

А. О. Мирошниченко, ад'юнкт ад'юнктури (ORCID 0000-0002-5104-0657)

Р. І. Шевченко, д.т.н., професор, нач. каф. (ORCID 0000-0001-9634-6943)

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ФОРМУВАННЯ УМОВ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ В ТУНЕЛЯХ

Визначено фізичне поле та умови формування математичної апарату попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру в залізничних тунелях. Доведено, що формування окремих елементів математичного апарату, а саме математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру у залізничних тунелях повинно відбуватися з метою складання системи рівнянь з послідовного розв'язання взаємопов'язаних окремих задач, які у сукупності дозволяють визначити конструктивні та міцнісні параметри додаткових засобів колективного захисту піротехніків. Визначено, що формування методики попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру у залізничних тунелях спирається на відповідний керуючий алгоритм, який враховує багаторівневість проведення ліквідаційних робіт та процедури з розрахунку параметрів засобів гасіння надлишкового імпульсу та визначення мінімально можливої дистанції проведення вибухових робіт з урахуванням небезпеки ураження піротехніків осколками та елементами конструкції залізничного тунелю. Встановлена необхідність усунення наявних виявлених обмежень математичного апарату. А саме необхідно запропонувати варіанти нормативів для оцінювання оперативних дій піротехніків у літній та зимовий час та за наявності додаткових ускладнюючих факторів небезпеки, на штатт можливості хімічного, радіаційного або бактеріологічного ураження. Визначено, що отримані результати дозволяють у подальшому розробити низку практичних рекомендацій по вдосконаленню діючих стандартних оперативних процедур з локалізації надзвичайних ситуацій терористичного характеру в тунелях залізничного транспорту з метою недопущенню переростання їх до більш високого рівня небезпеки.

Ключові слова: надзвичайна ситуація, математична модель, методика попередження, залізничні тунелі, вибуховий пристрій.

1. Вступ

Одним з найважливішим елементом критичної інфраструктури будь-якої держави є об'єкти транспортної інфраструктури [1]. Україна не є винятком. Більш того високий відсоток технічної занедбаності та відсутність відповідних обсягів фінансування у процесі оновлення інфраструктури призводить до прискорення небезпечних явищ на зазначених об'єктах [2]. Особливу роль відіграють фактори антропогенного впливу на безпеку об'єктів критичного інфраструктури залізничного транспорту. До останніх слід віднести можливі терористичні акти [3].

Аналіз наслідків надзвичайних ситуацій терористичного характеру на об'єктах залізничного транспорту, як у провідних країнах світу, так і в країнах, що розвиваються та Україні доводять, що протікання процесу надзвичайної ситуації у разі виявлення вибухового пристрою на об'єкті визначається наступною хронологією взаємозалежних подій, а саме: пошук та ідентифікація вибухового пристрою, локалізація та знешкодження вибухового пристрою, дії після закінчення робіт, які у разі виникнення позаштатної ситуації супроводжуються додатковими заходами з її усунення.

З іншого боку аналіз існуючого технічного обладнання спеціальних служб Україні зі знешкодження терористичних пристроїв на об'єктах залізничного транспорту свідчить про відсутність на сьогодні як ефективних інженерно-технічних засобів так і, відповідно, методологічного забезпечення, а саме комплексу методик з попередження надзвичайним ситуаціям терористичного характеру з використанням вибухових пристроїв на об'єктах залізничного транспорту [4].

Від так існує проблема з формування ефективних методологічних підходів,

математичних моделей та методів, з попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру на об'єктах залізничного транспорту.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Рівень терористичної загрози у світі нині досить високий. Від неї потерпають як країни, де тривають збройні конфлікти (передусім на Близькому Сході та в Африці), так і країни Заходу, що до останнього часу вважалися цілком безпечними з огляду на розвинену систему правоохоронних органів і спецслужб.

У роботі [5], автори наголошують, що протидіяти цій загрозі стає дедалі важче, враховуючи, що міжнародний тероризм – це явище, що не має географічних кордонів і не лише становить небезпеку для окремих країн, а й ставить під сумнів стійкість міжнародного правопорядку та спроможність протистояти викликам з боку міжнародних терористичних організацій. Попре досить чіткі завдання автори залишають поза уваги можливість формування єдиних підходів до попередження існуючої загрози.

У роботі [6], розглядаються особливості терористичних заходів, які притаманні квазідержавним утворенням, які претендують на самостійну роль у системі міжнародних відносин. Втім узагальнюючих висновків щодо формування системи попередження таким загрозам на об'єктах критичної інфраструктури в роботі не наведено.

У роботі [7] автори розглядають оперативні дії, пов'язані з локалізацією вибухонебезпечних предметів, з точки зору аналізу існуючих алгоритмів бойової роботи особового складу піротехнічного підрозділу. Однак особливості дій особового складу в залізничних тунелях залишилися поза уваги дослідників.

Натомість у роботі [8] розглянуто питання вибухового ураження піротехніків в зоні ліквідації можливої НС у залізничному тунелі. Втім наведені рекомендації відносяться лише до визначення небезпечної дистанції проведення робіт, що не дозволяє застосувати їх при формуванні технічних умов для створення засобів колективного захисту.

У роботі [9], мова йде про ефективність застосування засобів індивідуального захисту саперів різного класу. Однак залишається поза увагою питання застосування отриманих даних при проведенні робіт в залізничних тунелях.

У роботі [10], автори наголошують, що на сьогоднішній день найбільші труднощі виникають під час виявлення та нейтралізації вибухового пристрою в залізничному тунелі. Втім спектр різноманітних питань роботи із спеціалізованими захисними пристроями колективного захисту не розглядаються.

