

А. Г. Курило, PhD, с.н.с. лаб. (ORCID 0000-0002-5139-0278)

М. В. Кустов, д.т.н., професор, нач. наук.-дослідн. лаб. (ORCID 0000-0002-6960-6399)

С. І. Зімін, н.с. лаб. (ORCID 0000-0003-0514-2238)

А. О. Губенко, к.н.держ.упр., нач. каф. (ORCID 0009-0007-3647-3909)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКІВ КАСКАДНИХ АВАРІЙ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ В УМОВАХ ВІЙНИ

Дослідження спрямоване на підвищення стійкості залізничного транспорту під час перевезення небезпечних хімічних речовин в умовах воєнного стану. У роботі проведено комплексний аналіз сучасних ризиків для залізничної інфраструктури, виконано порівняння загроз мирного та воєнного часу та ідентифіковано ключові сценарії розвитку аварій. Розроблено бібліотеку каскадних сценаріїв аварій та запропоновано модифіковані моделі оцінки ризиків і поширення токсичних викидів, що враховують специфічні фактори військового часу. Для підвищення точності прогнозування запропоновано використання computational fluid dynamics-моделювання. Необхідність роботи полягає у тому що класичні моделі ризику, ефективні в мирний час, не враховують нову природу загроз – цілеспрямовані атаки, обстріли та диверсії. Залізничний транспорт, будучи критичною інфраструктурою, став ціллю для противника, а аварія з небезпечними хімічними речовинами може призвести до катастрофічних наслідків: масштабних пожеж, вибухів, токсичних викидів і каскадних аварій. Встановлено, що ефективність протидії визначається оперативністю виявлення небезпеки та готовністю до координаційних дій в умовах бойових дій. Класичні моделі оцінки ризиків вже не відображають повною мірою нову реальність, де основним чинником аварій є навмисні ворожі дії. Отримані результати та розроблені моделі становлять основу для переходу від реактивного до проактивного управління ризиками. Вони дозволяють розробляти адаптивні плани реагування та алгоритми дій для рятувальних служб, здійснювати превентивну маршрутизацію небезпечних вантажів та укріплювати критичні вузли, а також створювати інтегровану систему управління ризиками. Це спрямовано на мінімізацію людських втрат, екологічних збитків та стратегічних наслідків ураження інфраструктури, що забезпечує стійкість транспортної системи країни в умовах воєнного стану.

Ключові слова: залізничний транспорт, критична інфраструктура, каскадні аварії, ризики у воєнний час

1. Вступ

Залізничний транспорт у сучасних умовах війни є ключовим елементом критичної інфраструктури, що забезпечує евакуацію населення, стратегічні перевезення, логістику для Збройних Сил та стає функціонування економіки [1]. Особливе значення набуває перевезення небезпечних хімічних речовин (НХР), адже у мирний час вони становлять потенційну загрозу внаслідок аварій чи технічних відмов, тоді як у воєнний час ці ризики зростають у разі через обстріли, диверсії та атаки FPV-дронів [2]. Витік токсичних або вибухонебезпечних речовин у зоні бойових дій може мати катастрофічні наслідки – від масових уражень населення до зупинки стратегічних транспортних коридорів, що підвищує роль системи цивільного захисту та інтеграції управління ризиками на національному рівні [3]. Сучасна війна докорінно змінила спектр загроз для залізничного транспорту, що виводить питання пожежної та техногенної безпеки на стратегічний рівень [4]. Якщо за відсутності воєнних дій головними факторами були технічні несправності або випадкові аварії, то сьогодні основними джерелами небезпеки стають цілеспрямовані дії противника, посилені складними умовами транспортування небезпечних хімічних речовин (НХР). Однак на сучасному етапі відсутні методи, методики та алгоритми для оцінки рівня небезпеки перевезень НХР у контексті війни,

а саме питання безпеки залізничних перевезень набуває стратегічного виміру, виходячи далеко за межі класичного транспортного ризику.

Таким чином, проблемою, що підлягає вирішенню є відсутність методологічної та математичної бази для оцінки ризиків аварій на залізничному автотранспорті в умовах війни.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Залізниця відіграє ключову роль у перевезенні небезпечних матеріалів. Покращення безпеки перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом є пріоритетним завданням як для промисловості, так і для уряду. Багато серйозних інцидентів із витоком небезпечних вантажів на залізниці відбуваються через аварії поїздів. Визначається понад 300 причин аварій, включаючи дефекти інфраструктури, несправності рухомого складу, людські фактори та інші причини [5]. Для забезпечення безпечного простору, в якому ми живемо, відповідні міжнародні організації (наприклад, ООН, ОЕСР, ЄС, НАТО, СЕК ООН), уряди, державні адміністрації (адміністративні органи, регіональні та місцеві органи влади) мають спеціальні програми, метою яких є створення безпечного простору [6].

Залізничні вузли, склади пального та цистерни з легкозаймистими речовинами є пріоритетними цілями для обстрілів. Влучання снарядів чи ракет призводить не лише до знищення рухомого складу та інфраструктури, але й до масштабних пожеж, які важко локалізувати [7]. Особливо небезпечними є пожежі у вагонах-цистернах із бензином, дизельним паливом або скрапленим газом, що можуть супроводжуватися масштабними вибухами [8].

Перевезення НХР (аміак, хлор, сірководень та інші токсичні речовини) в умовах бойових дій пов'язане з високим ризиком руйнування цистерн [9]. У випадку викиду виникають токсичні хмари, що здатні охопити великі території, створюючи небезпеку масових уражень населення та особового складу військ [10]. Результати показують, що витік відбувається в три етапи: динамічне розповсюдження, розповсюдження під дією сили тяжіння та розповсюдження в атмосфері. Такі аварії мають подвійний характер – вони поєднують у собі наслідки як техногенного, так і воєнного походження.

Використання дронів по рухомому складу та залізничним вузлам стало однією з ключових загроз останніх років. FPV-дрони здатні уражати локомотиви, цистерни з паливом і навіть вагони з небезпечними вантажами. Ураження цистерни з НХР може призвести до сценаріїв хімічної катастрофи з наслідками, співмірними з аваріями техногенного характеру [11].

