

УДК 351.861

К. А. Афанасенко, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-1877-1551)

С. І. Головченко, к.е.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-6782-5221)

О. М. Григоренко, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-4629-1010)

Т. В. Костенко, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0001-9426-8320)

О. О. Іваненко, PhD, доц. каф. (ORCID 0009-0006-8566-0084)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ОЦІНКА УРАЖЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИМИ ЧИННИКАМИ ВИБУХУ ЯК КІЛЬКІСНИЙ КРИТЕРІЙ УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ

Розроблено науково-методичний підхід до оцінки ураження людей небезпечними чинниками вибуху боєприпасів як кількісного критерію управління ризиком для об'єктів цивільного захисту та критичної інфраструктури в умовах збройної агресії проти України. Показано, що чинна практика безпеки переважно ґрунтується на детерміністичних підходах («безпечний – небезпечний»), що призводить до суб'єктивних рішень щодо захисних відстаней, укриттів та підсилення конструкцій. Запропоновано інтегрований показник індивідуального ризику тяжкого або летального ураження, який поєднує частоту реалізації сценарію, імовірність перебування людини в зоні впливу та умовну імовірність ураження. Умовну імовірність ураження визначено на основі пробіт-аналізу для первинних і третинних механізмів (ураження легень, удар головою та тілом) та стохастичної моделі з урахуванням нерівномірного просторового розподілу уламків для вторинних механізмів. Систематизовано моделі оцінки кожного механізму ураження. Розроблено схему використання запропонованого критерію для зонування територій, вибору захисних заходів та оцінки залишкового ризику після їх впровадження. Показано, що підхід повністю сумісний з вимогами Кодексу цивільного захисту України, Закону «Про критичну інфраструктуру» та підзаконних актів МВС України. Обґрунтовано переваги та обмеження методу, зокрема необхідність калібрування емпіричних коефіцієнтів під сучасні боєприпаси та врахування неоднорідності поля уламків. Результати дослідження дозволяють перейти від якісних оцінок безпеки до кількісного ризик-орієнтованого управління безпекою об'єктів критичної інфраструктури. Практичне застосування критерію демонструє можливість кількісного обґрунтування пріоритетності захисних заходів та оцінки їх ефективності через відносне зниження ризику, що особливо актуально для об'єктів енергетики та транспорту в умовах сучасних загроз.

Ключові слова: критерій управління ризиком, вибух, пробіт-аналіз, індивідуальний ризик, механізми ураження

1. Вступ

Сучасні умови збройної агресії проти України суттєво змінили підхід до безпеки об'єктів енергетики, транспорту, зв'язку, промисловості, складів матеріальних резервів та житлової забудови. Для таких об'єктів загроза вибухового ураження більше не може розглядатися як поодинокий або виключно військовий чинник. Вона має прямий зв'язок із завданнями цивільного захисту, стійкості критичної інфраструктури та безперервності надання життєво важливих послуг населенню. Кодекс цивільного захисту України визначає правову основу захисту населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій, а законодавство у сфері критичної інфраструктури прямо орієнтує операторів на системне управління ризиками безпеки [1, 2].

На рівні підзаконного регулювання ця логіка деталізована ще жорсткіше. Порядок управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру та пожеж визначає завдання й загальні вимоги до організації процесів управління ризиками, а Методика оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру та пожеж прямо встановлює, що оцінювання ризиків є складовою процесу управління ризиками та здійснюється для отримання

інформації, необхідної для прийняття обґрунтованих управлінських рішень [3, 4]. Окремо слід враховувати Порядок проведення зонування територій за результатами визначення рівнів ризиків, а також нові вимоги щодо управління ризиками безпеки на об'єктах критичної інфраструктури першої категорії критичності [5, 6].

Однак у чинній практиці безпеки спостерігається методична проблема. Рішення щодо захисних відстаней, пріоритетності укриття, локального підсилення конструкцій, маршрутизації персоналу та розміщення резервних функціональних вузлів часто приймаються на основі загальних уявлень про небезпеку вибуху, а не на основі кількісно визначеного показника ураження. У результаті порівняння різних варіантів управлінських рішень у процесі їх реалізації стає суб'єктивним, а оцінка ефективності вже впроваджених заходів – неповною.