Автори у роботі [11] зазначають, що використання вибухових речовин у усьому світі при проведенні терористичних актів відродило інтерес як до дослідження вибухів, так і до вивчення способів запобігання або пом'якшення шкоди від застосування вибухових речовин. Однак створенню загальноновживаних методологічних підходів заважає той факт, що більшість інформації підпадає до категорії для службового користування.

У роботі [12] автори спираються на емпіричну методологію проведення досліджень. Однак такий підхід не дозволяє отримати досить значний масив даних, із-за труднощів процесу регенерації дослідного обладнання в ході вибухових експериментів. Тим самим набір статистичних даних для узагальнення є досить серйозним окремим науковим завданням.

У роботі [13] представлені теоретичні дослідження в області захисту від вибуху, а саме автори досліджують як поширюються навантаження від вибухових і ударних хвиль при проходженні їх через середовище, що має різний фізичний склад. Однак умови, що виникають в середовищі залізничного тунелю в роботі не розглянуті.

Досить близька за змістом попередній роботі і робота [14], в якій представлені теоретичні дослідження в області захисту від вибуху з урахуванням різноманітних геометричних форми відбиваючої поверхні. Однак, як і у попередній роботі, геометричні поверхні притаманні залізничним тунелям у роботі не розглядаються.

У роботі [15] питання попередження розглянуто авторами з іншого боку. А саме досліджено пом'якшуючі механізми для мінімізації збитку від удару і вибухового навантаження. Однак рекомендації стосуються вже існуючих систем захисту, що не дозволяє застосувати їх при розробці інноваційних систем колективного захисту.

Так в роботі [16] відзначено, що в основі конкретних оперативних рекомендацій, як правило, повинні лежати результати математичного моделювання складних сценаріїв вибуху. У той же час, більшість існуючих математичних моделей, які наведено в роботі засновані на вирішенні рівняння збереження Ейлера для маси, енергії та імпульсу.

У роботі [17] наголошується, що складна взаємодія вибухових і ударних хвиль з матеріальними конфігураціями і структурами вимагає використання комп'ютерів із поліпшеними обчислювальними потужностями. Однак алгоритмів та методики комп'ютеризації зазначеного процесу не наведено.

При цьому кожен раз створюється фактично новий пакет прикладних програм для вирішення розробленої математичної моделі, що в свою чергу висвітлює невирішену частину зазначеної раніше проблеми, а саме пов'язану зі створенням уніфікованого математичного апарату з дослідження процесів попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру на об'єктах критичної інфраструктури, а саме безпосередньо в тунелях залізничного транспорту.

3. Мета та завдання дослідження

Метою статті є визначення основних умов з розробки математичного апарату попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру в залізничних тунелях, які впливають на вимоги щодо інноваційних технічних пристроїв.

Для досягнення поставленою мети були поставлені наступні задачі:

1. Визначити фізичне поле та умови формування математичного апарату попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру в залізничних тунелях.
2. Визначити основні аналітичні залежності математичного апарату з попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру в залізничних тунелях.

4. Аналіз фізичного поля та умови формування математичного апарату

Для вирішення поставленого наукового завдання проаналізуємо фізичне поле зони поширення небезпеки надзвичайної ситуації терористичного характеру в залізничних тунелях (рис. 1).

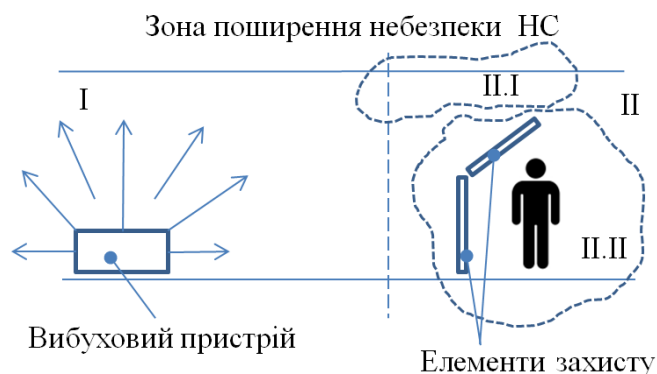


Рис. 1. Визначення фізичного поля зони поширення небезпеки надзвичайної ситуації терористичного характеру в залізничних тунелях

Враховуючи наявний досвід локалізації подібного роду надзвичайних ситуацій, слід виділити безпосередньо зону підризу вибухового пристрою (І), та зону ураження особового складу піротехнічних підрозділів (ІІ). Остання в свою чергу поділяється на зону (ІІ.І) – де вражаючими факторами є обвал елементів тунелю. Та зону (ІІ.ІІ) – де вражаючими факторами є ударне та осколочне навантаження на захисні елементи одягу піротехніків. Відповідно додаткові елементи захисту та методика їх застосування повинні враховувати обидві зони небезпеки одночасно.

З метою поділу чинників впливу на ті, що можливо врахувати при формуванні математичної моделі і відповідно при розробці елементів додаткового захисту, та ті, що будуть враховані при формуванні методики застосування розроблених засобів, проаналізуємо наявну інформацію щодо особливостей мінно-вибухових ушкоджень за умов використання спеціальних засобів захисту піротехніків [18].

Так відповідно інформації, що міститься в дослідженнях [18], у якості піддослідних були використані антропоморфні манекени, які були одягнені у вибухозахисні костюми Східноєвропейського (ВЗК-1) та Західноєвропейського (ВЗК-2) виробництва. Було здійснено дві серії вибухових експериментів з масою вибухового заряду (mB3) відповідно 1,5 кг та 2,0 кг та відстанню до епіцентру вибуху (R) у першому випадку 3 м, у другому 1,5 м.