Диверсії на залізниці – підриви колій, підпал складів чи навмисне пошкодження цистерн із небезпечними вантажами – спрямовані на паралізацію транспортної системи та створення додаткових загроз для цивільного населення [14]. В умовах війни такі дії набувають системного характеру, підвищуючи ризики не лише локальних інцидентів, а й масштабних катастроф [13].

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є відсутність комплексного підходу та математичного апарату для оцінки ризиків аварій на об'єктах залізничної інфраструктури під час воєнних дій.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка комплексного підходу до моделювання ризиків та формування сценаріїв розвитку аварій на об'єктах залізничної інфраструктури під

час воєнних дій, з урахуванням впливу навмисних атак, диверсій та поєднаних техногенних і військових загроз, пов'язаних із транспортуванням небезпечних хімічних речовин.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Формування бібліотеки сценаріїв розвитку аварій на об'єктах залізничної інфраструктури під час воєнних дій.

2. Розробка математичної моделі розрахунку ризиків при аваріях на об'єктах залізничної інфраструктури під час воєнних дій.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є розвиток аварій на об'єктах залізничної інфраструктури, які виникають внаслідок воєнних дій, включаючи обстріли, атаки безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та диверсійні акти. До таких об'єктів належать залізничні цистерни з небезпечними хімічними речовинами (НХР) та паливно-мастильними матеріалами (ПММ), вузлові станції, колії, мостові переходи та логістичні хаби.

Предметом дослідження є ризики каскадних аварій на залізничному транспорті та математичне моделювання ризиків у воєнний час з урахуванням впливу нових змінних, характерних для умов збройного конфлікту. Матеріали та методи дослідження базуються на комплексному аналізі ризиків аварій на об'єктах залізничної інфраструктури під час воєнних дій, з урахуванням впливу навмисних атак, диверсій та поєднаних техногенних і військових загроз. У дослідженні використовувався системний підхід, що поєднує елементи стохастичного моделювання, CFD-аналізу та геоінформаційних технологій для просторової оцінки наслідків аварій.

Гіпотезою дослідження є наявність суттєвого впливу нових факторів воєнного характеру та їх синергічний ефект на ступінь ризику залізничних перевезень та сценарії розвитку надзвичайних ситуацій на залізничному транспорті.

5. Формування бібліотеки сценаріїв розвитку аварій

Поєднання вогневих уражень, атак дронів та диверсій з ризиком пошкодження цистерн з НХР створює ефект каскадних аварій. Пожежа на одному об'єкті може спричинити вибух чи витік хімічної речовини на іншому, формуючи надзвичайну ситуацію регіонального масштабу [14].

Поєднання вогневих уражень, атак дронів та диверсій з ризиком пошкодження цистерн і об'єктів, що містять небезпечні хімічні речовини (НХР), створює потенціал розвитку каскадних аварій, які мають високу динаміку розвитку та можуть набувати надзвичайного характеру регіонального масштабу. У таких умовах локалізація наслідків ускладнюється як через фізико-хімічні властивості речовин, так і через значне навантаження на систему цивільного захисту та медичну інфраструктуру.

Аналіз представленої моделі каскадного сценарію (табл. 1) дозволяє виокремити сім ключових етапів розвитку надзвичайної ситуації. Кожен з них має специфічні механізми виникнення, безпосередні та вторинні наслідки, індикатори раннього виявлення та потребує цілеспрямованих заходів реагування із залученням відповідних служб.

6. Розробка математичної моделі розрахунку ризиків при аваріях

З початком війни природа ризиків радикально змінилася. На перший план вийшли цілеспрямовані атаки на об'єкти залізничної інфраструктури та рухомий

склад. Ураження цистерн із паливно-мастильними матеріалами (ПММ) або небезпечними хімічними речовинами створює не тільки техногенну, а й військово-екологічну загрозу. Додатково зросла вразливість через використання високоточної зброї, дронів та диверсійних груп. Таким чином, якщо у мирний період головними механізмами аварій були відмови техніки або випадкові збіги природних факторів, то у воєнний час визначальним стає людський фактор у формі навмисних атак.

Табл. 1. Каскадний сценарій ураження об'єктів з небезпечними хімічними речовинами під час воєнних дій: етапи, наслідки та заходи реагування

Етап (блок)	Основні механізми	Негайні наслідки	Вторинні/каскадні наслідки	Ранні індикатори/сигнали	Номінальні заходи реагування	Відповідальні / взаємодія
1. Обстріл / FPV / диверсія	Прицільне ураження вагонів, складів, колій	Ураження обладнання, руйнування ємностей	Ініціація пожежі, руйнування інфраструктури	Детонування, спалахи, аварійні сигналізації	Перехід у режим бойової стійкості, попередження цивільного захисту	ЗСУ (при виявленні), Укрзалізниця, ОВА
2. Пошкодження цистерн / об'єктів	Пробиття стінок, руйнування кріплень	Витік ПММ або НХР, займання	Поширення вогню, загроза детонації	Звукові/відеоіндикатори, спрацювання датчиків тиску	Мобільне герметизування, відведення населення	ППР, спеціальні бригади УЗ/ДСНС
3. Пожежа	Горіння ПММ, органічних чи паливних сумішей	Інтенсивні полум'яні маси, нагрів суміжних ємностей	Переривчасті вибухи, поширення вогню	Тепловізори, датчики CO/NOx, виклики рятувальників	Застосування піноутворювачів, охолодження, евакуація	Пожежно-рятувальні підрозділи, ДСНС
4. Вибух	Детонація через надлишковий тиск / концентрацію пари	Фрагментація ємностей, ударна хвиля	Руйнування навколишніх об'єктів, численні пожежі	Сейсмічні / акустичні сенсори, масові виклики	Оцінка радіусу руйнувань, медичне реагування	ДСНС, поліція, медицина
5. Витік НХР	Масивний неконтрольований викид (пари/газ/рідин а)	Формування токсичної хмари, опади	Масові ураження, забруднення води/грунту	Газові детектори, дрони з ПЛК/спектром етрами	Ізоляція району, евакуація, нейтралізація, оповіщення населення	Хіміко-рятувальні підрозділи ДСНС, МОЗ
6. Масові ураження	Отруєння, опіки, вибухові травми	Медична криза, паніка, зростання смертності	Падіння працездатності служб, соціальні хвилі	Звернення у медзаклади, виклики швидкої	Масштабна медична мобілізація, евакуація	МОЗ, місцеві адміністрації
7. Зупинка евак/логістики	Блокування залізничної лінії, руйнування мостів	Зупинка постачань, зрив евакуаційних коридорів	Загострення гуманітарної кризи, стратегічні втрати	Втрата зв'язку, обірвані маршрути	Маршрути резерву, мобільні коридори постачання	УЗ, ОВА, Міноборони

