідження Кацмана М.Д., присвяченого методологічним засадам організації управління екологічною безпекою під час ліквідування наслідків аварійних ситуацій на залізничному транспорті, дійшла наступних висновків.

Практична значущість результатів дослідження полягає у розширенні прогностичних можливостей існуючої на залізничному транспорті структурно-аналітичної моделі визначення величин небезпечних для довкілля та життєдіяльності людини чинників залізничних аварійних ситуацій з легкозаймистими речовинами щодо розрахунку характеристик забруднення верхньої будови залізничної колії такими речовинами, визначення часової залежності концентрації небезпечних речовин в атмосфері на різних відстанях від аварійного рухомого складу.

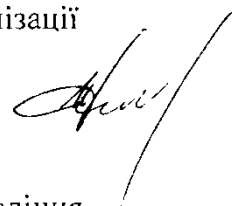
Встановлені кількісні співвідношення між інтенсивністю впливу небезпечних чинників залізничної аварійної ситуації на довкілля та людину, інтенсивністю зосередження і розгортання ліквідаційних підрозділів, продуктивністю їхніх дій та ймовірністю виконання ними ліквідаційних робіт.

Результати дисертаційного дослідження дають можливість розроблення дієвих планів ліквідування наслідків залізничних аварійних ситуацій з небезпечними вантажами щодо раціонального застосування необхідних сил і засобів ліквідаційних підрозділів задля відновлення руху поїздів у можливо короткий термін та зменшення впливу на довкілля та життєдіяльність людини шкідливих чинників таких аварійних ситуацій з додержанням необхідних заходів безпеки.

Застосування у процесі професійної підготовки керівного складу оперативних штабів з ліквідації залізничних аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних вантажів комп'ютерних моделей на базі розроблених для СППР керівника оперативного штабу структурно-логічних схем дій таких штабів у різних аварійних ситуаціях дає змогу скоротити час на підготовку і прийняття раціонального рішення керівника ліквідації аварійної ситуації та інтенсифікувати проведення комплексу ліквідаційних заходів на 10–15 % у порівнянні з раніше існуючою системою підготовки та прийняття рішень.

Голова

Начальник управління організації  
охорони вантажів, об'єктів  
і посадових осіб



І.А. Кривенко

Члени комісії:

Заступник начальника управління  
з моніторингу та впровадження  
перспективних засобів охорони, к.е.н.



В.А. Жуков

Начальник відділу з організації  
пожежного нагляду та  
пожежогасіння



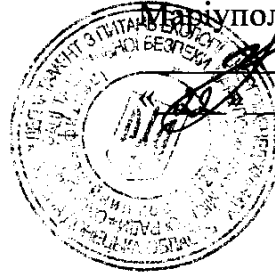
С.М. Шевченко

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Директор департаменту з питань  
екології, енергоменеджменту,  
охорони праці та цивільної безпеки  
Маріупольської міської ради

В.Г. Мнацаканян

Березня 2016 року

**А К Т**

про використання результатів дисертаційного дослідження Кацмана М.Д.

«21» Березня 2016 р.

м. Маріуполь

Складений комісією:

Голова	начальник відділу організації заходів цивільного захисту	О.І. Красілов
Члени комісії	начальник відділу профілактики та реагування на надзвичайні ситуації оперативний черговий пункту управління	Г.Г. Радіонов  О.М. Єрьомін


Комісія встановила:

практична цінність результатів досліджень полягає в тому, що для прийняття своєчасного та оперативного рішення керівником оперативного штабу з ліквідації надзвичайної ситуації міста, яка може виникнути при перевезенні небезпечних вантажів залізничним транспортом використовуються алгоритми ймовірних процесів розвитку аварійних ситуацій з небезпечними вантажами другого класу небезпеки (гази) та третього класу небезпеки (легкозаймисті рідини), які дають змогу виявити причинно-наслідкові зв'язки розвитку таких ситуацій з настанням їх можливих наслідків. Для прогнозування значень величин небезпечних чинників екологічно небезпечної залізничної аварійної ситуації, зокрема при транспортуванні хлору, застосовуються

алгоритми відповідних математичних моделей щодо встановлення параметрів небезпечних зон дії таких чинників на об'єкти інфраструктури і навколишнє середовище з метою визначення необхідних заходів з попередження та ліквідації наслідків надзвичайної ситуації та кількості і видів сил цивільного захисту, які можуть бути залучені до проведення робіт.