Узагальнені результати щодо виміру потужності повітряної ударної хвилі (ПУХ) та горизонтальних ударних прискорень наведено у табл. 1, результати осколочних уражень в табл. 2.

Табл. 1. Результати виміру потужності ударної хвилі та горизонтальних ударних прискорень

Об'єкт дослідження	Збитковий тиск (Р, кПа) та протяжність імпульсу (t, мс)				Ударне прискорення (a,g) та протяжність імпульсу (t, мс)	
	по фронту ПУХ		у під костюмному просторі			
	Р	t	Р	t	a	t
Параметри експерименту: mB3=1,5 кг, R=3,0 м						
ВЗК-1	247	0,7	58	3,0	6,1	1,2
	234	0,6	61	2,8	6,0	1,0
ВЗК-2	231	0,6	30	3,1	5,2	0,8
	240	0,6	31	2,8	5,2	0,8
Параметри експерименту: mB3=2 кг, R=1,5 м						
ВЗК-1	442	0,6	81	2,9	7,5	1,3
	435	0,7	85	3,0	7,9	1,6
ВЗК-2	451	0,6	61	3,1	6,8	1,2
	439	0,8	62	3,0	6,5	1,1

Табл. 2 . Результати осколочних уражень

Об'єкт дослідження	Кількість уражень	Наскрізне пробиття	
		Кількість	%
Параметри експерименту: mB3=1,5 кг, R=3,0 м			
ВЗК-1	59	15	25,4
ВЗК-2	57	7	12,2
Параметри експерименту: mB3=2 кг, R=1,5 м			
ВЗК-1	72	23	31,9
ВЗК-2	76	12	16,6

Аналізуючи наведені результати експериментальних досліджень можливо визначити найбільш небезпечні параметри впливу в різних зонах поширення над-

звичайної ситуації. Останні можливо об'єднати у вигляді таблиці негативних впливів та їх протидії в зоні поширення надзвичайної ситуації терористичного характеру у залізничних тунелях (табл. 3).

Табл. 3. Результати аналізу негативних впливів зони поширення надзвичайної ситуації терористичного характеру у залізничних тунелях

Умовна підзона поширення		Характер небезпеки впливу	Протидія	
			Заходи	Доцільність врахування при моделюванні
II.I	Ударне навантаження	Обвал елементів тунелю	Безпечна дистанція проведення робіт з ліквідації НС	Методика проведення робіт
	Осколочне ураження	Рикошет осколків від елементів тунелю	Конструктивне рішення засобу додаткового захисту	Розв'язання окремої задачі в рамках математичної моделі
II.II	Ударне навантаження	Надмірний збитковий тиск та імпульс	Надлишкова міцність засобу додаткового захисту	Розв'язання окремої задачі в рамках математичної моделі
			Передбачення гасителів надлишкового імпульсу	Методика проведення робіт
	Осколочне ураження	Ураження осколками вибухового пристрою	Достатня площа додаткового захисту	Розв'язання окремої задачі в рамках математичної моделі
			Безпечна дистанція проведення робіт з ліквідації НС	Методика проведення робіт

Таким чином, виходячи з аналізу інформації представленої у табл. 3, подальші дослідження з розробки ефективних підходів до вирішення задачі попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру у залізничних тунелях необхідно проводити за наступними напрямками: по-перше, формування математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру у залізничних тунелях, у складі системи рівнянь з послідовного розв'язання взаємопов'язаних окремих задач, які у сукупності дозволять визначити конструктивні (площа, взаєморозміщення елементів пристрою тощо) та міцнісні параметри додаткових засобів колективного захисту піротехніків; по-друге, формування відповідної методики попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру у залізничних тунелях. Керуючий алгоритм останньої повинен врахувати багато-рівневість проведення ліквідаційних робіт та процедури з розрахунку параметрів засобів гасіння надлишкового імпульсу та визначення мінімально можливої дистанції проведення вибухових робіт з урахуванням небезпеки ураження піротехніків осколками та елементами конструкції залізничного тунелю.

5. Визначення аналітичних залежностей математичного апарату

Виходячи з гіпотези, що за допомогою додаткового захисного пристрою, параметри якого визначено за умов протидії ударному та осколочному навантаженню від вибуху вибухонебезпечного предмету, можливо попередити надзвичайну

ситуацію терористичного характеру у залізничному тунелі, відповідна схема фізичної моделі попередження наслідків вибуху вибухонебезпечного предмету за допомогою захисного пристрою має вигляд, який наведено на рис. 2.

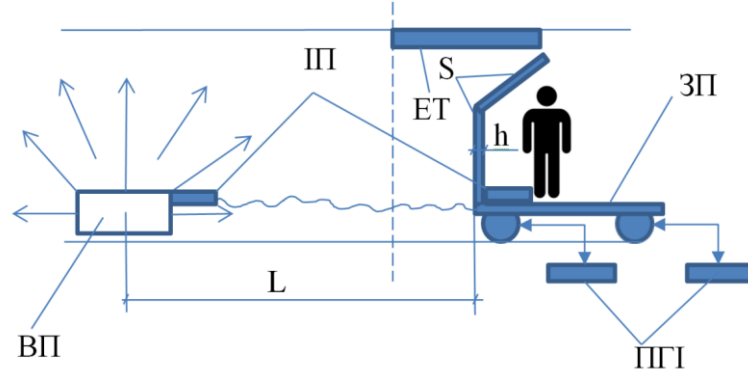


Рис. 2. Схема фізичної моделі попередження надзвичайної ситуації терористичного характеру у залізничному тунелі

На рис. 2 маємо наступні визначення: ВП- вибуховий пристрій; ПІ – пристрій з ініціалізації вибуху; ЗП – захисний пристрій; ЕТ – елементи тунелю, що становлять загрозу обвалу у разі вибуху; ППІ – пристрій гасіння імпульсу ударної хвилі; L – мінімальна безпечна відстань з ініціалізації вибуху; S – ефективна захисна площа захисного пристрою; h – розрахункова товщина захисного пристрою.

