

183 ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 331.45

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336385

ВИЗНАЧЕННЯ ТЯЖКОСТІ НАСЛІДКІВ ВИБУХУ ПАЛЬНОГО НА АВТОЗАПРАВНОЇ СТАНЦІЇ

Цопа В.А.	д-р техн. наук, професор, Міжнародний інститут менеджменту, м. Київ, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4811-3712 , e-mail: dr.tsopav@gmail.com ;
Дерюгін О.В.	канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2456-7664 , e-mail: deryugin_o@ukr.net ;
Забеліна В.А.	аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7678-7917 , e-mail: vprotsyuk@gmail.com ;
Чеберячко Л.М.	аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2685-7809 , e-mail: lida_cheb@ukr.net

Мета дослідження. Визначення тяжкості наслідків від вибуху пального на автозаправній станції (АЗС). **Матеріали і методи.** Для визначення шкали тяжкості наслідків від вибуху пального використовували метод ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) – спеціалізовану програму, розроблену для надання персоналу служб реагування на надзвичайні ситуації оцінки просторового масштабу деяких поширених небезпек, пов'язаних із розливами хімікатів, пожеж, вибухів. **Результати.** Визначено тяжкість наслідків від вибуху небезпечної речовини на основі розрахунку радіусів зон ураження інфраструктури організації та цивільної інфраструктури, персоналу та цивільного населення, забруднення навколишнього середовища від чотирьох вражаючих чинників вибуху: повітряної ударної хвилі, потужності теплового випромінювання, механічного впливу осколків і фрагментів, обсягу газоподібних продуктів, що виділяються при вибуху. Запропоновано для визначення радіусів зон ураження для конкретного підприємства провести моделювання вибуху пального за різними сценаріями, використовуючи програму ALOHA, яка дозволяє розрахувати зони розповсюдження ударної хвилі, інтенсивності випромінювання, забруднення навколишнього середовища. **Наукова новизна** полягає у встановленні взаємозв'язку між радіусом ураження ударною хвилею, потужністю теплового випромінювання, забрудненням шкідливими газами та тяжкістю наслідків від вибуху пального з критерієм неприйнятності ризику – межі максимальної небезпечної зони ураження від вражаючих чинників вибуху. **Практичне значення** полягає у розробці моделі причинно-наслідкових взаємозв'язків між небезпекою, небезпечною подією і наслідками для визначення тяжкості наслідків вибуху пального на основі моделювання зон ураження інфраструктури, персоналу та навколишнього середовища.

Ключові слова: автозаправна станція, вибух, наслідки, моделювання.

Постановка проблеми

Для оцінювання ризику безпеки потрібно дві складові: ймовірність настання небезпечної ситуації (в даному випадку – вибух небезпечної речовини) і тяжкості наслідків від її настання [1]. При визначенні ймовірності настання небезпечної події та тяжкості наслідків користуються статистичними даними щодо настання небезпечної події і наслідків, до яких вона призводить [2]. При цьому, виходячи із прийнятої моделі оцінювання ризиків для ймовірності настання небезпечної події та тяжкості наслідків, встановлюють інтервали чи шкали, які дозволяють встановлювати ступінь впливу безпеки [3]. Щільність інтервалу чи діапазон шкали залежить від заданої достовірності оцінювання ризику. Головною умовою для побудови інтервалів чи шкал ймовірності та тяжкості наслідків являється їх зрозумілість для користувачів [4]. Найчастіше використовують

п'ять інтервалів [5]. Наприклад, для ймовірності настання небезпечної події – це не більше ніж один раз на день; не більше ніж один раз на тиждень; не більше ніж один раз на місяць; не більше ніж один раз на півроку; не більше ніж один раз на рік. Тяжкість наслідків від настання небезпечної події визначають за критерієм втрати життя і здоров'я людини: не більше ніж одна смерть або групові тяжкі травми; не більше ніж одна тяжка травма або групові середні травми; не більше ніж одна середня травма або групові легкі травми; не більш ніж одна легка травма або групові забиття; не більш ніж одна без наслідків. Разом з тим, наслідки від настання небезпечної події – це комплексний показник, який характеризує матеріальні, фінансові, соціальні, економічні, екологічні втрати. Тому виникає необхідність в обґрунтуванні комплексного показника, який дозволив поєднати всі вище зазначені наслідки небезпечної події. Ситуація погіршується через відсутність достовірної

інформації щодо виникнення потенційно небезпечних смертельних зон ураження, які загрожують як людині, так інфраструктурі та навколишньому середовищу, що потребує проведення додаткових розрахунків. Іноді використовуються загальноприйняті методи з використанням довідкових даних [6], що характеризуються труднощістю. Все це зумовлює невиправдано значні витрати часу, а також при цьому не виключено можливість помилок у процесі підготовки та обробки даних. Тому пошук шляхів спрощення розрахунків для встановлення небезпечних зон від впливу небезпечної події дозволяє провести результативне оцінювання ризиків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В роботі [7] запропоновано методику оцінювання професійних ризиків на основі використання об'ємної матриці ризиків. Особливість цієї матриці полягає в тому, що для визначення рівня ризику запропоновано три шкали – ймовірність настання небезпечної події, наслідки від її настання і також схильність об'єкту до настання небезпечної події. Цікаво, що під схильністю автори пропонують розглядати залишковий рівень ризику від попередніх оцінок. Це дозволяє якісніше проводити оцінювання та обґрунтування необхідності використання захисних і запобіжних заходів. Разом з тим, показник схильність до настання небезпечної події потребує деталізації та розробки відповідних критеріїв для оцінювання різних небезпечних ситуацій.