Голова

начальник відділу організації  
заходів цивільного захисту



О.І. Красілов

Члени комісії

начальник відділу профілактики  
та реагування на надзвичайні  
ситуації

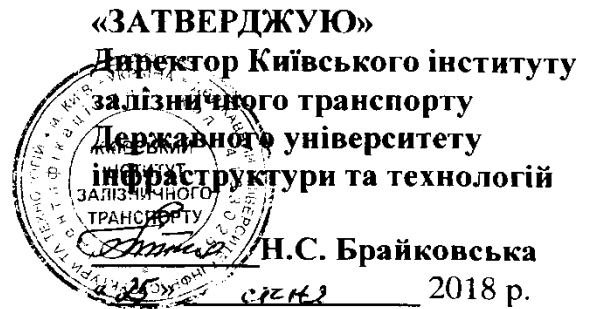


Г.Г. Радіонов

оперативний черговий  
пункту управління



О.М. Єрьомін



## ВИСНОВОК

**про використання результатів дисертаційного дослідження**  
**Кацмана М.Д. на тему:**  
**«Методологічні засади організації управління екологічною безпекою**  
**під час ліквідування наслідків аварійних ситуацій**  
**на залізничному транспорті»**

Аналіз змісту дисертаційного дослідження Кацмана М.Д. підтверджує, що вони відповідають нижчеприведеним дисциплінам і можуть використовуватись при проведенні лекційних та інших занять для освітнього ступеня «бакалавр», «спеціаліст» та «магістр» за напрямом підготовки «Транспортні технології (залізничний транспорт)», а саме:

Дисципліна	Теми занять
«Транспортна екологія»	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Вплив транспортно-дорожнього комплексу на екологічний стан.</li> <li>2. Специфіка впливу видів транспорту на навколишнє середовище.</li> <li>3. Заходи щодо покращання екологічних показників рухомого складу та інфраструктури транспорту.</li> </ol>
«Нормативні документи з безпеки руху поїздів»	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Розвиток небезпечних явищ у надзвичайних ситуаціях.</li> <li>2. Ліквідації наслідків аварійних ситуацій з небезпечними вантажами.</li> </ol>

Крім того, результати дисертаційних досліджень можуть бути використані під час підготовки дипломних проектів (магістерських робіт).

**Декан факультету «Управління**  
**залізничним транспортом» ДЕТУТ –**  
**голова Методичної комісії факультету УЗТ**

**О.Г. Стрелко**



**МІНІСТЕРСТВО  
ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ**

**УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКИ НА  
ТРАНСПОРТІ ТА ТЕХНІЧНОГО  
РЕГУЛЮВАННЯ**

01135, м. Київ-135, пр-т Перемоги, 14

Начальнику відділу навчально-бойової  
та спеціальної підготовки Головного  
управління воєнізованої охорони  
ПАТ «Укрзалізниця»  
Кацману М. Д.

Шановний Михайле Давидовичу!

Управління безпеки на транспорті та технічного регулювання Міністерства інфраструктури України інформує, що результати Вашої дисертаційної роботи щодо проблем організації управління безпекою під час ліквідації наслідків аварійних ситуацій використані при розробленні проекту Закону України «Про критичну інфраструктуру та її захист».

В. о. начальника Управління

І. СУЛИЦЬКА



10:20

№18/8486-18 від 26.06.2018

У К Р А І Н А  
 Міністерство України з питань надзвичайних ситуацій та у справах  
 захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи  
 Державний департамент страхового фонду документації  
 Науково-дослідний, проєктно-конструкторський  
 та технологічний інститут мікрографії НДІ мікрографії  
 № 14321156  
 61046, місто Харків, пров.Пархоменка, 1/60  
 тел.: (0572) 94-48-61, факс: (0572) 94-98-11  
 Казн.рахунок 25135302600903 реєстр.рахунок 06060432020082/0  
 в Фрунзенському відд. ПІБ України м.Харкова МФО 351179  
 № 3247 29.11.2011  
 на № \_\_\_\_\_

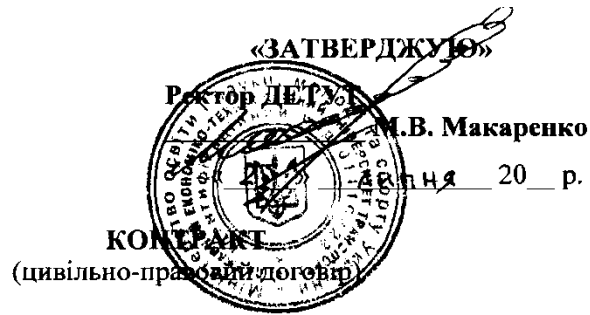
ДОВІДКА

Надана начальнику відділу навчально-бойової та спеціальної підготовки служби відомчої воєнізованої охорони Південно-Західної залізниці, кандидату технічних наук Кацману Михайлу Давидовичу в тому, що він брав участь як співвиконавець у науково-дослідній роботі "Розроблення механізму взаємодії між підрозділами внутрішніх військ МВС України та спеціальними (воєнізованими) і спеціалізованими аварійно-рятувальними формуваннями та їх підрозділами сил цивільного захисту МНС України при виникненні надзвичайних ситуацій" (шифр - "Ситуація")

Довідка надається для пред'явлення по місцю вимоги.