Відповідно, умовою ефективності застосування захисного пристрою є строге виконання системи рівнянь:

$$\begin{cases} q_1(h, l, S, t) = 0 \\ q_2(h, l, S, t) = 0 \\ q_3(h, l, S, t) \leq q_3^{об.р} \end{cases} \quad (1)$$

де q_1, q_2, q_3 – відповідно наслідки НС за рівнем пріоритетності; t – загальний час проведення заходів оперативного характеру з попередження НС; $q_3^{об.р}$ – кількісні характеристики показників наслідків НС третьої групи пріоритетності, що відповідають об'єктовому рівню.

Для розв'язання окремих завдань, а саме завдання з визначення конструктивних рішень засобу додаткового захисту, його ефективної поверхні та надлишкової міцності слід використати метод кінцево-елементного моделювання, який реалізовано в кінцево-елементному пакеті «ANSYS». На сьогодні даний комплекс дозволяє моделювати поведінку різноманітного середовища під впливом імпульсного навантаження. Оскільки розрахункова схема (рис. 2) містить як газоподібне середовище у вигляді продуктів детонації вибухового пристрою і повітря, а також тверду металеву поверхню засобу додаткового захисту, моделювання за допомогою кінцево-елементного комплексу «ANSYS» доцільно проводити за допомогою Ейлерово-Лагранжевого підходу.

Слід відмітити, що розширення продуктів детонації в загальній постановці описується рівнянням Джонса-Уілкінса-Лі [19]:

$$p = A \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_1 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_1 \cdot V} + B \cdot \left(1 - \frac{\omega}{R_2 \cdot V}\right) \cdot e^{-R_2 \cdot V} + \frac{\omega \cdot E_0}{V}, \quad (2)$$

де p , E_0 , V – тиск, внутрішня енергія та відносний об'єм відповідно; A , B , R_1 , R_2 , ω – емпіричні константи.

Це рівняння входить до бібліотеки комп'ютерного комплексу ANSYS/AUTODYN та дозволяє вирішити задачу моделювання конструктивних параметрів та особливостей засобу додаткового захисту та отримання його характеристик міцності час вибуху вибухового пристрою у тунелях залізничного транспорту.

Зазначене рівняння (2) слід доповнити рівнянням ізоентропічного розширення Орленка Л.П.:

$$p_s = B_0 \cdot p^k + C_0 \cdot p^\Gamma, \quad (3)$$

де B_0 , C_0 , k – параметричні константи рівняння; Γ – коефіцієнт Грюнайдена.

Такий підхід дозволяє охопити весь спектр вибухонебезпечних речовин, як промислових, так і саморобних.

Значення коефіцієнта k коливається в межах від $0,25 \div 0,35$ для малих значень густини $\rho = 1000 \div 1600 \text{ кг/м}^3$ до $0,7 \div 1$ для $\rho \geq 10000 \text{ кг/м}^3$.

Параметри B_0 , C_0 , k визначаються через параметри детонаційної хвилі в точці Чапмена-Жуге наступним чином:

$$B_0 = \frac{p_n - \Gamma \cdot \rho_n \cdot E_n}{\rho_n^k} \cdot \frac{k-1}{k-1-\Gamma}, \quad (4)$$

$$C_0 = \frac{p_n - B_0 \cdot p_n^k}{\rho_n^{1+\Gamma}}, \quad (5)$$

$$k = 1 + \frac{2-\Gamma}{1 - \frac{\Gamma}{6} \cdot \left(1 + \frac{32Q}{D^2}\right)}, \quad (6)$$

де Q – теплота вибухового перетворення заряду [Дж/кг]; D – швидкість руху детонаційної хвилі по заряду [м/с]; p_n , ρ_n , E_n – тиск [Па], густина [кг/м³] та енергія [Дж] на фронті детонаційної хвилі.

Відповідні параметри на фронті детонаційної хвилі визначаються за допомогою наступних залежностей:

$$\begin{cases} p_n = \frac{\rho_0 \cdot D^2}{4}; \\ \rho_n = \frac{4}{3} \cdot \rho_0; \\ E_n = \frac{p_n}{2} \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_n} \right) + Q, \end{cases} \quad (7)$$

де ρ_0 – початкова густина вибуху.

В наведеній постановці (4)÷(7) задача розрахунку міцності засобу додаткового захисту в зазначеному кінцево-елементному пакеті не вирішується. У зв'язку

з цим введемо припущення, що засіб додаткового захисту виготовлено з урахуванням припущення:

$$h_k = 3 \cdot h_0, \quad (8)$$

де h_k – товщина фронтальної частини засобу додаткового захисту; h_0 – мінімальна товщина, яка дозволяє витримати вибух, еквівалентного заряду.