В роботі [8] розглянута проблема розробки матриць для оцінювання ризиків. Автори звернули увагу на необхідність долучення працівників для визначення зручності використання запропонованих матриць на конкретному підприємстві. Важливим показником зручності являється її зрозумілість і простота використання. Разом з тим, виникало питання щодо визначення інтервалів для ймовірності настання небезпечної події і тяжкості наслідків. В публікації запропоновано вириховувати шість інтервалів, але як їх розраховувати, на жаль, інформація відсутня.

В роботах [9, 10] запропоновано рекомендації для визначення тяжкості наслідків небезпечної події з точки зору ранжування відхилень від нормального (стаціонарного) стану об'єкту з відображенням впливу непередбачених обставин. При цьому зазначається на необхідності враховувати альтернативи оцінки тяжкості наслідків від настання небезпечної події на основі економічних і матеріальних аспектів. Проте виникає питання щодо узгодженості різних підходів до визначення зазначеного показника для кількісної оцінки різних впливів непередбачених ситуацій.

В роботі [11] автори запропонували цікавий підхід до визначення ризику аварії на складах зберігання боєприпасів. Його відмінністю від відомих являється можливість прогнозування кількості небезпечних отруйних речовин, які можуть виділитися при вибухах і тим самим призвести до отруєння людей, які знаходяться в небезпечній зоні. Автори також розглянули

ситуацію, коли відбувається зважений рівномірний розподіл отруйних речовин на визначеній території, а також появи осередків високої концентрації шкідливих чинників з часом та під впливом різних природних факторів.

В роботі [12] автори розробили методику з розрахунку екологічних наслідків аварій на військових об'єктах. Її відмінністю від відомих, які оцінюють тільки прямі витрати від руйнації будівель, обладнання, забруднення навколишнього середовища, являється визначення витрат, які пов'язані з ліквідацією осередку аварії. Автори говорять, що фінансові суми, які виділяються на оплату проведення пожежно-рятувальних робіт, залучення різноманітної техніки та засобів, є доволі суттєвими і повинні бути враховані при оцінюванні ризику втрат.

В наступних роботах [13-15], які присвячені оцінюванню потенційного ризику від антропогенних аварій, в тому числі і на військових об'єктах, послідовно реалізується ідея визначення комплексної дії різних небезпечних чинників, притаманних вибуху. Запропоновані методики для розрахунку виділення шкідливих чинників в навколишнє середовище від продуктів загоряння, забруднення питної води, а також методики для визначення гострого токсичного ефекту, який проявляється в людей, що знаходились в аварійній зоні. Крім того, запропоновано підхід для визначення й хронічної інтоксикації та оцінку довгострокового впливу токсикантів на здоров'я людини.

Проведений аналіз досліджень і публікацій показав, що методики з розрахунку тяжкості наслідків від комплексної дії різних небезпечних чинників після вибуху не існує. У наведених роботах кожен з авторів пропонує оцінювання найбільш впливового небезпечного чинника, який має довгостроковий ефект.

Мета статті

Метою дослідження є визначення тяжкості наслідків від вибуху пального на АЗС.

Виклад основного матеріалу

Пропонується для визначення тяжкості наслідків від вибуху пального на АЗС скористатись моделлю краватка-метелик для визначення причинно-наслідкових зв'язків між безпекою (паливо) і небезпечною подією (вибух) та наслідками: втратою життя і здоров'я людей, руйнування інфраструктури, забруднення навколишнього середовища. Особливістю цієї моделі являється те, що вибух пального характеризується чотирьома вражаючими чинниками: повітряною ударною хвилею, потужним тепловим випромінюванням, обсягом газоподібних продуктів, що виділяється при вибуху, та розлітанням уламків від зруйнованих будівель (рис. 1). Звідси тяжкість наслідків можна визначити як зону сумарної дії всіх вражаючих чинників вибуху, яка призведе до загибелі та травмування людей і руйнування інфраструктури.

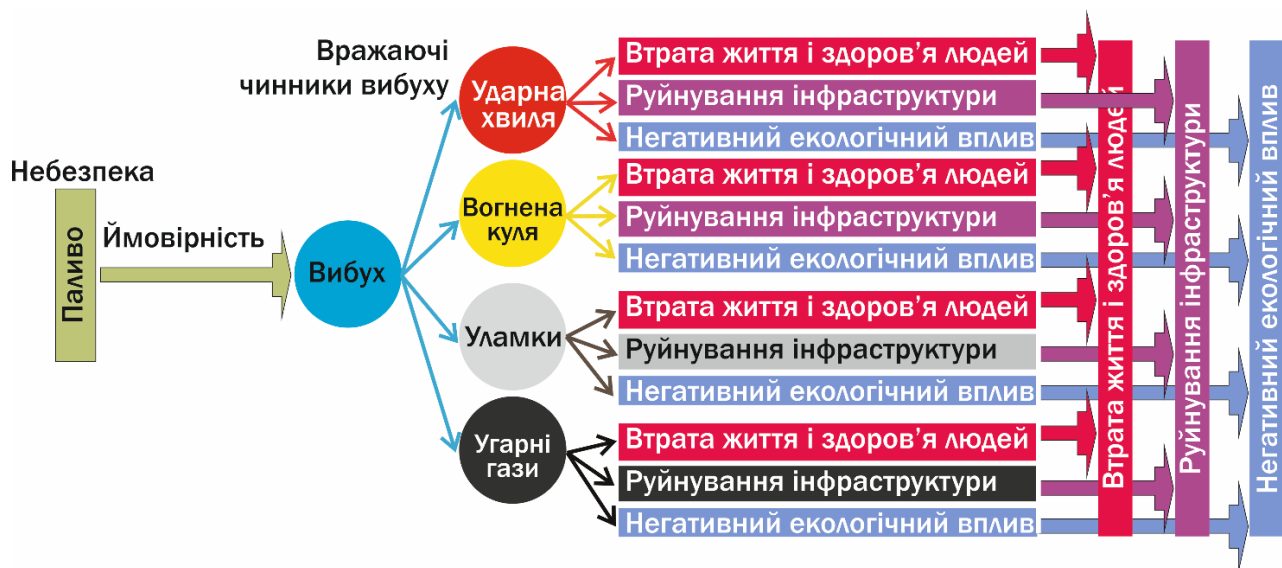


Рис. 1 – Модель ризику вибуху пального на АЗС

Кожен із зазначених вражаючих чинників має певну тяжкість травмування людей, руйнування інфраструктури та забруднення навколишнього середовища. Виникає необхідність у визначенні розмірів радіусів зон, в яких є неприйнятний рівень тяжкості травмування людей, руйнування інфраструктури та забруднення навколишнього середовища, щоб обрахувати потенційні збитки (тяжкість втрат) від вибуху небезпечної речовини.