За відсутності воєнних дій безпека залізничного транспорту забезпечувалася здебільшого за рахунок технічних і організаційних заходів, спрямованих на запобігання аваріям та нейтралізацію впливу природних факторів. Аварії зазвичай ма-

ли локальний характер і призводили до відносно обмежених наслідків – затримок руху, локальних пожеж, тимчасового забруднення довкілля.



Рис. 1. Основні ризики для залізничного транспорту за відсутності воєнних дій



Рис. 2. Основні ризики для залізничного транспорту у воєнний час

В умовах війни ситуація кардинально змінилася. Залізничний транспорт став не лише економічним інструментом, але й стратегічним ресурсом для Збройних

Civil Security. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-42-9

Сил України, евакуації цивільного населення та забезпечення роботи критичної інфраструктури. Наслідки аварій тепер мають регіональний або навіть національний масштаб – це може включати зрив військової логістики, ураження великої кількості населення, руйнування ключових об'єктів і каскадні аварії, що впливають на інші сфери життєдіяльності.

Сучасні загрози мають комбінований характер. Наприклад, воєнна атака може призвести до техногенної аварії – обстріл залізничної цистерни з небезпечними хімічними речовинами викликає витік та утворення токсичної хмари, яка поширюється на навколишню територію. Це суттєво ускладнює реагування, оскільки необхідна інтеграція сил цивільного захисту, військових та спеціалізованих підрозділів, а також використання геоінформаційних та прогнозних систем.

За відсутності воєнних дій оцінка ризиків аварій з небезпечними хімічними речовинами (НХР) базується на класичній стохастичній моделі:

$$R = P \cdot C, \quad (1)$$

де R – ризик аварії, P – ймовірність виникнення аварії, C – наслідки аварії, виражені у кількості загиблих, економічних збитках та шкоді довкіллю.

Розрахунок ймовірності

$$P = P_t + P_h + P_s, \quad (2)$$

де P_t – технічні відмови обладнання (знос цистерн, корозія, старіння елементів), P_h – людський фактор (помилки персоналу, неправильне обслуговування), P_s – природні явища (шторм, землетрус, сильний вітер).

За відсутності воєнних дій найбільше значення мають P_t та P_h , які контролюються шляхом регулярного технічного огляду та підвищення кваліфікації персоналу.

Моделювання розповсюдження НХР за відсутності воєнних дій. Найпоширенішим методом прогнозування поширення токсичної хмари є Гаусова модель розсіювання:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right], \quad (3)$$

де $C(x, y, z)$ – концентрація небезпечної хімічної речовини в заданій точці простору, мг/м^3 ; Q – швидкість викиду (маса речовини, що потрапляє в атмосферу за одиницю часу), г/с ; u – середня швидкість вітру на висоті джерела викиду, м/с ; σ_y, σ_z – коефіцієнти турбулентного розсіювання за напрямками y та z відповідно, м ; H – ефективна висота джерела викиду (м).

У мирний час основними змінними, що враховуються при розрахунках, є:

- метеорологічні параметри: u , σ_y , σ_z ;
- масштаб викиду: величина Q , що визначається кількістю речовини, яка потрапила в атмосферу під час аварії;
- параметри джерела: висота джерела викиду H .

Модель дозволяє прогнозувати зони ураження при викидах небезпечних хімічних речовин, визначати концентрацію речовини на різних відстанях та формувати рекомендації щодо радіусу евакуації населення. Це робить її важливим інструментом для планування заходів цивільного захисту у разі аварійних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах.

Під час війни з'являються нові фактори, що впливають на ризики. Вони вносяться у модель як додаткові змінні:

Табл. 2. Фактори ризику у воєнний час

Нова змінна	Позначення	Суть	Вплив на модель
Інтенсивність обстрілу	I_o	Частота та потужність атак	Змінює ймовірність аварії (P)
Ймовірність повторної атаки	P_a	Ризик під час ліквідації	Збільшує загальний ризик
Затримка реагування	t_d	Час неможливості доступу рятувальників	Збільшує площу ураження та концентрацію (C)
Втрата інфраструктури	L_i	Відсутність води, електрики, зв'язку	Знижує ефективність ліквідації
Масовість атак	M_a	Одночасні аварії в різних регіонах	Впливає на розподіл ресурсів
Соціальні фактори	S_p	Паніка, дезінформація, хаос	Збільшує кількість жертв

Модифікована формула ризику у воєнний час. Класична формула доповнюється новими параметрами:

$$R_w = (P_t + P_h + P_s + P_o + P_a) \cdot C \cdot F_w, \quad (4)$$

де P_o – ймовірність прямої атаки (ракета, дрон, артилерія), P_a – ймовірність повторного удару під час ліквідації, F_w – коригуючий воєнний фактор:

$$F_w = (1 + k_1 t_d + k_2 L_i + k_3 M_a + k_4 S_p), \quad (5)$$

де $k_1 \dots k_4$ – вагові коефіцієнти, що визначають важливість кожного фактора.

Приклад для залізничної цистерни з аміаком за відсутності воєнних дій:

Витік – через технічну несправність.

$P = 0.002$ (дуже низька ймовірність).