З урахуванням цього модель розрахунку напружено-деформованого стану уявляє собою крайову задачу теорії пружності, яку повністю визначає система рівнянь рівноваги Нов'є:

$$\sigma_{ij,j} + F_i = 0 \quad (i, j = 1.2.3), \quad (9)$$

де $\sigma_{ij,j}$ – компоненти тензора напруги; F_i – компоненти вектору об'ємних сил, які визначаються виходячи з рішення рівняння (2) для відомих промислових зразків вибухонебезпечної речовини або з рішення системи рівнянь (3)–(7) для вибухонебезпечних речовин непромислового виготовлення.

Формули Коші, які встановлюють зв'язок між компонентами вектору переміщення U та тензору деформації E , мають вигляд:

$$E_{ij} = 1/2 \cdot (U_{i,j} + U_{j,i}) \quad (i, j = 1.2.3) \quad (10)$$

та фізичні співвідношення:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W(E_{ij})}{\partial E_{ij}} \quad (i, j = 1.2.3) \quad (11)$$

доповнюються граничними умовами:

$$p_{iv} = \sigma_{ij,n_j} \quad (x_i \in S_F); \quad (12)$$

$$U_i = U_{i0} \quad (x_i \in S_U), \quad (13)$$

де $W(E_{ij})$ – енергія пружної деформації; n_j – направляючі косинуси зовнішньої нормалі до межі області; S_U та S_F – ділянки межі, на котрих задані граничні умови в переміщеннях та навантаженнях відповідно; p_{iv} – компоненти вектору поверхневих сил.

Відповідно задача у варіаційній постановці з умови мінімуму варіації повної енергії має вигляд:

$$\delta \mathfrak{E}(U) = 0 \quad (14)$$

та може бути представлена наступним чином:

$$\mathfrak{E}(U) = \iiint_V W(E_{ij}) dV - \iiint_V F_i U_i dV - \iint_{S_F} p_{iU} U_i dS, \quad (15)$$

де $\mathfrak{E}(U)$ – повна енергії всієї пружної області.

З урахуванням залежностей Костельянюк стосовно питомої потенційної енергії:

$$\frac{\partial W(E_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} = E_{ij}; \quad (16)$$

рівняння (17) приймає вигляд:

$$\Xi(U) = \frac{1}{2} \iiint_V E^T \sigma dV - \left(\iint_{S_F} U^T P dS + \iiint_V U^T F dV \right), \quad (17)$$

де T – операція транспонування.

Від так, система рівнянь (2), (3), (7) та (17) з урахуванням виконання вимог (8), (12) та (13) визначає умови розрахунку на міцність засобу додаткового захисту та відповідно його геометричних розмірів, від миттєвого навантаження внаслідок підриву вибухового пристрою.

В такій постановці додатковими умовами вирішення наукового завдання є результати з розв'язання рівнянь імпульсного впливу на елементи конструкції залізничного тунелю в небезпечній зоні II.I (див. рис. 1).

Так параметри ударної хвилі у загальній постановці можливо визначити за методикою розрахунку захисник споруд від дії вибухового навантаження.

В процесі обтікання споруди ударною хвилею виділяють фази стиснення і розрідження.

При цьому імпульс i_- та тривалість фази розрідження τ_- істотно менше, ніж у фазі стиснення, тому ними часто нехтують.

В той же час імпульс фази стиснення i_+ чисельно дорівнює площі під кривою тиску в цій фазі. Маючи за припущення епюру тиску в фазі стиснення трикутної, питома імпульс може бути наближено (з запасом) знайдений за виразом (18):

$$i_+ = \frac{\Delta p_\phi \tau}{2}. \quad (18)$$

Для визначення зміни тиску на будівельні конструктивні елементи залізничного тунелю необхідно визначити наступні величини, а саме:

– швидкість поширення фронту ударної хвилі D_ϕ що залежить від тиску в фронті Δp_ϕ [МПа]:

$$D_\phi = 340 \sqrt{1 + 8,3 \Delta p_\phi}; \quad (19)$$

– відбитий тиск при падінні ударної хвилі на фронтальну стіну споруди, що складається з власне відбитого тиску (20) і тиску швидкісного напору повітря (21):

$$\Delta p_{\text{вд}} = 2\Delta p_\phi + \frac{6(\Delta p_\phi)^2}{\Delta p_\phi + 0,72}; \quad (20)$$

$$\Delta p_{\text{від}} = 2\Delta p_{\phi} + \frac{2,5(\Delta p_{\phi})^2}{\Delta p_{\phi} + 0,72}; \quad (21)$$

– час від початку відображення до встановлення режиму розтікання по поверхні:

$$t_{\text{від}} \approx \frac{3H}{D_{\phi}}; \quad (22)$$

– момент часу $t_{\text{бок}}$

$$t_{\text{від}} \approx \frac{b}{D_{\phi}}; \quad (23)$$

– час від $t_{\text{бок}}$ до $t_{\text{тил}}$ (вибирається найменше):

$$t_{\text{дещ}} = \frac{4h}{D_{\phi}}; \quad \text{або} \quad t_{\text{тил}} = \frac{2b}{D_{\phi}}. \quad (24)$$

Відповідно рівняння руху кінцево-елементної моделі, яка реалізована в програмному комплексі ANSYS/AUTODYN представлено у вигляді (25):

$$\begin{cases} M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \\ x(0) = x_0 \\ \dot{x}(0) = \dot{x}_0 \end{cases}; \quad (25)$$

де K, M – відповідно матриця жорсткості і матриця мас; C – матриця демпфірування, яка визначається виходячи з гіпотези Релея:

$$C = \alpha M + \beta K; \quad (26)$$

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad \text{і} \quad \beta = \frac{2(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, \quad (27)$$

де $\omega_1, \omega_2, \xi_1, \xi_2$ – перші дві власні циклічні частоти [рад / с] і модальне демпфірування для першої і другої власних частот (в частках від критичного демпфірування).