Для оцінки радіусу зони дії ударної хвилі застосовується тротильовий еквівалент вибуху парогазового середовища W_T (кг), що визначається за умовами адекватності характеру та ступеня руйнування під час вибухів парогазових хмар, та для парогазових середовищ розраховується за формулою [16]:

$$W_T = \frac{0.4q^i}{0.9q_T}, \quad (1)$$

де 0,4 – частка енергії вибуху парогазового середовища, що витрачається безпосередньо на формування ударної хвилі; 0,9 – частка енергії вибуху тринітратолуолу (далі – ТНТ), що витрачається безпосередньо на формування ударної хвилі; q – питома теплота згоряння парогазового середовища, кДж/кг; q_T – питома енергія вибуху ТНТ, кДж/кг.

Виходячи з рівня тротильового еквіваленту вибуху, можна розрахувати радіус зони руйнування, границі якої характеризуються значеннями надлишкових тисків на фронті ударної хвилі ΔP . Радіус зони руйнування у загальному вигляді визначається за формулою [17]:

$$R = K \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right]^{1/6}}, \quad (2)$$

де R – радіус зони ураження, м; K – безрозмірний коефіцієнт, що характеризує вплив вибуху на об'єкт, $K = 3,8$ – повне руйнування будинків ($\Delta P \geq 100$ кПа); 5,6 – 50% будинків повністю зруйновані ($\Delta P \approx 70$ кПа); 9,6 – будинки непридатні для мешкання ($\Delta P = 28$ кПа); 28 – помірні руйнування, uszkodження внутрішніх неміцних перегородок ($\Delta P = 14$ кПа); 56 – незначні uszkodження будинків, розбито 10% скла ($\Delta P \leq 2$ кПа).

Розрахунок радіусу зон інтенсивності теплового випромінювання для «вогняної кулі», яка представляє собою великомасштабне дифузійне горіння, що реалізується у випадку розриву ємності з горючою рідиною, проводимо за формулою [17]:

$$q = E_f \times F_q \times \varphi, \quad (3)$$

де E_f – середньоповерхнева густина теплового випромінювання полум'я, кВт/м²; F_q – кутовий коефіцієнт опромінення; φ – коефіцієнт пропускання теплового випромінювання крізь атмосферу.

Для розрахунку зони забруднення газоподібними продуктами, що виділяються, розраховують глибину (Γ) за формулою [18]:

$$\Gamma = 34,2 \sqrt[3]{\frac{q^2}{PC_\phi^2 V^2}}, \quad (4)$$

де q – кількість небезпечної речовини, кг; PC_ϕ – токсична доза, мг хв/л; V – швидкість вітру, м/с.

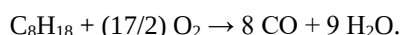
Площу зони фактичного забруднення розраховуємо за формулою [18]:

$$S_\phi = k \times \Gamma^2 \times T^{0,2}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від ступеню вертикальної стійкості атмосфери, який приймається рівним: 0,081 – при інверсії; 0,133 – при ізотермі; 0,235 – при конвекції; T – час, який пройшов після аварії.

При вибуху бензину до найбільш небезпечних газоподібних продуктів відноситься: оксид вуглецю та оксид азоту. При вибуху бензину утворюються різні газоподібні продукти, включаючи оксид вуглецю (CO) та оксиди азоту (NO_x). Для оцінки маси цих продуктів при вибуху 25 тонн бензину можна використовувати деякі припущення та спрощення.

Бензин складається переважно з вуглеводнів, таких як октан (C₈H₁₈). При повному згорянні 1 моля октану (C₈H₁₈) з утворенням CO:



Молярна маса октану (C₈H₁₈) ≈ 114 г/моль, молярна маса CO ≈ 28 г/моль, при повному згорянні 1 моля октану утворюється 8 молів CO. Маса CO, утвореного з 1 моля октану: 8 молів CO $\times 28$ г/моль = 224 г. Маса CO, утвореного з 1 кг октану: $(224 \text{ г} / 114 \text{ г}) \times 1000 \text{ г} \approx 1964 \text{ г}$. Маса CO, утвореного з 25 тонн бензину: $25 \times 10^6 \text{ г} \times 1964 \text{ г/кг} \approx 49100 \text{ кг}$.

Утворення NO_x залежить від температури та наявності азоту в повітрі. Припустимо, що частка NO_x становить приблизно 0.1% від маси палива (це дуже приблизне значення і може сильно варіюватися). Маса NO_x, утвореного з 25 тонн бензину:

$$25 \times 10^3 \text{ кг} \times 0.001 \approx 25 \text{ кг}.$$

Таким чином, при вибуху 25 тонн бензину маса оксиду вуглецю (CO) може скласти приблизно 49100 кг, а маса оксидів азоту (NO_x) – приблизно 25 кг. Ці значення є приблизними і можуть варіюватися в залежності від умов вибуху та складу бензину. Розрахунок провели за рекомендаціями, наданими в роботі [19].