$t_d = 0$ (рятувальники реагують негайно).

Зона ураження – 5 км.

Воєнний час:

$P_o = 0.3$ (висока ймовірність атаки).

$t_d = 1.5$ год (підхід неможливий через повторні обстріли).

$L_i = 0.5$ (часткова втрата інфраструктури).

$M_a = 0.7$ (одночасні аварії у трьох вузлах).

$$F_w = 1 + (0,4 \cdot 1,5) + (0,3 \cdot 0,5) + (0,2 \cdot 0,7) = 1,89. \quad (6)$$

Аналіз показав, що у воєнних умовах наслідки можуть бути майже вдвічі більшими навіть при однаковому обсязі НХР. Це зумовлено додатковими чинниками, зокрема руйнуванням ємностей, вибухами та пожежами.

Модифікація формули розсіювання під час війни передбачає врахування додаткової маси:

$$Q_{\Sigma} = Q + Q_d + Q_p, \quad (7)$$

де: Q_d – при атаці цистерна/резервуар може миттєво викинути більший об'єм re-civil Security. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-42-9

човини, ніж у разі звичайної аварії. Це не просто «звичайний витік», а масовий розрив; Q_p – якщо одночасно виникає пожежа, то в атмосферу викидаються додаткові токсичні сполуки (NO_x , CO , HCl , сажа, тощо). Вони також формують частину хмари і фактично підвищують «ефективне» джерело забруднення.

Формула розсіювання стає:

$$C(x, y, z) = \frac{Q + Q_d + Q_p}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]. \quad (8)$$

Нами встановлено, що врахування цих додаткових факторів дозволяє точніше визначити масштаби ураження та більш обґрунтовано планувати евакуаційні заходи. У сучасних умовах моделювання ризиків, пов'язаних з транспортуванням небезпечних хімічних речовин залізничним транспортом, набуває стратегічного значення, особливо з урахуванням впливу воєнних дій.

Аналіз показує, що підхід до оцінки ризиків суттєво змінився у порівнянні з довоєнним періодом, що вимагає удосконалення моделей та розширення їхніх можливостей.

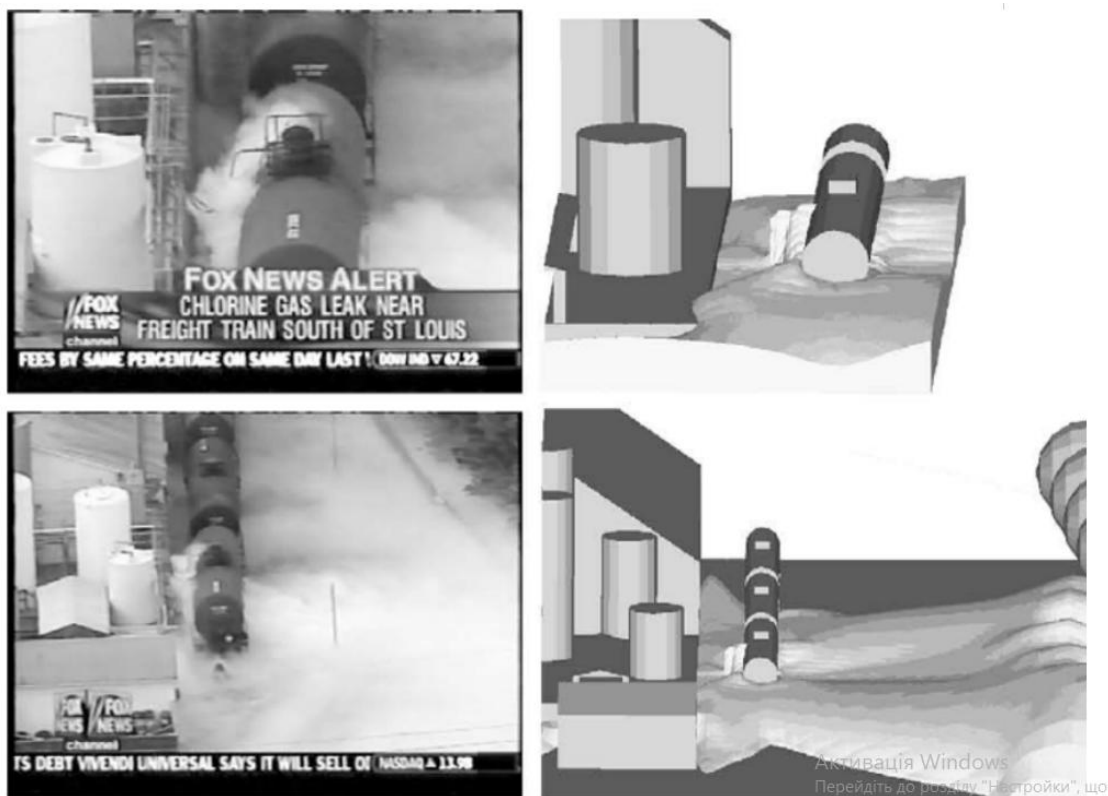


Рис. 3 CFD-моделювання поширення хлору внаслідок витоку із залізничних цистерн у промисловій зоні

Використання CFD-моделей (ANSYS Fluent, OpenFOAM, COMSOL, FLACS CFD) стає критично важливим для аналізу таких сценаріїв, оскільки вони дозволяють [15]:

- враховувати складну геометрію залізничних вузлів та навколишньої забудови;
- моделювати поширення хімічних хмар з урахуванням впливу вибухів та пожеж;

- прогнозувати поведінку токсичних речовин при руйнуванні декількох цистерн одночасно;
- визначати оптимальні місця для встановлення бар'єрів, нейтралізаторів та систем локалізації витоку.

Для перевірки працездатності запропонованої моделі оцінки ризиків проведено апробацію на умовному сценарії ураження залізничної станції під час воєнних дій.

Первинною подією вважається пошкодження цистерни з аміаком унаслідок артилерійського обстрілу, що спричиняє витік і формування токсичної хмари. Вторинні наслідки охоплюють займання суміжних вагонів, вибухи та ураження персоналу.