Заступник директора НДІ мікрографії  
 з наукової роботи, к.т.н. доцент





м. Київ

« 23 » липня 2012 р.

Ми, що нижче підписалися, Державний економіко-технологічний університет транспорту в особі проректора з наукової роботи Данилевського В.І., який у подальшому іменується «Замовник», з однієї сторони і

**Кацман Михайло Давидович**

(прізвище, ім'я, по-батькові)

**Заступник начальника служби ПЗЗ**

(посада, місце основної роботи)

який у подальшому іменується «Виконавець», з іншої сторони, уклали цей контракт про наступне:

1. Замовник доручає, а Виконавець зобов'язується на посаді старшого наукового співробітника на умовах трудової угоди за темою № 1/2012 від «23» липня 2012 р.

**«Дослідження стану і тенденцій розвитку транзитних перевезень та розробити пропозиції щодо освоєння перспективних транзитних вантажопотоків через територію України»**

(назва теми)

виконати роботи:

Найменування робіт (етапів календарного плану)	Вартість робіт, грн.	Термін виконання		Форма подання роботи
		початок	закінчення	
Розробка економіко-математичних моделей впливу зовнішніх факторів на формування потенційних транспортних потоків, факторного аналізу транспортного обслуговування з урахуванням особливостей перевезень окремих груп вантажів.	4000,00	23.07.12	10.12.12	Звітні матеріали за виконаними роботами подаються в електронному виді
<b>Всього</b>	<b>4000,00</b>			

2. Робота вважається виконаною Виконавцем після приймання керівником науково-контрактного колективу (НКК) за актом приймання-здавання науково-дослідної роботи (НДР) або нормативної документації (НД), підписаним обома сторонами.

Розрахунок з Виконавцем здійснюється по мірі надходження від Зовнішнього замовника грошових коштів за виконання відповідної роботи.

3. Сума коштів, яка спрямовується на оплату праці за цим контрактом, встановлюється на момент підписання цього контракту згодою сторін у розмірі:

**Чотири тисячі** \_\_\_\_\_ грн. 00 коп.

(сума прописом)

по платіжних етапах, які наведені у календарному плані виконання НДР / розробки НД за умови додержання вимог, п. 2 цього контракту.

4. У разі зміни обсягу фінансування та в залежності від особистого творчого внеску Виконавця, результатів його роботи, сума, що спрямовується на оплату праці Виконавця може бути зменшена або збільшена у межах витрат на оплату праці, передбачених кошторисом.

5. У випадку пред'явлення Зовнішнім замовником претензій до якості виконання роботи Виконавцем, останній зобов'язаний у зазначений ДЕТУТ термін зробити відповідне виправлення без додаткової оплати.

6. Державне соціальне страхування Виконавця здійснюється в установленому порядку за основним місцем роботи.

7. Виконавець згідно з цим контрактом зобов'язується додержувати правила конфіденційності, не розголошувати комерційну, технічну та іншу інформацію, отриману під час (у результаті) роботи.

8. Цей контракт набирає чинності після підписання обома сторонами. Усі зміни та доповнення до цього контракту оформлюються документально і можуть бути внесені тільки за обоюсторонньою згодою сторін.

9. Відносини сторін, у т.ч. відповідальність за цим контрактом регулюються чинним законодавством України.

10. Функції контролю по контракту покладаються на керівника НКК  
(керівника НКК, проректора з наукової роботи)

11. Права власності на розроблену за цим контрактом науково-технічну продукцію належать ДЕТУТ.

### Юридичні адреси сторін:

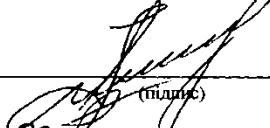
Замовник: ДЕТУТ: 03049, м. Київ-49, вул. Лукашевича, 19.

Виконавець: *Кацман Михайло Давидович*

Домашня адреса:	м. Вінниця, вул. Червоноармійська, 18, кв. 4				
Телефон робочий:		Телефон домашній:	(067)4323526	Рік народження	14.08.1947
Паспорт: серія	АВ	№	169284	дата видачі	26.09.2000
КИМ виданий	Замостянським РВ УМВС України у Вінницькій обл..				
Ідентифікаційний номер	1739205036				

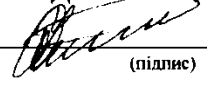
З умовами контракту згодні:

**ВИКОНАВЕЦЬ**

  
(підпис)  
« 20 » липня 2012 р.

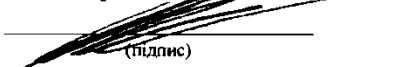
**ЗАМОВНИК**

Данилевський В.І.

  
(підпис)  
« 20 » липня 2012 р.

**ПОГОДЖЕНО:**

Керівник НКК  
Мироненко В.К.

  
(підпис)

Начальник НДВ  
Левченко О.В.

  
(підпис)

ДР N 01120006664