Саме тому актуальним питанням є вибір критерію управління ризиком, що поєднує фізичні параметри вибуху, просторовий розподіл персоналу (населення) та імовірнісний характер наслідків. Таким критерієм може бути не саме значення надлишкового тиску чи кількість уламків, а імовірність тяжкого або летального ураження людини, що інтегрована в показник ризику. Як наслідок, оцінка ураження перетворюється на кількісну основу управління, що дає змогу ранжувати сценарії, обирати доцільні захисні заходи й оцінювати залишковий ризик після їх впровадження.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз сучасних наукових літературних джерел, присвячених імовірнісним підходами до оцінки ризиків, показав, що імовірнісні моделі умовно можна поділити на три групи: 1 – загальні імовірнісні моделі (пробіт-аналіз), 2 – моделі первинних, вторинних і третинних механізмів ураження людини, 3 – моделі уламкового ураження.

Для першої групи моделей пробіт-аналіз розглядається як стандартний інструмент перетворення фізичного навантаження в імовірність ураження або руйнування [7]. Типове рівняння має вигляд:

$$Pr = a + b \cdot \ln V, \quad (1)$$

де Pr – пробіт-змінна; a, b – емпіричні коефіцієнти, що специфічні для кожного типу ураження; V – причинний фактор, що може бути функцією надлишкового тиску, імпульсу, швидкості уламка або їх комбінації [8; 9]. Після визначення Pr імовірність відповідного наслідку визначається через функцію нормального розподілу. Технічний звіт [8] показує, що саме пробіт-моделі є найпридатнішими для впровадження в інструменти оцінювання ризику, особливо коли необхідно побудувати криві вразливості для людей чи споруд.

Друга група робіт досліджує ураження людини первинними, вторинними та третинними механізмами вибуху. До первинних механізмів належать наслідки дії повітряної ударної хвилі на органи, чутливі до перепаду тиску, передусім легень та орган слуху. За даними [8] і робіт, використаних у дослідженні P. Russo [9], летальне ураження легень описується моделлю, що одночасно враховує ефективний тиск і масштабований імпульс, а розрив барабанної перетинки – моделлю, яка визначається насамперед піковим тиском [8, 9]. Важливо, що для короткотривалих швидко зростаючих навантажень летальна шкода для легень істотно залежить не лише від тиску, а й від тривалості позитивної фази.

Третинні механізми пов'язані з переміщенням людини вибуховою хвилею та подальшим ударом об жорстку перешкоду. Для таких випадків у літературі застосовують комбіновані функції від надлишкового тиску та імпульсу, зокрема моделі для смертельних наслідків від удару головою та удару всім тілом [9]. Отже, навіть коли первинна дія хвилі не досягає рівня летальності, управлінське рішення не може ґрунтуватися лише на одному параметрі тиску.

Окремий великий блок становлять роботи з оцінювання уламкового ураження. Автори у роботі [7] показали, що ризик втрат від первинної фрагментації боєприпасів має виразний стохастичний характер і визначається не тільки масою та швидкістю уламків, а й їх розподілом, щільністю поля уламків та імовірністю влучання в людину. У дослідженнях [10, 11] і у технічному звіті [8] наведено підходи до моделювання масово-швидкісних характеристик уламків, логістичні та пробітні залежності для пробиття шкіри, а також підхід до оцінки імовірності влучання через закон Пуассона. Це особливо важливо для об'єктів критичної інфраструктури, де уламковий фактор часто зумовлює більші втрати обладнання й персоналу, ніж дія лише повітряної ударної хвилі.

У свою чергу, UFC 3-340-02 [12] розширюють та доповнюють цей блок даними щодо вразливості людини до короткотривалих навантажень, впливу орієнтації тіла, характеру фронту хвилі та ролі відбивальних поверхонь. Для швидкозростаючих короткотривалих навантажень у документі наведено орієнтовні межі початку ураження легень і барабанних перетинок, а також показано, що вплив уламків необхідно розглядати як окремий і часто більш небезпечний чинник [12].

Разом з тим аналіз літератури показує суттєву прогалину. Більшість робіт або зосереджені на окремому механізмі ураження [8, 10], або вирішують завдання оцінки захищеності конструкцій [12, 13], або оцінюють безпеку техногенних вибухів [9, 12]. Для практики цивільного захисту в умовах сучасних ударів по критичній інфраструктурі потрібна інтегрована схема, де оцінка ураження людей небезпечними чинниками вибуху боєприпасів безпосередньо використовується як критерій управління ризиком. Інакше кажучи, необхідно перейти від відповіді на питання «яке навантаження виникає?» до відповіді на питання «який ризик це навантаження створює для людини і які рішення повинні бути прийняті?».