Ймовірність розвитку каскадної події визначалась за спрощеною стохастичною залежністю:

$$P_{ij} = f(t, R, \Delta),$$

де: t – час реагування, R – рівень доступності ресурсів, Δ – ступінь пошкодження інфраструктури.

Для базового сценарію прийнято $R=0,9$, $\Delta=0,1$; для воєнного – $R=0,6$, $\Delta=0,4$.

Табл. 3. Імовірність розвитку каскадної події залежно від часу реагування

Час реагування, хв	Базовий сценарій	Воєнні умови
10	0,12	0,24
20	0,18	0,38
30	0,25	0,52
40	0,31	0,66
50	0,36	0,74

Отримані результати подано на графіку (рис. 4). Збільшення часу реагування підрозділів цивільного захисту суттєво підвищує імовірність розвитку каскадної аварії. У воєнних умовах при тому самому часовому лагу ризик катастрофічного розвитку зростає майже вдвічі, що пояснюється обмеженням доступу до місця події, пошкодженням комунікацій та повторними атаками.

Графік демонструє залежність імовірності каскадного розвитку аварії від часу реагування для двох сценаріїв – базового (мирного) та воєнного. У мирних умовах імовірність зростає повільно і стабілізується при 0,36, тоді як у воєнних умовах через затримку реагування, повторні атаки та руйнування інфраструктури вона збільшується до 0,74. Це підтверджує адекватність моделі та її здатність кількісно відображати вплив додаткових воєнних факторів на рівень ризику.

Апробація підтвердила, що модель адекватно відображає вплив воєнних факторів на динаміку ризику і може бути використана для:

- прогнозування каскадних ефектів при ураженні об'єктів із небезпечними речовинами;
- оптимізації часу реагування та ресурсного забезпечення підрозділів ДСНС;
- підтримки рішень щодо розподілу сил у кризових умовах.

7. Обговорення результатів дослідження комплексного підходу до моделювання ризиків аварій

Залізничний транспорт відіграє роль базового елемента національної та транспортної інфраструктури, забезпечуючи масові перевезення пасажирів та вантажів. У контексті цивільної безпеки залізничний транспорт є критично важливим елементом національної та транспортної інфраструктури, забезпечуючи масові перевезення пасажирів та вантажів. У контексті цивільної безпеки залізничний транспорт є критично важливим елементом національної та транспортної інфраструктури, забезпечуючи масові перевезення пасажирів та вантажів.

сажирів і вантажів, логістику критично важливих матеріалів та безперебійну роботу економіки. У світовій практиці залізниці традиційно використовуються для перевезення важких і об'ємних вантажів (паливо, сировина, техніка), організації евакуаційних потоків у надзвичайних ситуаціях, а також для оперативного переведення військових підрозділів і матеріально-технічного забезпечення. Завдяки великій пропускній спроможності, економічній ефективності і відносній стійкості до погодних умов, залізничний коридор є ключовим ресурсом у забезпеченні життєздатності держави в мирний і кризовий період. В умовах збройного конфлікту значення залізничної інфраструктури додатково зростає: вона стає головною магістраллю для постачання пального, боєприпасів, медичного забезпечення та гуманітарних вантажів, а також – основним каналом евакуації цивільного населення. Одночасно війна підвищує вразливість залізничної мережі: цілеспрямовані удари, атаки безпілотних літальних апаратів і диверсійні дії поцільно спрямовані на критичні вузли – депо, мости, тунелі, станції й склади з небезпечними вантажами. Особливу тривогу викликають удари по цистернам із паливно-мастильними матеріалами та небезпечними хімічними речовинами: такі інциденти здатні породити каскадні сценарії – масштабні пожежі й вибухи, викиди токсичних хмар, довготривале забруднення довкілля та параліч логістичних ланцюгів на регіональному рівні.

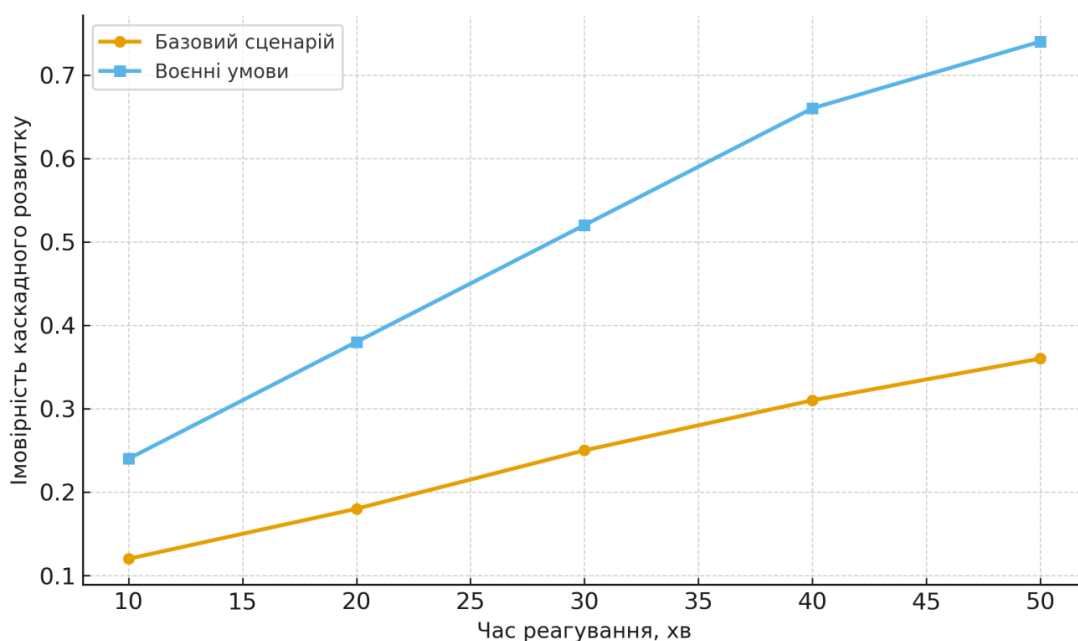


Рис. 4. Ймовірність розвитку каскадної аварії залежно від часу реагування в базових та воєнних умовах