Надалі маємо: α і β – коефіцієнти пропорційності Релея, що відповідають за загасання за низькими модами і за високими модами відповідно; у модулі програмного комплексу ANSYS/AUTODYN реалізовано варіант методу покрокового інтегрування Ньюмарка. Увесь часовий інтервал розбивається на кінцеве число кроків. Крок інтегрування Δt , в межах однієї ітерації рекомендується приймати в межах $(0.01 - 0.001) T_1$ де T_1 – період першого тону коливань елементів конструкції залізничного тунелю.

Надалі формалізація параметрів наведених рівнянь призводить до вирішення трьох окремих завдань. Перше включає в себе визначення конструктивних рішень

засобу додаткового захисту $\Psi_{\text{крзДЗ}}$. Друга – визначення площі ефективної поверхні засобу додаткового захисту $\Psi_{\text{пспзДЗ}}$. Третя – визначення надлишкової міцності засобу додаткового захисту $\Psi_{\text{нмзДЗ}}$.

Відтак, умову отримання ефективної локалізації (1) слід доповнити наступним рівнянням:

$$\Psi(q_1, q_2) = f[\Psi_{\text{крзДЗ}}, \Psi_{\text{пспзДЗ}}, \Psi_{\text{нмзДЗ}}] \quad (28)$$

Таким чином, сформована математична модель попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру в залізничних тунелях, складається з чотирьох аналітичних залежностей. Перша описує залежність кількості жертв від розрахункової товщини захисного пристрою, мінімальної безпечної відстані з ініціалізації вибухового пристрою, ефективної площі захисного пристрою та часу проведення заходів оперативного характеру. Друга показує залежність кількості постраждалих від розрахункової товщини захисного пристрою, мінімальної безпечної відстані з ініціалізації вибухового пристрою, ефективної площі захисного пристрою та часу проведення заходів оперативного характеру. Третя визначає інтегральний рівень наслідків третьої групи пріоритетності на об'єктовому рівні поширення надзвичайної ситуації від розрахункової товщини захисного пристрою, мінімальної безпечної відстані з ініціалізації вибухового пристрою, ефективної площі захисного пристрою та часу проведення заходів оперативного характеру. Четверта дозволяє визначити умови відсутності постраждалих та жертв, як наслідків надзвичайної ситуації першого та другого рівня пріоритетності, в залежності від варіантів розв'язання окремих задач з визначення конструктивних рішень, площі та міцності засобу додаткового захисту.

6. Обговорення результатів з формування математичного апарату

Ефективність отриманих результатів пояснюється всебічним врахуванням особливостей схеми управління надзвичайною ситуацією терористичного характеру, яка викликана виявленням вибухового пристрою у залізничному тунелі, а саме: моніторинг ситуації, виявлення ризику, оповіщення та евакуація людей, пошук та ідентифікація вибухового пристрою, прийняття рішення на використання спеціального обладнання, підготовчі заходи, знешкодження вибухового пристрою, знищення вибухового пристрою, локалізація наслідків знешкодження, прийняття рішення на відновлення і режиму роботи об'єкта, вплив на ситуацію, аналіз ефективності превентивних заходів та заходів з попередження надзвичайної ситуації. Також враховано і той факт, що зазначені операції пов'язані між собою прямими та зворотними зв'язками, які забезпечують збір інформації про стан об'єкта через елементи системи моніторингу та вплив на об'єкт через систему виконавців, забезпечуючи безперервний процес управління в інтересах мінімізації наслідків надзвичайної ситуації терористичного характеру.

Особливість запропонованого у роботі підходу полягає у поєднанні сучасних досягнень у сфері моделювання процесів виникнення та попередження надзвичайних ситуацій, що у сукупності дозволяє розробити, по-перше, ефективні інженерно-технічні засоби колективного захисту; по-друге, відповідне методологічне забезпечення процесу попередження надзвичайних ситуацій терористичного ха-

рактору на об'єктах критичної інфраструктури.

Дана робота має певні обмеження, які слід враховувати при подальших дослідженнях. А саме у ході подальших досліджень з формування методики попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру у тунелях залізничного транспорту необхідно запропонувати варіанти нормативів для оцінювання оперативних дій піротехніків у літній та зимовий час та за наявності додаткових ускладнюючих факторів небезпеки, на шталт можливості хімічного, радіаційного або бактеріологічного ураження.

Слід також дослідити доцільність внесення змін щодо складу та процедури підготовки оперативних підрозділів, які безпосередньо будуть застосовувати відповідний методичний апарат та засоби додаткового захисту з попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру у тунелях залізничного транспорту.

Розвиток даного дослідження дозволить у подальшому розробити низку практичних рекомендацій по вдосконаленню діючих стандартних оперативних процедур у разі використання пристрою додаткового захисту та методики його застосування з метою забезпечення скорочення часу робіт по локалізації надзвичайних ситуацій терористичного характеру в тунелях залізничного транспорту, недопущенню переростання їх до більш високого рівня небезпеки, та забезпечення достатнього високого рівня індивідуального та колективного захисту особового складу ДСНС та цивільних осіб. Однак певні труднощі очікуються на етапі сертифікації розробленого обладнання та його широкого впровадження в безпосередню діяльність піротехнічних підрозділів.

7. Висновки

1. Визначено фізичне поле та умови формування математичного апарату попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру в залізничних тунелях. Всебічний аналіз аналізу фізичного поля формування математичного апарату з попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру у залізничних тунелях довів, що керуючий алгоритм методики, як основи процесу попередження, повинен врахувати багаторівневість проведення ліквідаційних робіт та відповідні попередні процедури з розрахунку параметрів засобів гасіння надлишкового імпульсу та визначення мінімально можливої дистанції проведення вибухових робіт з урахуванням небезпеки ураження піротехніків осколками та елементами конструкції залізничного тунелю.