Для розрахунку зазначених радіусів зон ураження інфраструктури від ударної хвилі, інтенсивності випромінювання та забруднення газоподібними продуктами від вибуху небезпечної речовини пропонується скористатись програмою ALOHA [20]. ALOHA пов'язує моделі потужності джерела з моделлю дисперсії. Щоб оцінити просторовий розмір легкозаймистих парів і вибухонебезпечних хмар парів, користувач повинен вибрати: тип та геометричні параметри резервуару, тип хімічної речовини, об'єм або масу речовини, а також інші параметри, необхідні для моделювання зон небезпеки (рис. 2).

ALOHA використовує графічний інтерфейс визначення небезпечних зон ураження вибуху (рис. 3). Область, де існує ймовірність впливу токсичних випарів, горючої атмосфери, надлишкового тиску внаслідок вибуху хмари пари або теплового випромінювання від пожежі, представлено графічно як зони загрози.

Atmospheric Options

Wind Speed is: 7 knots mph meters/sec Help

Wind is from: SW Enter degrees true or text (e.g. ESE)

Measurement Height above ground is: Help

OR enter value: 10 feet meters

Ground Roughness is: Help

Open Country Urban or Forest OR Input Roughness (Z₀):

Open Water

Select Cloud Cover: Help

complete cover partly cloudy clear

OR enter value: 7 [0 - 10]

OK Cancel

a)

Tank Size and Orientation

Select tank type and orientation:

Horizontal cylinder Vertical cylinder Sphere

Enter two of three values:

diameter 1.7011 feet meters

length 11

volume 25,000 liters cu meters

OK Cancel Help

б)

Рис. 2 – Вікна програми ALOHA для заповнення вхідних даних: навколишнього середовища (а) і характеристик резервуару (б)

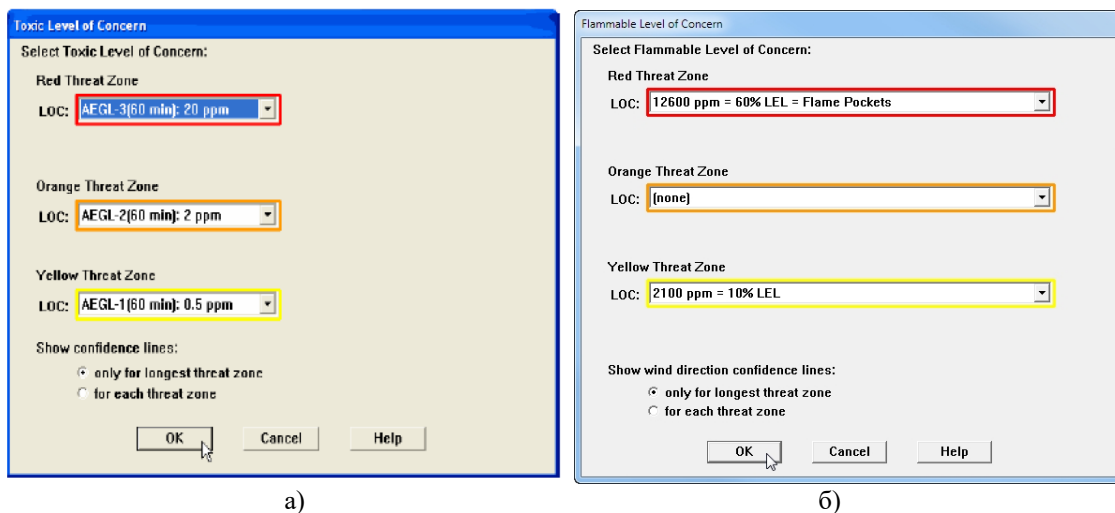


Рис. 3 – Вікна програми ALOHA для заповнення вхідних даних: щодо розрахунку небезпечних зон від забруднення навколишнього середовища (а) і теплового випромінювання (б) після вибуху



Рис. 4 – Карта з розміщення АЗС

В якості прикладу для оцінки ризиків викиду небезпечних речовин було використано АЗС (рис. 4), які вважаються об'єктами підвищеної небезпеки, оскільки технологічний процес пов'язаний з виникненням можливих надзвичайних ситуацій, таких як пожежі, вибухи та ін. при використанні пального.

З використанням ALOHA проведено моделювання наслідків вибуху бензину в горизонтальному циліндричному резервуарі бензовозу, який під'їхав на АЗС для його злиття в резервуар. Технічні

характеристики резервуару: діаметр: 1,7011 м, довжина: 11 м, об'єм: 25 000 л при різних умовах навколишнього середовища (температури повітря, яка змінюється від 0 до 30°C; швидкості вітру від 0 до 20 м/с).

Теоретичні результати дослідження.

На рис. 5 наведені результати моделювання наслідків вибуху резервуару автоцистерни з бензином. Розрахунок радіусів зон ураження ударної хвилі, інтенсивності випромінювання та забруднення газоподібними продуктами наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку радіусів зон ураження ударною хвилею ($\Delta P \geq 100 \text{ кПа}$), ураження від інтенсивності випромінювання тепла потужністю 2 кВт/м^2 , забруднення газоподібних речовин

№ з/п	Наповненість резервуару бензовозу (%)	Розміри радіусів зон ураження після вибуху резервуару бензовозу, м		
		З повним руйнуванням інфраструктури вибуховою ударною хвилею, ($\Delta P \geq 100 \text{ кПа}$)	З інтенсивністю випромінювання 2 кВт/м^2 , смертельно протягом 60 с	Із забруднення газоподібних речовин масою $10,83 \text{ т}$, які виділились після вибуху
1	100	18,4	170,9	106,1
2	60	16,4	150,6	95,1
3	40	13,4	130,1	83,7

Результати моделювання дозволяють розрахувати збитки, які зазначаються в [21], що заподіянні:

- функціонуванню інфраструктури як цивільної, так і виробничої з урахуванням витрат на локалізацію і ліквідацію аварії (3_i);

- навколишньому середовищу (знищення корисної флори, фауни, рослинності) (3_e);

- втрати життя і здоров'я персоналу промислового об'єкту (3_n).