В умовах повномасштабної війни ризики для залізничного транспорту в Україні вже не є лише теоретичними, а підтверджені реальними інцидентами. Зокрема:

- удари по цистернах з небезпечними вантажами, які призводили до пожеж та загрози масштабних хімічних уражень населення поблизу;
- пожежі на нафтобазах і складах пального (Кременчук, Калинівка, Львівщина), що супроводжувалися вибухами та тривалим горінням, створюючи високий рівень токсичного забруднення атмосфери;
- атаки FPV-дронів по залізничних вузлах та станціях, які викликали локальні вибухи й руйнування інфраструктури, паралізуючи рух та ускладнюючи евакуаційні операції;

- диверсійні акти на коліях і мостах, що, у поєднанні з транспортуванням НХР, підвищували ймовірність каскадних аварій – від пожежі чи вибуху до масштабного витоку токсичних речовин.

Ці події демонструють, що у сучасних умовах ризику пожеж, вибухів і хімічних аварій мають не лише техногенний, а й воєнний характер. Їхні наслідки виходять за межі локальної небезпеки та створюють загрозу для всієї системи цивільного захисту держави.

З огляду на вищезазначене, забезпечення пожежної та техногенної безпеки залізничного транспорту в умовах воєнного стану вимагає зміни парадигми: від активного гасіння і ліквідації наслідків – до проактивного управління ризиками, яке поєднує моніторинг руху небезпечних вантажів, превентивну маршрутизацію, підвищену захищеність критичних вузлів та інтеграцію з оперативними системами цивільного захисту й оборони. Цей підхід покликаний мінімізувати як прямі людські втрати, так і вторинні економічні та екологічні наслідки, що виникають у разі ураження залізничної інфраструктури.

За відсутності воєнних дій ризику для залізничного транспорту традиційно класифікувалися як техногенні та природні. До техногенних належали аварії на коліях (сходження з рейок, зіткнення, несправність рухомого складу), пожежі через займання пального чи коротке замикання в електросистемах, витoki небезпечних хімічних речовин із цистерн унаслідок ДТП. Природні ризики включали вплив погодних факторів (зсуви, паводки, снігові замети), які спричиняли переривання руху або аварійні ситуації. Усі ці ризики оцінювалися переважно в рамках технічної надійності й безпеки експлуатації інфраструктури.

Отримані результати математичної моделі розрахунку ризиків при аваріях на об'єктах залізничної інфраструктури під час воєнних дій свідчать, що інтеграція воєнних змінних у класичні моделі ризику суттєво підвищує точність прогнозування наслідків аварій на залізничному транспорті. Якщо у довоєнний період ключовими факторами були лише технічний стан обладнання, фізико-хімічні властивості небезпечних хімічних речовин та метеорологічні параметри, то тепер на результати значною мірою впливають воєнні дії.

Зокрема, введення змінної ймовірності впливу ворожих атак дозволяє вперше кількісно врахувати ризики, пов'язані з обстрілами, диверсіями та ударами дронів. Інші параметри, як-от додатковий обсяг викиду при руйнуванні ємностей, час реагування рятувальних служб в умовах бойових дій, швидкість розвитку пожежі та коефіцієнт мобільності підрозділів, формують комплексну систему, яка описує поведінку аварійних процесів у реаліях війни.

Практичні приклади підтверджують релевантність такого підходу. У випадку аварій техногенного характеру, наприклад, при витоку аміаку через технічну несправність, традиційні методи (локалізація, обвалування, нейтралізація) залишаються ефективними. Проте у разі цілеспрямованої атаки дрона відбувається миттєвий неконтрольований викид НХР, який супроводжується пожежами, вторинними вибухами та руйнуванням транспортної інфраструктури. Це ускладнює доступ рятувальних служб, різко скорочує час на реагування та збільшує масштаб ураження.

Використання CFD-моделювання (ANSYS Fluent, OpenFOAM, COMSOL) у поєднанні з ГІС-технологіями стає критично важливим. Такі інструменти дають можливість враховувати складну геометрію об'єктів, моделювати поширення токсичних хмар з урахуванням пожеж та вибухів, оцінювати сценарії з одночасним руйнуванням кількох цистерн, а також визначати оптимальні маршрути евакуації

й точки встановлення локалізаційних бар'єрів.

Таким чином, запропонований підхід забезпечує:

комплексність аналізу – одночасний облік техногенних і воєнних факторів;
прогнозування критичних сценаріїв – від витоків до каскадних аварій із руйнуванням інфраструктури;

оптимізацію реагування – розрахунок необхідних сил і засобів у бойових умовах.

В умовах збройного конфлікту залізничний транспорт слід розглядати не лише як інфраструктурний елемент, а як складову національної безпеки. Формування багаторівневої системи управління ризиками, яка поєднує класичні підходи з новими воєнними змінними, є критично необхідним для мінімізації втрат, захисту населення і довкілля, а також для забезпечення безперервності стратегічних перевезень у кризових умовах.

8. Висновки

1. Сформовано бібліотеку сценаріїв розвитку аварій на об'єктах залізничної інфраструктури під час воєнних дій із класифікацією механізмів виникнення, ймовірних первинних та вторинних наслідків, індикаторів аварій та заходів реагування. Бібліотеку сценаріїв розбито на 7 основних класів аварій. Запропонована нами модель каскадного сценарію демонструє, що ураження інфраструктури з небезпечними хімічними речовинами має багатоступеневий характер: від початкових деструктивних впливів (обстріли, диверсії, атаки дронів) до масштабних наслідків у вигляді вибухів, пожеж, токсичних викидів і масових уражень населення. Кожен етап супроводжується характерними ранніми індикаторами та вимагає застосування специфічних заходів реагування, що повинні бути завчасно відпрацьовані у форматі взаємодії між військовими структурами, залізничними службами, підрозділами ДСНС, медичними установами та органами влади. Встановлено, що ефективність протидії подібним надзвичайним ситуаціям визначається двома ключовими чинниками: оперативністю виявлення небезпеки та готовністю сил до координаційного реагування в умовах бойових дій. Використання бібліотеки сценаріїв дозволяє не лише прогнозувати перебіг аварій, а й розробляти адаптивні алгоритми реагування, спрямовані на зменшення людських і матеріальних втрат, забезпечення стійкості транспортної інфраструктури та підтримання гуманітарної безпеки на регіональному рівні.