2. Визначено основні аналітичні залежності математичного апарату з попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру в залізничних тунелях. Останнє дозволяє стверджувати, що процеси попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру в залізничних тунелях можливо описати системою рівнянь, що визначають залежність наслідків різної групи пріоритетності, по відношенню до відповідного типу надзвичайної ситуації, від розрахункової товщини захисного пристрою, мінімальної безпечної відстані з ініціалізації вибухового пристрою, ефективної площі захисного пристрою, часу проведення заходів оперативного характеру та їх варіативних комбінацій. Застосування у подальшому математичного апарату, що створюється, дозволить підвищити ефективність розробки засобів індивідуального та колективного захисту піротехніків до 30 % відповідно до існуючого на сьогодні показника.

Література

1. Wray C. Keeping America Secure in the New Age of Terror. Statement Before the House Homeland Security Committee. Washington D. C. November 30. 2017. URL: <https://www.fbi.gov/news/testimony/keeping-america-secure-in-the-new-age-of-terror>
2. Gus M. Understanding Homeland Security. Los Angeles: SAGE. 2017. 456 p.
3. Lundberg R. Archetypal Terrorist Events in the United States. *Studies in Conflict Terrorism*. 2019. 42:9. P. 819–835. doi: 10.1080/1057610X.2018.1430618
4. Mauroni A. The rise and fall of counter proliferation policy. *The Nonproliferation Review*. 2019. 26:1–2. P. 127–141. doi: 10.1080/10736700.2019.1593691
5. Skilling L., Zapasnik M. Addressing the Explosive Hazard Threat in Northern Syria: Risk Education on Landmines, UXO, Booby Traps, and IEDs. *Journal of Conventional Weapons Destruction*. 2017. Vol. 21. Is. 2. Article 14. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss2/14>
6. Xiao T., Horberry T., Cliff D. Analysing mine emergency management needs: a cognitive work analysis approach. *International Journal of Emergency Management (IJEM)*. 2015. Vol. 11. № 3. P. 191–208. URL: <http://www.inderscience.com/offer.php?id=71705>
7. Toan D. Q. Train-the-Trainer Trauma Care Program in Vietnam. *Journal of Conventional Weapons Destruction*. 2015. Vol. 19. Is. 1. Article 9. URL: <http://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol19/iss1/9>
8. Smith A. An APT Demining Machine, *Journal of Conventional Weapons Destruction*. 2017. Vol. 21. Is. 2. Article 15. URL: <http://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss2/15>
9. Hadjadj A., Sado O. Shock and blast wave mitigation. *Shock Waves*. 2013. Vol. 23. P. 1–4. doi: <https://doi.org/10.1007/s00193-012-0429-0>
10. Tyas A., Rigby S.E., Clarke S.D. Preface on special edition on blast load characterization. *International Journal of Protective Structures*. 2014. Vol. 7. Is. 3. P. 302–304. doi: <https://doi.org/10.1177/2041419616666340>
11. Blakeman S. T., Gibbs A. R., Jeyasingham J. A study of mine resistant ambush protected (MRAP) vehicle as a model for rapid defence acquisitions. *MBA Professional Report Monterey Naval School*. 2012. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a493891.pdf>
12. Sherkar P., Whittaker A.S., Aref A. J. Modeling the effects of detonations of high explosives to inform blast-resistant design. *Technical Report MCEER-10-0009*. 2012. URL: <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/10-0009.pdf>
13. Armor Thane Reduces the Impact from Bombs and Bullets. URL: <https://www.armorthane.com/protective-coating-applications/blast-mitigation-protection.htm>
14. Togashi E., Baum J. D., Mestreau E., Löhner R., Sunshine D. Numerical simulation of long duration blast wave evolution in confined facilities. *Shock Waves*. 2012. Vol. 20. P. 409–424. doi: <https://doi.org/10.1007/s00193-010-0278-7>
15. Snyman I. M., Mostert F. J., Olivier M. Measuring pressure in a confined space. 27th international symposium on ballistics. P. 22–26.
16. Anthistle T., Fletcher D. I., Tyas A. Characterization of blast loading in complex, confined geometries using quarter's symmetries per mental methods. *Shock Waves*. 2016. Vol. 26(6). P. 749–757. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00193-016-0621-8>
17. Edri I., Savir Z., Feldgun V. R., Karinski Y. S., Yankelevsky D. Z. On blast pressure analysis due to a partially confined explosion: III. Experimental studies. *International Journal of Protective Structures*. 2012. 2(1). P. 1–20. doi: <https://doi.org/10.1260/2041-4196.3.3.311>

18. Титов Р. В., Анисин А. В. Влияние различных факторов минно-взрывных поражений на экспериментальное животное, облаченное во взрывозащитный костюм. Вест. нац. медико-хирург. Центра. 2010. Т. 5. № 4. С. 80–83.

19. Физика взрыва: в 2 т. Т. 1. / Андреев С. Г., Бабкин Ю. А., Баум Ф. А. и др.; под ред. Орленко Л. П. 3-е изд. перераб. ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 с.