Обговорення.

Прогнозування небезпечних ситуацій у контексті сучасного світу являється актуальною задачею, оскільки питання охорони навколишнього середовища та сталого розвитку стають надзвичайно важливими, зважаючи на утворення високих концентрацій шкідливих речовин на потенційно небезпечних об'єктах. Наприклад, під час техногенної аварії на автозаправних станціях, які призведуть до значного ризику втрати здоров'я або навіть життя як працівників, так і населення [22, 23]. АЗС розташовані поблизу міст і житлових районів, в охоронюваних ландшафтах, національних парках і поблизу джерел питної води, що підвищує ймовірність їх забруднення, руйнування інфраструктури та забудівель. Це вимагає розробки процесу оцінювання ризиків для навколишнього середовища від джерел небезпек, пов'язаних з діяльністю промислових об'єктів [24, 25].

Визначення тяжкості наслідків від вибуху пального на АЗС на основі розрахунку радіусів зон ураження інфраструктури організації та цивільної інфраструктури, персоналу та цивільного населення, забруднення навколишнього середовища від чотирьох вражаючих чинників вибуху: повітряної ударної хвилі, потужності теплового випромінювання, механічного впливу осколків і фрагментів, обсягу газоподібних продуктів, що виділяються при вибуху в повітря, дозволяє розрахувати загальну суму фінансового збитку,

обґрунтувати доцільність застосування тих чи інших запобіжних чи захисних заходів на основі порівняння витрат на нове обладнання і збитків від настання небезпечної ситуації. Особливістю запропонованого підходу до визначення тяжкості наслідків являється можливість визначення максимальних фінансових збитків від всіх небезпечних процесів, які проводяться на АЗС. При цьому розрахунок збитків буде проводитись від настання найнебезпечнішої небезпечної події, яка буде характеризуватись найгіршими наслідками щодо руйнування інфраструктури, травмування та загибелі людей, забруднення території. В даній роботі наведено, один із прикладів настання небезпечної події вибуху пального при його зливів з автоцистерни, що дозволило встановити максимальну зону ураження і оцінити відповідні фінансові збитки. В подальшому, проаналізувавши всі можливі аварійні ситуації з вибухами, з'являється можливість визначення витрат та запровадження відповідних запобіжних заходів.

Аналізуючи наведену небезпечну подію, було встановлено, що небезпечним чинником, який призведе до максимальних збитків, являється зона ураження інфраструктури ударною хвилею, яка несе найбільшу кількість руйнувань і вражень персоналу АЗС. З іншого боку, комплексний підхід дозволяє визначити кумулятивний ефект від декількох небезпечних зон, що утворюються різними небезпечними чинниками, що дозволяє встановлювати критерії для визначення наслідків втрат.

Підкреслимо, що витрати на впровадження процесу оцінювання тяжкості наслідків вибуху пального автоцистерни можуть бути ефективними з інвестиційної точки зору, оскільки превентивне планування (заходи щодо запобігання серйозної аварії) вимагає значно менше коштів, ніж на витрати на засоби та заходи з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації та відновлення до початкового стану будівель та території.