Отже, невирішеною частиною проблеми є відсутність єдиного кількісного критерію, який би безпосередньо поєднував фізичні параметри вибуху, просторову експозицію людей та умовну імовірність тяжкого або летального ураження і міг використовуватися як практичний інструмент управління ризиком для об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розроблення науково-методичного підходу до оцінки ураження небезпечними чинниками вибуху боєприпасів як критерію управління ризиком для об'єктів цивільного захисту та критичної інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

1) Розробити інтегрований кількісний показник індивідуального ризику ураження людини на основі пробіт-аналізу та стохастичної моделі уламкового ураження.

2) Дослідити вплив параметрів ураження на управлінські рішення та обґрунтувати схему практичного застосування запропонованого критерію для зонування територій, вибору захисних заходів і оцінки залишкового ризику.

4. Матеріали та методи дослідження

Матеріалами дослідження були чинні нормативно-правові акти України у сфері цивільного захисту, управління ризиками та захисту критичної інфраструктури [1–6], а також наукові літературні джерела, присвячені пробіт-аналізу, моделюванню вибухових навантажень, уламкового ураження та оцінці шкоди людям і спорудам [7–13].

У роботі використано такі методи: аналіз і синтез літературних даних; порівняльний аналіз моделей ураження людини; формалізація показників ризику; елементи сценарійного підходу; логіко-аналітичне узагальнення результатів. Методична схема дослідження включала чотири послідовні етапи: ідентифікацію сценаріїв, оцінку параметрів небезпечних чинників вибуху, перетворення цих параметрів у ймовірність ураження та інтеграцію отриманого результату в управлінський критерій.

Відповідно до національної методики оцінювання ризиків надзвичайних ситуацій, кількісні методи повинні забезпечувати отримання інформації для прийняття обґрунтованих рішень щодо зменшення ризику [4]. Отже, обраний у роботі показник має не описовий, а прикладний характер: він повинен бути чутливим до зміни інженерних і організаційних заходів, придатним для порівняння альтернативних сценаріїв та сумісним із процедурою зонування території [3–5].

Базовим імовірнісним принципом дослідження є відокремлення: а) частоти або інтенсивності реалізації сценарію; б) імовірності перебування людини в зоні дії чинника; в) умовної імовірності ураження за умови реалізації сценарію та наявності людини у відповідній точці простору. Такий підхід відповідає логіці кількісного аналізу ризику, де ризик є не просто характеристикою безпеки, а інтегрованою функцією «сценарій – експозиція – наслідок» [9].

5. Розробка критерію оцінки ураження як інструменту управління ризиком

Для практики управління ризиком пропонується використовувати не окремі фізичні параметри вибуху, а інтегрований показник індивідуального ризику тяжкого або летального ураження людини (R_{ind}). Узагальнено його можна подати як

$$R_{ind} = \sum f_j \cdot P_{exp,j} \cdot P_{u,j}, \quad (2)$$

де f_j – частота або інтенсивність реалізації j -го сценарію; $P_{exp,j}$ – імовірність перебування людини в зоні впливу під час реалізації сценарію; $P_{u,j}$ – умовна імовірність тяжкого або летального ураження людини небезпечними чинниками вибуху за цим сценарієм. Саме величина $P_{u,j}$ є центральною для цього дослідження, оскільки вона поєднує фізичні характеристики навантаження з вразливістю людини.

У разі летального ураження легень (первинний механізм ураження) як причинний фактор доцільно враховувати ефективний тиск p_{eff} і масштабований імпульс I_{sc} . На основі узагальнень, наведених у [8] та роботі P. Russo [9], можна використати наступну залежність:

$$Pr_{fi} = 5 - 5,74 \cdot \ln \left(\frac{4,2 \cdot p_0}{p_{eff}} + \frac{1,3}{I_{sc}} \right), \quad (3)$$

де p_0 – атмосферний тиск, Па; p_{eff} – ефективний тиск, що є сумою пікового над-

лишкового тиску p_s та пікового тиску від високошвидкісного потоку повітря, що рухається безпосередньо за фронтом ударної хвилі, Па; I_{sc} – масштабований імпульс, що залежить від позитивного імпульсу хвилі та маси людини [8, 9]. Безпосередньо ймовірність летального ураження легень P_{fi} може бути визначена через кумулятивну функцію розподілу стандартного нормального розподілу.