A. Myroshnychenko, Adjunct

R. Shevchenko, DSc, Professor, Head of Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL AND METHODS OF PREVENTION OF EMERGENCY SITUATIONS OF TERRORIST NATURE IN RAILWAY TUNNELS

The paper considers the solution of the problem of increasing the efficiency of the process of prevention of terrorist emergencies in the tunnels of railway transport. Within the framework of the set scientific task the current state of the issue of formation of the mathematical apparatus of methods of counteraction to emergency situations of terrorist character in railway tunnels is analyzed. The physical field and conditions of formation of the mathematical model of prevention of emergencies of terrorist character in railway tunnels and the corresponding technique on its basis are defined. At the final stage of solving the scientific problem, the basic equations of the mathematical model of prevention. In the course of successive solution of the tasks, the existing contradictions in the physical field of model formation are identified and a clear range of functional limitations is formed. Accordingly, the control algorithm of the method should take into account the multilevel liquidation works and the corresponding preliminary procedures for calculating the parameters of the extinguishing pulse and determining the minimum possible distance of blasting, taking into account the risk of pyrotechnics by fragments and structural elements of the railway tunnel. The results obtained in the work allow to further develop a number of practical recommendations for improving the existing standard operating procedures in the case of using additional protection devices and methods of its application in order to reduce the time of localization of terrorist emergencies in railway tunnels, preventing their growth to a higher level of danger, and ensuring a sufficiently high level of individual and collective protection of SES personnel and civilians.

Keywords: emergency situation, mathematical model, warning technique, railway tunnels, explosive device

References

1. Wray, C. (2017). Keeping America Secure in the New Age of Terror. Statement Before the House. URL: <https://www.fbi.gov/news/testimony/keeping-america-secure-in-the-new-age-of-terror>
2. Gus, M. (2017). Understanding Homeland Security. Los Angeles: SAGE, 456.
3. Lundberg, R. (2019). Archetypal Terrorist Events in the United States. *Studies in Conflict Terrorism*, 42:9, 819–835. doi: 10.1080/1057610X.2018.1430618
4. Mauroni, A. (2019). The rise and fall of counter proliferation policy. *The Non-proliferation Review*, 26:1–2, 127–141. doi: 10.1080/10736700.2019.1593691
5. Skilling, L., Zapasnik, M. (2017). Addressing the Explosive Hazard Threat in Northern Syria: Risk Education on Landmines, UXO, Booby Traps, and IEDs. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, 21, 2, 14. Retrieved from <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss2/14>
6. Xiao, T., Horberry, T., Cliff, D. (2015). Analysing mine emergency management needs: a cognitive work analysis approach. *International Journal of Emergency Management (IJEM)*, 11, 3, 191–208. Retrieved from <http://www.inderscience.com/offer.php?id=71705>
7. Toan, D. Q. (2015). Train-the-Trainer Trauma Care Program in Vietnam. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, 19, 1, 9. Retrieved from <http://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol19/iss1/9>

8. Smith, A. (2017). An APT Demining Machine. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, 21, 2, 15. Retrieved from <http://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss2/15>
9. Hadjadj, A. Sado, O. (2013). Shock and blast wave mitigation. *Shock Waves*, 23, 1–4. doi: 10.1007/s00193-012-0429-0
10. Tyas, A., Rigby, S. E., Clarke, S. D. (2014). Preface on special edition on blast load characterization. *International Journal of Protective Structures*, 7, 3, 302–304. doi: 10.1177/2041419616666340
11. Blakeman, S. T., Gibbs A. R., Jeyasingham, J. (2012). A study of mine resistant ambush protected (MRAP) vehicle as a model for rapid defence acquisitions. MBA Professional Report Monterey Naval School. Retrieved from <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a493891.pdf>
12. Sherkar, P., Whittaker, A. S., Aref, A. J. (2012). Modeling the effects of detonations of high explosives to inform blast-resistant design. Technical Report MCEER-10-0009. Retrieved from: <http://mceer.buffalo.edu/pdf/report/10-0009.pdf>
13. Armor Thane Reduces the Impact from Bombs and Bullets. Retrieved from <https://www.armorthane.com/protective-coating-applications/blast-mitigation-protection.htm>
14. Togashi, E., Baum, J. D., Mestreau, E., Löhner, R., Sunshine, D. (2012). Numerical simulation of long duration blast wave evolution in confined facilities. *Shock Waves*, 20, 409–424. doi: 10.1007/s00193-010-0278-7
15. Snyman, I. M., Mostert, F. J. Olivier, M. (2016). Measuring pressure in a confined space. 27th international symposium on ballistics, 22–26.
16. Anthistle, T., Fletcher, D. I. Tyas, A. (2016). Characterization of blast loading in complex, confined geometries using quarter's symmetries per mental methods. *Shock Waves*, 26(6), 749–757. doi: 10.1007/s00193-016-0621-8
17. Edri, I., Savir, Z., Feldgun, V. R., Karinski, Y. S. Yankelevsky, D. Z. (2012). On blast pressure analysis due to a partially confined explosion: III. Experimental studies. *International Journal of Protective Structures*, 2(1), 1–20. doi: 10.1260/2041-4196.3.3.311
18. Tytov, R. V. Anysyn, A. V. (2010). Vliyanye razlychnykh faktorov mynno-vzryvnykh porazheniy na eksperimentalnoe zhyvotnoe, oblachennoe vo vzryvozashchytnyy kostium. *Vest. nats. medyko-khyrurh. Tsentra*, 5, 4, 80–83.
19. Andreev, S. H., Babkyn, Yu. A., Baum, F. A. et al; pod red. Orlenko L. P. (2002). *Fyzyka vzryva*: 2, 1, 3-e yzd., pererab. FYZMATLYT, 832.

Надійшла до редколегії: 05.10.2021

Прийнята до друку: 22.11.2021