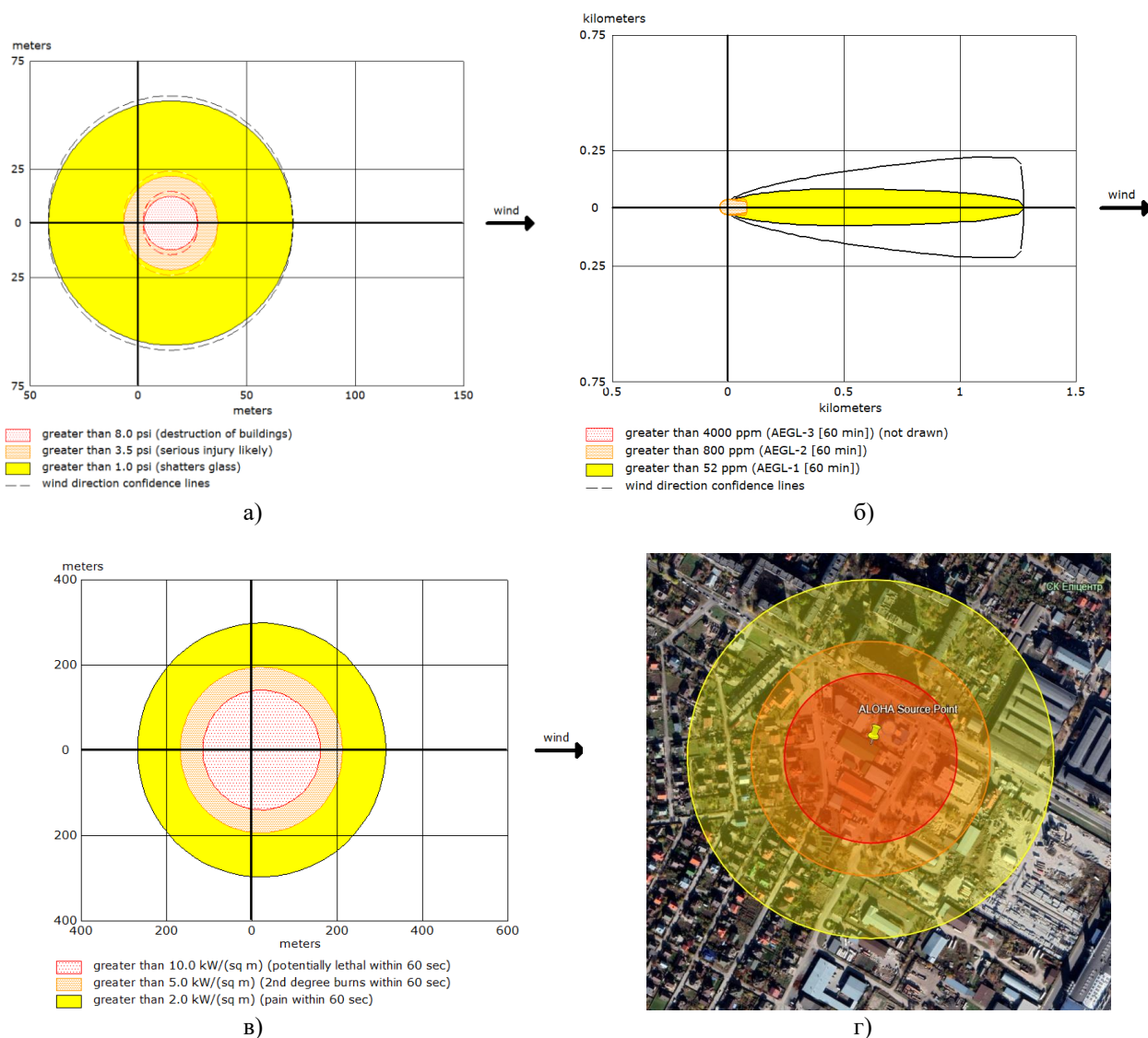


Рис. 5 – Результати поведеного розрахунку: площини розповсюдження ударної хвилі (а), інтенсивності випромінювання (б), забруднення навколишнього середовища (в), загальної площі пошкоджень на АЗС (г)

Висновки

Визначено модель тяжкості наслідків від вибуху небезпечної речовини – пального – на основі розрахунку радіусів зон ураження інфраструктури організації та цивільної інфраструктури, персоналу та цивільного населення, забруднення навколишнього середовища від чотирьох вражаючих чинників вибуху: повітряної ударної хвилі, потужності теплового випромінювання, механічного впливу осколків і фрагментів, обсягу газоподібних продуктів, що виділяються при вибуху в повітря. Запропоновано використовувати програму ALOHA для визначення зон ураження від вражаючих чинників вибуху для розрахунку тяжкості наслідків для конкретного підприємства за критерієм неприйнятності ризику – межі максимальної небезпечної зони ураження інфраструктури, персоналу та навколишнього середовища.

Перелік використаних джерел

- [1] Leveson N. A new accident model for engineering safer systems. *Safety Science*. 2004. Vol. 42(4). Pp. 237-270. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X).
- [2] Citizens' Preparedness to Deal with Emergencies as an Important Component of Civil Protection / J. Kubás et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19(2). Article 830. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19020830>.
- [3] Ak R., Bahrami M., Bozkaya B. A Time-based Model and GIS Framework for Assessing Hazardous Materials Transportation Risk in Urban Areas. *Journal of Transport & Health*. 2020. Vol. 19. Article 100943. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jth.2020.100943>.
- [4] Zhang C., Li Y., Zhu X. A Social-Ecological Resilience Assessment and Governance Guide for

- Urbanization Processes in East China. *Sustainability*. 2016. Vol. 8(11). Article 1101. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8111101>.
- [5] Paula H.M. Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 171. Pp. 773-782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.01.058>.
- [6] Impact of Filling Stations: Assessing the Risks and Consequences of the Release of Hazardous Substances / Mäkkä K., Šiser A., Mariš L., Kampová K. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(1). Article 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14010022>.
- [7] Цимбал Б. Робототехніка та штучний інтелект: заходи з безпеки та джерела загроз. *Комунальне господарство міст*. 2024. Вип. 3(184). С. 250-258. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-3-184-250-258>.
- [8] Jensen R.C., Bird R.L., Nichols B.W. Risk Assessment Matrices for Workplace Hazards: Design for Usability. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19. Article 2763. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19052763>.
- [9] Дослідження техногенних загроз на підприємствах гірничо-металургійного комплексу та обґрунтування заходів безпеки / Володченко Н.В., Чеберячко Ю.І., Кружилко О.С., Репін М. В. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2024. Вип. 40(3-4). С. 18-23. DOI: <https://doi.org/10.36804/nndipbop.40-3-4.2024.18-23>.
- [10] Ukraine, damage to the environment, environmental consequences of war / O. Angurets et al. 2023. 80 p. Режим доступу: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-environmental-consequences-of-russian-war-in-ukraine-war-damages-en-version.pdf> (дата звернення: 20.10.2024).
- [11] Deary M.E., Griffiths S.D. The Impact of Air Pollution from Industrial Fires in Urban Settings: Monitoring, Modelling, Health, and Environmental Justice Perspectives. *Environments*. 2024. Vol. 11(7). Article 157. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments11070157>.
- [12] Methodology for assessment of public health emergency preparedness and response synergies between institutional authorities and communities / D.H. de Vries et al. *BMC Health Services Research*. 2020. Vol. 20(1). Article 411. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12913-020-05298-z>.
- [13] Sun Y., Yang Q., Peng X. Structural Damage Assessment Using Multiple-Stage Dynamic Flexibility Analysis. *Aerospace*. 2022. Vol. 9(6). Article 95. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace9060295>.
- [14] Novik G.P., Abrahamsen E.B., Sommer M. On the importance of systems thinking in ERW (explosive remnants of war) risk management. *Progress in Disaster Science*. 2024. Vol. 21. Article 100309. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2023.100309>.
- [15] Методика оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру : Постанова Кабінету Міністрів України від 4.06.2003 р. № 862. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-%D0%BF#Text> (дата звернення: 25.10.2024).
- [16] Chu E.W., Karr J.R. Environmental Impact: Concept, Consequences, Measurement. *Reference Module in Life Sciences*. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.02380-3>.
- [17] Calculation of the environmental impact of the integration of industrial waste in concrete using LCA / de Brito J., Hafez H., Kurda R., Silvestre J. *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management. Recycled and Artificial Aggregate, Innovative Eco-Friendly Binders, and Life Cycle Assessment. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. 2022. Pp. 553-577. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821730-6.00020-6>.
- [18] A life cycle assessment of destruction of ammunition / K. Alverbro et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. Vol. 170(2-3). Pp. 1101-1109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.092>.
- [19] ALOHA Software. URL: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software> (дата звернення: 20.10.2024).
- [20] Про оцінку майна, майнових прав та професійну оціночну діяльність в Україні : Закон України від 12.07.2001 № 2658-III. Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1440-2003-%D0%BF> (дата звернення: 30.10.2024).
- [21] Корецька О., Жихарева В. Огляд міжнародних та вітчизняних стандартів оцінки вартості бізнесу в системі правового регулювання оціночної діяльності. *Економіка та суспільство*. 2023. Vol. 48. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-48-18>.
- [22] Malviya R.K., Rushaid M. Consequence Analysis of LPG Storage Tank. *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5(2), part 1. Pp. 4359-4367. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.003>.
- [23] Dandrieux A., Dimbour J.P., Dusserre G. Are dispersion models suitable for simulating small gaseous chlorine releases? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2006. Vol. 19(6). Pp. 683-689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2006.04.001>.
- [24] Dynamic Process and Damage Evaluation Subject to Explosion Consequences Resulting from a LPG Tank Trailer Accident / K. Wang et al. *Processes*. 2023. Vol. 11(5). Article 1514. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11051514>.
- [25] Evaluation of hazard range for the natural gas jet released from a high-pressure pipeline: A computational parametric study / Dong G., Xue L., Yang Y., Yang J. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2010. Vol. 23(4). Pp. 522-530. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2010.04.007>.