2. Розроблено математичну модель розрахунку ризиків при аваріях на об'єктах залізничної інфраструктури під час воєнних дій. Встановлено, що доповнення традиційних стохастичних моделей новими змінними (інтенсивність обстрілу, ймовірність повторної атаки, затримка реагування, втрата інфраструктури, масовість атак, соціальні чинники) дозволяє сформувати більш адекватну систему оцінки ризиків. Це забезпечує врахування як техногенних, так і військових факторів, які суттєво впливають на динаміку розвитку аварій. Модифікація формули ризику та моделей розсіювання показала, що навіть за однакових обсягів небезпечних хімічних речовин масштаби ураження у воєнних умовах можуть зростати у 1,89 разів. При цьому ймовірність атаки прийнята 0,3 у порівнянні із 0,002 на випадок технічної несправності у мирний час. Це пояснюється як руйнуванням цистерн під час обстрілів, так і появою додаткових джерел забруднення (продукти горіння, вторинні вибухи). Використання обчислювальної гідродинаміки у поєднанні з геоінформаційними системами дозволяє більш точно прогнозувати по-

ширення токсичних хмар, враховувати складну інфраструктуру залізничних вузлів, моделювати каскадні сценарії та формувати науково обґрунтовані рішення щодо евакуації населення, локалізації викидів та оптимізації залучення сил цивільного захисту. Проведена апробація моделі на умовному сценарії підтвердила її працездатність та аналітичну чутливість до зміни зовнішніх факторів, що забезпечує її практичне застосування для оцінювання каскадних ризиків у воєнних умовах.

Запропонована нами математична модель є кроком до створення інтегрованої системи управління ризиками, яка здатна забезпечити стратегічну стійкість залізничного транспорту в умовах воєнного часу.

Література

1. Kriachko K., Chupryna O., Maksymov S., Shapoval G., Vdovychenko V., Popova Y. The strategic planning of transport infrastructure and management of logistics solutions in conditions of war. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*. 2024. Vol. 14. Issue. 1. P. 225–230. doi: 10.33543/j.140141.225230
2. Butnariu M., Bonciu E. *Assessment of Some Hazards Associated with Dangerous Chemicals*. 1st ed. Boca Raton; London; New York; Delhi: Apple Academic Press. 2022. Chapter 1. P. 37. doi: 10.1201/9781003277279-1
3. Capra G. S. *Protecting Critical Rail Infrastructure: The Vulnerability of the United States Railroad System to Terrorist Attacks*. Washington, D.C.: U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs; USAF Counterproliferation Center, 2006, NCJ Report № 221986. P. 57. URL: <https://www.ojp.gov/ncjrs/virtual-library/abstracts/protecting-critical-rail-infrastructure>
4. Бондаренко Н. Вплив військової логістики на сучасні війни. Політ. Сучасні проблеми науки. Військова освіта та наука: Нац. авіац. ун-т. Київ: НАУ. 2024. С. 280–281. URL: <http://polit.nau.edu.ua>
5. Liu X., Turla T., Zhang Z. Accident-Cause-Specific Risk Analysis of Rail Transport of Hazardous Materials. *Transportation Research Record*. 2018. Vol. 2672(10). P. 176–187. doi: 10.1177/0361198118794532
6. Nowakowski T., Mlynczak M., Jodejko-Pietruczuk A., Werbinska-Wojciechowska S. *Safety and Reliability: Methodology and Applications* (1st ed.). CRC Press. 2014. P. 408. doi: 10.1201/b17399
7. Kriachko K., Chupryna O., Maksymov S., Shapoval H., Vdovychenko V., Popova Y. The Strategic Planning of Transport Infrastructure and Management of Logistics Solutions in Conditions of War. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*. 2024. Vol. 1. P. 225–230. doi: 10.33543/j.140141.225230
8. Yazdani M., Pamucar D., Chatterjee P., Chakraborty S. Development of a decision support framework for sustainable freight transport system evaluation using rough numbers. *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 58(14). P. 4325–4351. doi: 10.1080/00207543.2019.1651945
9. Bernatik A., Rehak D., Cozzani V., Foltin P., Valasek J., Paulus F. Integrated Environmental Risk Assessment of Major Accidents in the Transport of Hazardous Substances. *Sustainability*. 2021. Vol. 13(21). P. 11993. doi: 10.3390/su132111993
10. Wiergowski M., Sołtyszewski I., Sein Anand J., Kaliszan M., Wilmanowska J., Jankowski Z., Łukasik M. Difficulties in interpretation when assessing prolonged and subacute exposure to the toxic effects of chlorine. *J Forensic Legal Med*. 2018. Vol. 58. P. 82–86. doi: 10.1016/j.jflm.2018.05.003

11. Мельник О. Г., Мельник Р. П. Вивчення питання хімічної небезпеки під час воєнного конфлікту. Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України. Харків: ХНУВС. 2024. С. 150–154. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/>

12. Бедрій Я., Тарнавський Є. Військова логістика. 2024. С. 349. URL: <https://jurkniga.ua/contents/viyskova-logistika.pdf>

13. Репіч Т. А., Турчина М. П. Проблеми та перспективи України як транзитної держави у післявоєнний час. Ефективна економіка. 2023. № 9. С. 24–49. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/73292a2f-9d13-4eb7-bfc2-957e923ed0c2/content#page=24>

14. Young R. R., Gordon G. A., Plant J. F. Railway Security: Protecting Against Manmade and Natural Disasters. Routledge. 2017. P. 224. doi: 10.4324/9781315155296