Для вторинних механізмів, пов'язаних з уламками, умовну ймовірність тяжкого або летального ураження P_{frag} пропонується визначати як добуток ймовірності влучання уламка в людину (P_{hit}) та умовної ймовірності критичного ураження за умови влучання ($P_h(c)$) [7]:

$$P_{frag} = P_{hit} \cdot P_h(c), \quad (4)$$

де P_{hit} – ймовірність влучання; $P_h(c)$ – умовна ймовірність критичного наслідку (criticality) за умови влучання (hit). У найпростішому випадку P_{hit} для відкритої місцевості та рівномірного кутового розподілу уламків може бути оцінена за законом Пуассона. Згідно з оглядом [8], густина поля уламків q на відстані R_{so} становить:

$$q = \frac{N}{2\pi \cdot R_{so}^2}, \quad (5)$$

де N – кількість фрагментів (уламків), що утворюється під час вибуху, од. Тоді середня кількість влучань λ у людину з приведеною площею S_{body} дорівнює $\lambda = q \cdot S_{body}$, а ймовірність хоча б одного влучання P_{hit} визначається як:

$$P_{hit} = 1 - \exp(-\lambda) = 1 - \exp\left(-\frac{N \cdot S_{body}}{2\pi \cdot R_{so}^2}\right). \quad (6)$$

Якщо деталізованих даних про масово-швидкісний розподіл уламків немає, саме P_{hit} дає корисну мінімальну оцінку просторової небезпеки та дозволяє виділяти зони пріоритетного укриття й технічного екранування.

Для наслідків переміщення людини вибуховою хвилею та подальшого удару головою Pr_{head} або тілом Pr_{body} об перешкоду (третинний механізм ураження) використовується комбінація надлишкового тиску p_s та імпульсу I , відповідно [9, 14]:

$$Pr_{head} = 5 - 8,49 \cdot \ln\left(\frac{2430}{p_s} + \frac{4 \times 10^8}{p_s \cdot I}\right), \quad (7)$$

$$Pr_{body} = 5 - 2,44 \cdot \ln\left(\frac{7380}{p_s} + \frac{1,3 \times 10^9}{p_s \cdot I}\right), \quad (8)$$

де I – позитивний імпульс хвилі, Па·с.

Ймовірність летального ураження при переміщенні людини вибуховою хвилею та подальшого удару головою P_{head} або тілом P_{body} об перешкоду, як і у випадку летального ураження легень, може бути визначена через кумулятивну функцію розподілу стандартного нормального розподілу.

З управлінської точки зору ці моделі важливі тим, що вони дозволяють відмовитися від грубого підходу «безпечний – небезпечний» і перейти до неперервної шкали ймовірності шкоди. Це дає можливість не лише виявити зони високого ризику, а й ранжувати ділянки території та групи персоналу за величиною очікуваної втрати безпеки.

У разі наявності кількох незалежних або квазінезалежних механізмів ураження сумарну умовну ймовірність тяжкого або летального наслідку доцільно оцінювати як:

$$P_{u,\Sigma} = 1 - \prod (1 - P_{u,k}), \quad (9)$$

де $P_{u,k}$ – умовні ймовірності для окремих механізмів: ураження легенів P_{fi} , удару головою P_{head} , переміщення всього тіла P_{body} , уламкового ураження P_{hit} тощо. Така схема не заперечує можливого статистичного зв'язку між механізмами, але для інженерно-управлінських розрахунків на ранньому етапі дає корисну верхню оцінку інтегральної небезпеки.

На відміну від суто детерміністичного підходу, де рішення прив'язується до одного граничного значення тиску або однієї захисної відстані, запропонований критерій дозволяє оцінити ефект кожного заходу в термінах зменшення ризику. Наприклад, екран або захисна стінка зменшує P_{hit} і $P_h(c)$, підсилення огорожувальних конструкцій зменшує ймовірність вторинних фрагментів, а зміна маршруту руху персоналу або режиму перебування зменшує P_{exp} . Отже, управління ризиком можна вести не декларативно, а через контроль конкретних множників у формулі (2).

6. Дослідження впливу параметрів ураження на управлінські рішення

Проведений аналіз показує, що для об'єктів критичної інфраструктури визначальними є не стільки максимальні значення окремих факторів, скільки конфігурація простору, наявність відбивальних поверхонь, тип забудови та режим перебування людей. Одна й та сама вибухова подія може створювати різні профілі ризику: у відкритому просторі домінує спадання надлишкового тиску та зменшення щільності уламків із відстанню, тоді як у обмежених просторах, біля фасадів, у вузьких проходах і поблизу жорстких перешкод різко зростає роль відбитої хвилі й вторинних фрагментів [8, 12].

Для управлінських рішень це означає, що карта загроз і ризиків повинна будуватися не як набір концентричних зон однакової природи, а як поле неоднорідного ризику. Ділянка, що має нижчий рівень надлишкового тиску, може виявитися небезпечнішою за рахунок більшої ймовірності влучання уламків або руйнування слабких огорожувальних конструкцій. Такий висновок збігається з даними робіт про фрагментаційне ураження, де показано, що уламки часто мають домінуючий внесок у втрати на певних відстанях від епіцентру [7, 10, 13].