DETERMINING THE SEVERITY OF THE CONSEQUENCES OF A FUEL EXPLOSION AT A GAS STATION

Tsopa V.	D.Sc. (Engineering), professor, International Management Institute, Kyiv, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4811-3712 , e-mail: dr.tsopav@gmail.com ;
Deryugin O.	PhD (Engineering), associate professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2456-7664 , e-mail: deryugin_o@ukr.net ;
Zabelina V.	postgraduate student, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7678-7917 , e-mail: vprotsyuk@gmail.com ;
Cheberiachko L.	postgraduate student, Dnipro University of Technology, Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2685-7809 , e-mail: lida_cheb@ukr.net

Research objective. Determining the severity of consequences from a fuel explosion at a gas station. **Materials and methods.** To determine the severity scale of the consequences of a fuel explosion, the ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) method was used - a specialized program designed to provide emergency response personnel with an assessment of the spatial scale of some common hazards associated with chemical spills, fires, explosions. **Results.** The severity of the consequences of an explosion of a hazardous substance is determined based on the calculation of the radii of the zones of damage to the organization's infrastructure and civil infrastructure, personnel and the civilian population, environmental pollution from four damaging factors of the explosion: air shock wave, thermal radiation power, mechanical impact of fragments and fragments, the volume of gaseous products released during the explosion. It is proposed to determine the radii of the zones of damage for a specific enterprise to conduct modeling of a fuel explosion under various scenarios using the ALOHA program, which allows you to calculate the zones of shock wave propagation, radiation intensity, environmental pollution. **Scientific novelty.** Consists in establishing the relationship between the radius of impact by the shock wave, the power of thermal radiation, pollution by harmful gases and the severity of the consequences of a fuel explosion with the criterion of unacceptability of the risk - the limit of the maximum dangerous zone of impact from the damaging factors of the explosion. **Practical significance** consists in developing a model of cause-and-effect relationships between hazard, hazardous event and consequences to determine the severity of the consequences of a fuel explosion based on modeling the areas affected by infrastructure, personnel and the environment.

Keywords: gas station, explosion, consequences, modeling.

References

- [1] N. Leveson, «A new accident model for engineering safer systems», *Safety Science*, vol. 42(4), pp. 237-270, 2004. doi: 10.1016/S0925-7535(03)00047-X.
- [2] J. Kubás, K. Bugánová, M. Polorecká, K. Petřlová, and A. Stolinová, «Citizens' Preparedness to Deal with Emergencies as an Important Component of Civil Protection», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19(2), article 830, 2022. doi: 10.3390/ijerph19020830.
- [3] R. Ak, M. Bahrami, and B. Bozkaya, «A Time-based Model and GIS Framework for Assessing Hazardous Materials Transportation Risk in Urban Areas», *Journal of Transport & Health*, vol. 19, article 100943, 2020. doi: 10.1016/j.jth.2020.100943.
- [4] C. Zhang, Y. Li, and X. Zhu, «A Social-Ecological Resilience Assessment and Governance Guide for Urbanization Processes in East China», *Sustainability*, vol. 8(11), article 1101, 2016. doi: 10.3390/su811101.
- [5] H.M. Paula, «Insights from 595 tank farm fires from around the world», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 171, pp. 773-782, 2023. doi: 10.1016/j.psep.2023.01.058.
- [6] K. Mäkkä, A. Šiser, L. Mariš, and K. Kampová, «Impact of Filling Stations: Assessing the Risks and Consequences of the Release of Hazardous Substances», *Applied Sciences*, vol. 14(1), article 22, 2024. doi: 10.3390/app14010022.
- [7] B. Tsymbal, «Robototekhnika ta shtuchnyi intelekt: zakhody z bezpeky ta dzherela zahroz» [«Robotics and artificial intelligence: safety measures and potential threats»], *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal economy of cities*, vol. 3(184), pp. 250-258, 2024. doi: 10.33042/2522-1809-2024-3-184-250-258. (Ukr.)
- [8] R.C. Jensen, R.L. Bird, and B.W. Nichols, «Risk Assessment Matrices for Workplace Hazards: Design for Usability», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, article 2763, 2022. doi: 10.3390/ijerph19052763.
- [9] N. Volodchenkova, Yu. Cheberiachko, O. Kruzhilko, and M. Repin, «Doslidzhennia tekhnohennykh zahroz na pidpriemstvakh hirnycho-metalurhiinoho kompleksu ta obgruntuvannia zakhodiv bezpeky» [«Research into technogenic threats at mining and metallurgical enterprises and justification of safety measures»], *Problemy okhorony pratsi v Ukraini – Labour protection problems in Ukraine*, vol. 40(3-4), pp. 18-23, 2024. doi: 10.36804/nndipbop.40-3-4.2024.18-23. (Ukr.)
- [10] O. Angurets, P. Khazan, K. Kolesnikova, M. Kushch, M. Černochova, and M. Havránek, *Ukraine, damage*