15. Xin B., Yu J., Dang W. et al. Dynamic characteristics of chlorine dispersion process and quantitative risk assessment of pollution hazard. Environ Sci Pollut Res. 2021. Vol. 28. P. 46161–46175. doi: 10.1007/s11356-020-11864-z

Kurilo A., PhD, Senior Researcher of the Research Laboratory

M. Kustov, DSc, Professor, Head of Research Laboratory

Zimin S., Scientific Researcher of the Research Laboratory

Hubenko A., Head of Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

MODELING THE RISKS OF CASCADE ACCIDENTS IN RAIL TRANSPORT UNDER WAR CONDITIONS

The study aims to improve the resilience of rail transport during the transportation of hazardous chemicals in conditions of martial law. The work provides a comprehensive analysis of current risks to rail infrastructure, compares threats in peacetime and wartime, and identifies key accident scenarios. A library of cascading accident scenarios has been developed, and modified models for assessing risks and the spread of toxic emissions have been proposed, taking into account specific factors of wartime. To improve the accuracy of forecasting, the use of CFD modeling is proposed. The need for this work lies in the fact that classical risk models, effective in peacetime, do not take into account the new nature of threats – targeted attacks, shelling, and sabotage. Rail transport, being critical infrastructure, has become a target for the enemy, and an accident involving hazardous chemicals can lead to catastrophic consequences: large-scale fires, explosions, toxic emissions, and cascading accidents. It has been established that the effectiveness of countermeasures is determined by the speed of hazard detection and readiness for coordinated action in combat conditions. Classic risk assessment models no longer fully reflect the new reality, where deliberate hostile actions are the main factor in accidents. The results obtained and the models developed form the basis for the transition from reactive to proactive risk management. They make it possible to develop adaptive response plans and action algorithms for rescue services, implement preventive routing of dangerous goods and reinforce critical nodes, as well as create an integrated risk management system. This is aimed at minimizing human casualties, environmental damage, and the strategic consequences of infrastructure damage, ensuring the resilience of the country's transport system in a state of martial law.

Keywords: railway transport, critical infrastructure, cascade accidents, wartime risks

References

1. Kriachko, K., Chupryna, O., Maksymov, S., Shapoval, G., Vdovychenko, V., Popova, Y. (2024). The strategic planning of transport infrastructure and management of logistics solutions in conditions of war. AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research, 14(1), 225–230. doi: 10.33543/j.140141.225230

2. Butnariu, M., Bonciu, E. (2022). Assessment of Some Hazards Associated with

Dangerous Chemicals. 1st ed. Boca Raton; London; New York; Delhi: Apple Academic Press, 1, 37. doi: 10.1201/9781003277279-1

3. Capra, G. S. (2006). Protecting Critical Rail Infrastructure: The Vulnerability of the United States Railroad System to Terrorist Attacks. Washington, D.C.: U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs; USAF Counterproliferation Center, 221986, 57. Available at: <https://www.ojp.gov/ncjrs/virtual-library/abstracts/protecting-critical-rail-infrastructure>

4. Bondarenko, N. (2024). The Impact of Military Logistics on Modern Warfare. Politics. Contemporary Issues in Science. Military Education and Science: National Aviation University. Kyiv: NAU, 280–281. Available at: <http://polit.nau.edu.ua>

5. Liu, X., Turla, T., Zhang, Z. (2018). Accident-Cause-Specific Risk Analysis of Rail Transport of Hazardous Materials. Transportation Research Record, 2672(10), 176–187. doi: 10.1177/0361198118794532

6. Nowakowski, T., Mlynczak, M., Jodejko-Pietruczuk, A., Werbinska-Wojciechowska, S. (2014). Safety and Reliability: Methodology and Applications (1st ed.). CRC Press, 408. doi: 10.1201/b17399

7. Kriachko, K., Chupryna, O., Maksymov, S., Shapoval, H., Vdovychenko, V., Popova, Y. (2024). Solutions in Conditions of War. AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research, 1, 225–230. doi: 10.33543/j.140141.225230

8. Yazdani, M., Pamucar, D., Chatterjee, P., Chakraborty, S. (2019). Development of a decision support framework for sustainable freight transport system evaluation using rough numbers. International Journal of Production Research, 58(14), 4325–4351. doi: 10.1080/00207543.2019.1651945

9. Bernatik, A., Rehak, D., Cozzani, V., Foltin, P., Valasek, J., Paulus, F. (2021). Integrated Environmental Risk Assessment of Major Accidents in the Transport of Hazardous Substances. Sustainability, 13(21), 11993. doi: 10.3390/su132111993

10. Wiergowski, M., Sołtyszewski, I., Sein Anand, J., Kaliszan, M., Wilmanowska, J., Jankowski, Z., Łukasik, M. (2018). Difficulties in interpretation when assessing prolonged and subacute exposure to the toxic effects of chlorine. J Forensic Legal Med. 58, 82–86. doi: 10.1016/j.jflm.2018.05.003

11. Melnik, O. G., Melnik, R. P. (2024). Study of chemical hazards during military conflicts. Current issues in the activities of Ukraine's security and defense sector. Kharkiv: Kharkiv National University of Internal Affairs, 150–154. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/>

12. Bedriy, Y., Tarnavskiy, E. (2024). Military Logistics, 349. Available at: <https://jurkniga.ua/contents/viyskova-logistika.pdf>

13. Repich, T. A., Turchyna, M. P. (2023). Problems and prospects of Ukraine as a transit country in the post-war period. Effective Economy, 9, 24–49. Available at: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/73292a2f-9d13-4eb7-bfc2-957e923ed0c2/content#page=24>

14. Young, R. R., Gordon, G. A., Plant, J. F. (2017). Railway Security: Protecting Against Manmade and Natural Disasters. Routledge, 224. doi: 10.4324/9781315155296

15. Xin, B., Yu, J., Dang, W. et al. (2021). Dynamic characteristics of chlorine dispersion process and quantitative risk assessment of pollution hazard. Environ Sci Pollut Res, 28, 46161–46175. doi: 10.1007/s11356-020-11864-z

Надійшла до редколегії: 13.09.2025

Прийнята до друку: 19.10.2025