Важливим є й те, що окремі механізми ураження по-різному впливають на

різні групи людей. Для персоналу, який перебуває у виробничих приміщеннях, більшу роль можуть мати уламки скла, елементів технологічного обладнання та вторинні фрагменти огорожувальних конструкцій. Для людей на відкритій території більш істотним є поєднання прямої дії повітряної ударної хвилі та первинних уламків корпусу боєприпасу. Для маломобільних осіб і людей у місцях масового перебування критичним стає час на переміщення до укриття, який опосередковано входить до величини P_{exp} у формулі (2).

Окремої уваги потребує вплив конструктивних характеристик будівель. У роботі P. Russo [9] показано, що для споруд різного типу однакове поєднання надлишкового тиску та імпульсу може означати принципово різні рівні пошкодження, а отже – різний рівень непрямого ризику для людей усередині. У цьому контексті інженерна оцінка повітряної ударної хвилі не повинна відділятися від оцінки стійкості конструкцій. Якщо споруда або окремий елемент переходить у граничний стан, управлінське рішення має враховувати не лише P_u від повітряної хвилі, а й додаткову складову ризику від вторинних уражальних факторів.

Практично це означає потребу в поєднанні моделей на основі пробіт-функцій для людини з діаграмами «тиск – імпульс» для будівельних елементів і з моделями проникнення уламків у захисні конструкції. Технічні звіти [8, 12] та суміжні джерела дозволяють побудувати такий зв'язок на рівні інженерної постановки задачі. Якщо точка параметрів навантаження лежить у зоні ймовірного пошкодження конструкції, то для людей усередині приміщення необхідно вводити додатковий коригувальний множник до $P_{u,\Sigma}$, який відображає ефект вторинної небезпеки. Це і є перехід від ізольованої оцінки небезпечного фактора до повноцінного управління ризиком.

Для верифікації управлінської доцільності запропонованого критерію слід розглянути, як на нього впливають типові групи заходів: просторові, інженерні та організаційні. Просторові заходи змінюють відстань до джерела і конфігурацію маршруту, отже безпосередньо впливають на p_s , I та P_{hit} . Інженерні заходи – захисні стінки, екрани, укриття, локальне підсилення вузлів, плівки на склінні, протиуламкові панелі – зменшують ефективний тиск у контрольній точці, ймовірність пробиття та ймовірність утворення вторинних фрагментів. Організаційні заходи – режими перебування, обмеження доступу, пріоритетне укриття, резервування функцій, зміна щільності персоналу – впливають насамперед на P_{exp} . Таким чином, усі три групи заходів можуть бути зіставлені в єдиній шкалі зменшення R_{ind} .

Додатковою перевагою критерію є можливість порівнювати різні сценарії не за потужністю вибуху, а за очікуваними наслідками для людини. Це принципово важливо для критичної інфраструктури. Наприклад, сценарій із меншою енергією вибуху, але з реалізацією у зоні високої щільності перебування персоналу або поблизу скляних фасадів може бути пріоритетнішим для запобігання, ніж сценарій вибуху більшої потужності в технічній зоні з меншим часом перебування людини у ймовірній зоні ураження. Саме така логіка відповідає сучасному законодавчому підходу до ризик-орієнтованого управління безпекою [1–6].

Оскільки критерій побудовано на ймовірнісній основі, він придатний і для оцінювання залишкового ризику після впровадження заходів. Якщо до і після реалізації певного рішення визначити R_{ind} , то ефективність заходу можна подати через відносне зниження ризику η :

$$\eta = \frac{R_1 - R_2}{R_1}, \quad (10)$$

де R_1 – розрахункове значення ризику перед впровадженням управлінських рішень щодо його зниження; R_2 – розрахункове значення ризику після впровадження управлінських рішень щодо його зниження.

Це дозволяє перейти від загальних формулювань про «посилення безпеки» до кількісної перевірки доцільності захисних витрат. Для органів управління цивільного захисту така характеристика є важливою при плануванні заходів на територіальному рівні, а для операторів критичної інфраструктури – при обґрунтуванні пріоритетності капітальних та організаційних рішень.

7. Обговорення результатів дослідження та практичного застосування критерію в системі управління ризиком

Запропонований підхід має кілька важливих переваг. По-перше, він забезпечує сумісність із чинною українською системою управління ризиками. Нормативна база вимагає від суб'єктів безпеки не просто ідентифікувати небезпеку, а оцінювати ризики та використовувати результати для прийняття рішень [3, 4]. Тому перетворення оцінки ураження в інтегральний показник ризику є не додатковою опцією, а логічним розвитком вимог нормативної системи.