- to the environment, environmental consequences of war. 2023. [Online]. Available: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-environmental-consequences-of-russian-war-in-ukraine-war-damages-en-version.pdf>. Accessed on: October 20, 2024.
- [11] M.E. Deary, and S.D. Griffiths, «The Impact of Air Pollution from Industrial Fires in Urban Settings: Monitoring, Modelling, Health, and Environmental Justice Perspectives», *Environments*, vol. 11(7), article 157, 2024. doi: **10.3390/environments11070157**.
- [12] D. H. de Vries, J. Kinsman, J. Takacs, S. Tsoleva, and M. Ciotti, «Methodology for assessment of public health emergency preparedness and response synergies between institutional authorities and communities», *BMC Health Services Research*, vol. 20(1), article 411, 2020. doi: **10.1186/s12913-020-05298-z**.
- [13] Y. Sun, Q. Yang, and X. Peng, «Structural Damage Assessment Using Multiple-Stage Dynamic Flexibility Analysis», *Aerospace*, vol. 9(6), article 95, 2022. doi: **10.3390/aerospace9060295**.
- [14] G.P. Novik, E.B. Abrahamsen, and M. Sommer, «On the importance of systems thinking in ERW (explosive remnants of war) risk management», *Progress in Disaster Science*, vol. 21, article 100309, 2024. doi: **10.1016/j.pdisas.2023.100309**.
- [15] Metodyka otsinky zbytkiv vid naslidkiv nadzvychnykh sytuatsii pryrodnoho i tekhnolohynoho kharakteru [Methodology for assessing losses from the consequences of natural and man-made emergencies], Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 4.06.2003 No. 862. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2002-%D0%BF#Text>. Accessed on: October 25, 2024.
- [16] E.W. Chu, and J.R. Karr, «Environmental Impact: Concept, Consequences, Measurement», *Reference Module in Life Sciences*, 2017. doi: **10.1016/B978-0-12-809633-8.02380-3**.
- [17] J. de Brito, H. Hafez, R. Kurda, and J. Silvestre, «Calculation of the environmental impact of the integration of industrial waste in concrete using LCA», in *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management. Recycled and Artificial Aggregate, Innovative Eco-Friendly Binders, and Life Cycle Assessment*. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2022, pp. 553-577. doi: **10.1016/B978-0-12-821730-6.00020-6**.
- [18] K. Alverbro, A. Björklund, G. Finnveden, E. Hochschorner, J. Hägval, «A life cycle assessment of destruction of ammunition», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170(2-3), pp. 1101-1109, 2009. doi: **10.1016/j.jhazmat.2009.05.092**.
- [19] ALOHA Software. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>. Accessed on: October 20, 2024.
- [20] Pro otsinku maina, mainovykh prav ta profesiinu otsinochnu diialnist v Ukraini [On the valuation of property, property rights and professional valuation activities in Ukraine], Law of Ukraine dated 12.07.2001 № 2658-III. [Online]. Available: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1440-2003-%D0%BF>. Accessed on: October 30, 2024.
- [21] O. Koretska, and V. Zhykharieva, «Ohliad mizhnarodnykh ta vitchyznianskykh standartiv otsinky vartosti biznesu v systemi pravovoho rehuliuвання otsinochnoi diialnosti» [«Overview of international and foreign standards for estimating business value in the system of legal regulation of valuation activities»], *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society*, vol. 48, 2023. doi: **10.32782/2524-0072/2023-48-18**.
- [22] R.K. Malviya, and M. Rushaid, «Consequence Analysis of LPG Storage Tank», *Materials Today: Proceedings*, vol. 5(2), part 1, pp. 4359-4367, 2018. doi: **10.1016/j.matpr.2017.12.003**.
- [23] A. Dandrieux, J.P. Dimbour, and G. Dusserre, «Are dispersion models suitable for simulating small gaseous chlorine releases?», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 19(6), pp. 683-689, 2006. doi: **10.1016/j.jlp.2006.04.001**.
- [24] K. Wang, Y. Liu, H. Wang, X. Liu, Y. Jiao, and Y. Wu, «Dynamic Process and Damage Evaluation Subject to Explosion Consequences Resulting from a LPG Tank Trailer Accident», *Processes*, vol. 11(5), article 1514. doi: **10.3390/pr11051514**.
- [25] G. Dong, L. Xue, Y. Yang, and J. Yang, «Evaluation of hazard range for the natural gas jet released from a high-pressure pipeline: A computational parametric study», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23(4), pp. 522-530, 2010. doi: **10.1016/J.JLP.2010.04.007**.

Стаття надійшла 15.02.2025

Стаття прийнята 28.02.2025

Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Визначення тяжкості наслідків вибуху пального на автозаправній станції / Цопа В.А., Дерюгін О.В., Забеліна В.А., Чеберячко Л.М. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 200-209. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336385>.