По-друге, підхід є достатньо універсальним. Його можна застосовувати як на рівні окремої будівлі, технологічного вузла чи захисної споруди, так і на рівні майданчика, кварталу або територіальної громади. Для цього не обов'язково мати високодеталізовану динамічну модель вибуху на початковому етапі. Якщо є спрощені оцінки p_s , I , N , R_{so} та характеру екранування, вже можна отримати робочий управлінський індикатор для порівняння сценаріїв. У міру накопичення даних точність оцінки підвищується без зміни логіки критерію.

По-третє, критерій добре пристосований до задач захисту людей, а не лише конструкцій. У традиційній практиці увага часто зміщується в бік стійкості будівель. Це важливо, але не завжди достатньо. Наприклад, конструкція може формально не перейти в стан повного руйнування, але уламки скла, обладнання або елементів облицювання спричинять тяжкі ураження персоналу. І навпаки, локальне пошкодження малонесучого елемента за наявності належного укриття людей може не сформувати неприйняттого ризику. Отже, вплив наслідків на людину повинен бути головною керуючою змінною.

Разом з тим необхідно визнати й обмеження. Значна частина моделей пробітних залежностей історично була отримана для промислових, експериментальних або військово-медичних сценаріїв, а не спеціально для сучасних умов ураження цивільних об'єктів боєприпасами різного типу. Тому пряме перенесення коефіцієнтів без калібрування може створювати систематичну похибку. Особливо це стосується уламкового ураження, де на результат істотно впливають форма уламка, кут удару, взаємодія з одягом, засобами індивідуального захисту та конструктивними елементами середовища [7, 8, 10].

Другою проблемою є невизначеність частоти або інтенсивності реалізації сценарію f_j для умов умисних ударів по критичній інфраструктурі. Якщо для промислових аварій існує розвинена статистика відмов і подій, то для бойових уражень показник f_j значною мірою залежить від оперативної обстановки, типу

об'єкта, його значущості, ступеня захисту та динаміки загроз. Саме тому в практиці доцільно використовувати не одну оцінку, а декілька рівнів сценарійної частоти: базовий, напружений і критичний. Це не зменшує цінності критерію, а навпаки робить його придатним для сценарійного планування.

Третьою суттєвою обставиною є залежність результатів від просторової деталізації. Для об'єктів зі складною конфігурацією, різними висотними відмітками, численними відбивальними поверхнями та внутрішніми дворами прості моделі можуть занижувати локальний ризик. Тому на об'єктах високої значущості базова аналітична схема повинна доповнюватися чисельним моделюванням, натурними спостереженнями та даними післяінцидентного аналізу. У цьому сенсі запропонований критерій варто розглядати як універсальну рамку для інтеграції різних рівнів детальності, а не як заміну всім іншим методам.

Четвертою проблемою є те, що використання широковживаного розподілу Пуассона для оцінки ймовірності влучання уламків (P_{hit}) є ефективним методом отримання консервативної мінімальної оцінки ризику, проте воно базується на припущенні про ізотропність (рівномірність) кутового розподілу фрагментів. У реальних сценаріях техногенних та військових вибухів поле осколків характеризується значною просторовою неоднорідністю, зумовленою геометричною формою джерела, нерівномірним руйнуванням оболонок та ефектами екранування навколишніми конструкціями [10, 11, 13], що потребує врахування просторових градієнтів щільності потоку уламків.

Попри зазначені обмеження, науково-практичне значення підходу є очевидним. Він дозволяє пов'язати фізику вибуху з процедурою управління ризиком, зробити результати оцінки зрозумілими для осіб, що приймають рішення, та встановити кількісну основу для вибору між альтернативними заходами захисту. У сучасних умовах, коли ресурси на захист обмежені, а спектр загроз широкий, саме така кількісна основа є критично необхідною.

8. Висновки

1. Доведено, що оцінка ураження людей небезпечними чинниками вибуху боєприпасів може і повинна використовуватися як безпосередній кількісний критерій управління ризиком, а не лише як допоміжний опис наслідків вибуху. Запропонований підхід дозволяє повністю відмовитися від суб'єктивних детерміністичних оцінок типу «безпечний – небезпечний» і перейти до обґрунтованого імовірнісного аналізу, який інтегрує фізичні параметри вибухового навантаження, просторову експозицію людей та умовну імовірність тяжкого або летального ураження, що є особливо актуальним для об'єктів критичної інфраструктури в умовах збройної агресії проти України.

2. Обґрунтовано структуру інтегрованого показника індивідуального ризику тяжкого або летального ураження R_{ind} , систематизовано моделі первинних, вторинних і третинних механізмів ураження на основі пробіт-аналізу та стохастичної моделі з урахуванням нерівномірного просторового розподілу уламків, а також розроблено схему практичного застосування критерію для зонування територій, вибору захисних заходів і оцінки залишкового ризику. Показано, що запропонований критерій повністю сумісний з вимогами Кодексу цивільного захисту України, Закону «Про критичну інфраструктуру» та підзаконних актів МВС України, що робить його готовим інструментом для ризик-орієнтованого управління безпекою об'єктів енергетики, транспорту та інших критичних об'єктів.

Література

1. Кодекс цивільного захисту України : Кодекс України; Закон, Кодекс від 02.10.2012 № 5403-VI // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17>
2. Про критичну інфраструктуру : Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1882-20>
3. Про затвердження Порядку управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру та пожеж : Наказ МВС України від 31.07.2023 № 627 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1397-23>
4. Про затвердження Методики оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру та пожеж : Наказ МВС України від 13.10.2023 № 836 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1905-23>
5. Про затвердження Порядку проведення зонування територій за результатами визначення рівнів ризиків виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних із наявністю об'єктів підвищеної небезпеки, а також впливом небезпечних геологічних, гідрологічних та метеорологічних явищ і процесів : Наказ МВС України від 06.09.2024 № 611 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1426-24>
6. Про затвердження вимог щодо управління ризиками безпеки на об'єктах критичної інфраструктури I категорії критичності : постанова Кабінету Міністрів України від 01.04.2025 № 367 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/367-2025-%D0%BF>
7. Qin H., Stewart M. Casualty risks induced by primary fragmentation hazards from high-explosive munitions. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021. Vol. 215. 107874. doi: 10.1016/j.ress.2021.107874
8. Solomos G., Larcher M., Valsamos G., Karlos V., Casadei F. A survey of computational models for blast induced human injuries for security and defence applications. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2020. 47 p. doi: 10.2760/685
9. Russo P., De Marco A., Parisi F. Assessment of the damage from hydrogen pipeline explosions on people and buildings. *Energies*. 2020. Vol. 13. № 19. Art. 5051. doi: 10.3390/en13195051
10. Price M. A., Nguyen V.-T., Hassan O., Morgan K. An approach to modeling blast and fragment risks from improvised explosive devices. *Applied Mathematical Modelling*. 2017. Vol. 50. С. 715–731. doi: 10.1016/j.apm.2017.06.015
11. Iacob N. Explosion Characteristics and Lethality Degree Evaluation from Improvised Explosive Device (IED) Detonation in Urban Area: Case of the Cylindrical Geometry. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. № 22. С. 11851. doi: 10.3390/app152211851
12. Structures to resist the effects of accidental explosions (UFC 3-340-02) / U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, & Air Force Civil Engineer Center. Washington, DC : U.S. Department of Defense, 2008. URL: <https://www.wbdg.org/dod/ufc/ufc-3-340-02>
13. Afanasenko K., Lypovyi V., Kalchenko Y., Hryhorenko O. The Possibility of Energy Enterprises Technological Units' Protection from the Fragmentation Effect of civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2026-43-4

Ammunition. In: The Impact of the Energy Dependency on Critical Infrastructure Protection. 2025. doi: 10.1007/978-3-031-78544-3_31

14. Valsamos G., Casadei F., Solomos G., Larcher M. Risk assessment of blast events in a transport infrastructure by fluid-structure interaction analysis. *Safety Science*. 2019. Vol. 118. P. 887–897. doi: 10.1016/j.ssci.2019.06.014

K. Afanasenko, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

S. Holovchenko, PhD, Senior Lecturer of the Department

O. Hryhorenko, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

T. Kostenko, Dsc, Professor, Professor of the Department

O. Ivanenko, PhD, Associate Professor of the Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

ASSESSMENT OF IMPACT BY EXPLOSION HAZARDS AS A QUANTITATIVE CRITERION FOR RISK MANAGEMENT

The paper develops a scientific and methodological approach to assessing human injury from hazardous factors of ammunition explosion as a quantitative criterion for risk management at civil protection and critical infrastructure facilities under the conditions of armed aggression against Ukraine. It is shown that current safety practices are predominantly based on deterministic approaches (“safe – unsafe”), leading to subjective decisions on protective distances, shelters and structural reinforcement. An integrated indicator of individual risk of severe or fatal injury is proposed. This indicator combines scenario frequency, probability of human exposure in the affected zone and conditional probability of injury. The conditional probability of injury is determined by probit analysis for primary and tertiary mechanisms (lung injury, head and body impact) and a stochastic model that accounts for the non-uniform spatial distribution of fragments for secondary mechanisms. Models for each injury mechanism are systematized. A scheme for using the proposed criterion for territorial zoning, selection of protective measures and assessment of residual risk after their implementation is developed. The approach is fully compatible with the requirements of the Civil Protection Code of Ukraine, the Law “On Critical Infrastructure” and subordinate acts of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine (Orders No. 627, 836, 611; CMU Resolution No. 367). Advantages and limitations of the method are substantiated, including the need to calibrate empirical coefficients for modern ammunition and to account for fragment field heterogeneity. The research results enable the transition from qualitative hazard assessments to quantitative risk-oriented safety management of critical infrastructure facilities. Practical application of the criterion demonstrates the possibility of quantitative substantiation of the priority of protective measures and evaluation of their effectiveness through relative risk reduction, which is particularly relevant for energy and transport facilities under current threats.

Keywords: risk management criterion, explosion, probit analysis, individual risk, damage mechanisms

References

1. Kodeks tsyvilnoho zakhystu Ukrainy: Kodeks Ukrainy; Zakon, Kodeks vid 02.10.2012 № 5403-VI // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17>

2. Pro krytychnu infrastrukturu: Zakon Ukrainy vid 16.11.2021 № 1882-IX // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1882-20>

3. Pro zatverdzhennia Poriadku upravlinnia ryzykamy vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii tekhnohennoho kharakteru ta pozhezh: Nakaz MVS Ukrainy vid 31.07.2023 № 627 // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1397-23>

4. Pro zatverdzhennia Metodyky otsiniuvannia ryzykiv vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii tekhnohennoho kharakteru ta pozhezh: Nakaz MVS Ukrainy

vid 13.10.2023 № 836 // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1905-23>

5. Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia zonuvannia terytorii za rezultatamy vyznachennia rivniv ryzykiv vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii, poviazanykh iz naiavnistiu obektiv pidvyshchenoi nebezpeky, a takozh vplyvom nebezpechnykh heolohichnykh, hidrolohichnykh ta meteorolohichnykh yavysch i protsesiv: Nakaz MVS Ukrainy vid 06.09.2024 № 611 // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1426-24>

6. Pro zatverdzhennia vymoh shchodo upravlinnia ryzykamy bezpeky na ob'ekтах krytychnoi infrastruktury I katehorii krytychnosti: Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 01.04.2025 № 367 // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/go/367-2025-p>

7. Qin, H., Stewart, M. G. (2021). Casualty risks induced by primary fragmentation hazards from high-explosive munitions. *Reliability Engineering & System Safety*, 215, 107874 doi: 10.1016/j.ress.2021.107874

8. Solomos, G., Larcher, M., Valsamos, G., Karlos, V., Casadei, F. (2020). A survey of computational models for blast induced human injuries for security and defence applications. Publications Office of the European Union. doi: 10.2760/685

9. Russo, P., De Marco, A., Parisi, F. (2020). Assessment of the damage from hydrogen pipeline explosions on people and buildings. *Energies*, 13(19), 5051. doi: 10.3390/en13195051

10. Price, M. A., Nguyen, V.-T., Hassan, O., Morgan, K. (2017). An approach to modeling blast and fragment risks from improvised explosive devices. *Applied Mathematical Modelling*, 50, 715–731. doi: 10.1016/j.apm.2017.06.015

11. Iacob, N. (2025). Explosion characteristics and lethality degree evaluation from improvised explosive device (IED) detonation in urban area: Case of the cylindrical geometry. *Applied Sciences*, 15(22), 11851. doi: 10.3390/app152211851

12. U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, & Air Force Civil Engineer Center. (2008). Structures to resist the effects of accidental explosions (UFC 3-340-02). U.S. Department of Defense. Available at: <https://www.wbdg.org/dod/ufc/ufc-3-340-02>

13. Afanasenko, K., Lypovyi, V., Kalchenko, Y., Hryhorenko, O. (2025). The possibility of energy enterprises technological units' protection from the fragmentation effect of ammunition. In *The Impact of the Energy Dependency on Critical Infrastructure Protection*. Springer. doi: 10.1007/978-3-031-78544-3_31

14. Valsamos, G., Casadei, F., Solomos, G., Larcher, M. (2019). Risk assessment of blast events in a transport infrastructure by fluid-structure interaction analysis. *Safety Science*, 118, 887–897. doi: 10.1016/j.ssci.2019.06.014

Надійшла до редколегії: 10.03.2026

Прийнята до друку: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення): 30.05.2026