

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут нафтогазової інженерії

Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці

Дмитрук Микола Ігорович

УДК 504.064:614.8  
(індекс)

## БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Оцінка ризиків техногенних аварій та їх вплив на довкілля  
(назва роботи)

Технології захисту навколишнього середовища  
(назва освітньої програми)

183 Технології захисту навколишнього середовища  
(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня Дмитрук Микола Ігорович  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Кривенко Галина Мирославівна, к. т. н., доцент  
(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

**Івано-Франківськ  
2026**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут нафтогазової інженерії  
Кафедра Технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці  
ОПП Технології захисту навколишнього середовища

Затверджую  
Зав. кафедри ТЗБП  
Галина ГРИЦУЛЯК \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**  
Дмитрук Микола Ігорович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи** «Оцінка ризиків техногенних аварій та їх вплив на довкілля»  
керівник роботи Кривенко Галина Мирославівна, к. т. н., доцент  
(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання керівника)

затверджені наказом університету від “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. №

**2 Термін здачі закінченої роботи** “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

**3 Вихідні дані до роботи** Нормативно-правові акти України у сфері техногенної та екологічної безпеки (Кодекс цивільного захисту України, Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019:2010); міжнародні та національні методики оцінювання ризиків (стандарти серії ISO 31000, ІЕС/ISO 31010, Методичні рекомендації щодо оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій, затверджені наказом МВС України від 13.10.2023 № 836, Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки, ДСТУ EN ISO 18278-1:2022); наукові публікації щодо ідентифікації небезпек, аналізу та оцінювання ризиків техногенних аварій; статистичні й аналітичні матеріали про аварійні ситуації на промислових об'єктах; паспортні та технологічні характеристики обраного об'єкта дослідження (стаціонарна автозаправна станція у межах техногенно навантаженої території Прикарпаття); матеріали щодо впливу техногенних чинників на атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, біоту та здоров'я населення.

**4. Зміст роботи (перелік питань, які підлягають розробленню)**

- проаналізувати теоретичні основи техногенних аварій та екологічних ризиків: поняття, ознаки й класифікацію техногенних аварій, їх екологічну небезпеку, сутність техногенного та екологічного ризику;
- систематизувати методи оцінювання ризиків техногенних аварій (якісні, кількісні, експертні, статистичні, матричні) та обґрунтувати порядок ідентифікації небезпек, оцінювання ймовірності аварій і їх наслідків;

- дослідити вплив техногенних аварій на компоненти довкілля - атмосферне повітря, поверхневі й підземні води, ґрунтовий покрив, біоту та екосистеми, а також на населення;

- виконати практичну кількісну оцінку ризику техногенної аварії на прикладі обраного об'єкта: ідентифікувати небезпеки, сформулювати сценарії розвитку аварії, розрахувати уражувальні чинники (тепловий потік, надлишковий тиск ударної хвилі), потенційний територіальний, індивідуальний та соціальний ризик, а також екологічний ризик і збитки;

- розробити рекомендації щодо зниження ризиків техногенних аварій (організаційні, технічні, природоохоронні заходи, система екологічного моніторингу) та оцінити їх ефективність.

**5. Орієнтовний перелік текстового та графічного матеріалу в презентації**  
Дерево подій розвитку аварії; залежність надлишкового тиску ударної хвилі від відстані; графік потенційного територіального ризику від відстані; F–N-крива соціального ризику; діаграма порівняння показників ризику «до/після» впровадження захисних заходів; схема зон теплового ураження; матриці та зведені таблиці результатів оцінки ризику.

**Календарний план виконання бакалаврської роботи**

| № | Назва етапів бакалаврської роботи                                                         | Термін виконання | Примітка |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|
| 1 | <u>Вступ</u>                                                                              |                  |          |
| 2 | <u>РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи техногенних аварій та екологічних ризиків</u>              |                  |          |
| 3 | <u>РОЗДІЛ 2. Методи оцінки ризиків техногенних аварій</u>                                 |                  |          |
| 4 | <u>РОЗДІЛ 3. Аналіз впливу техногенних аварій на компоненти довкілля</u>                  |                  |          |
| 5 | <u>РОЗДІЛ 4. Практична оцінка ризиків техногенної аварії на прикладі обраного об'єкта</u> |                  |          |
| 6 | <u>РОЗДІЛ 5. Заходи щодо зниження ризиків техногенних аварій</u>                          |                  |          |
| 7 | <u>ВИСНОВКИ</u>                                                                           |                  |          |
| 8 | <u>ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА</u>                                                                |                  |          |

Студента Дмитрук Микола Ігорович  
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник Кривенко Галина Мирославівна, к. т. н., доцент  
(підпис) (ім'я та прізвище)

## РЕФЕРАТ

*Актуальність теми.* Експлуатація промислових, енергетичних, транспортних і нафтогазових об'єктів супроводжується постійним ризиком виникнення техногенних аварій, наслідки яких можуть виходити далеко за межі підприємства й завдавати тривалої шкоди компонентам навколишнього природного середовища та здоров'ю населення. Для техногенно навантажених територій Прикарпаття, насичених об'єктами зберігання та обігу нафтопродуктів, завдання своєчасної ідентифікації небезпек, кількісного оцінювання ризиків та обґрунтування заходів їх зниження є особливо актуальним. Це визначило вибір теми, мету й завдання роботи.

The object of the study is man-made accidents at high-risk facilities and their impact on the components of the natural environment.

The subject of the study is the methods and indicators of assessing man-made and environmental risks, as well as measures to reduce them using the example of a stationary gas station.

The purpose of the work is to assess the risks of man-made accidents and their impact on the environment and to justify a set of measures to reduce the level of man-made and ecological danger of the object.

Завдання роботи: проаналізувати теоретичні основи техногенних аварій та екологічних ризиків (поняття, ознаки, класифікацію, рівні прийнятності ризику);

- систематизувати методи оцінювання ризику й охарактеризувати етапи ідентифікації небезпек, оцінювання ймовірності аварій та їх наслідків;
- дослідити вплив техногенних аварій на атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, біоту, екосистеми та населення;
- виконати кількісну оцінку ризику техногенної аварії на прикладі обраного об'єкта;
- розробити та обґрунтувати комплекс заходів зі зниження ризиків.

*Методи дослідження* - аналіз і узагальнення нормативно-правових та літературних джерел; якісні, кількісні, експертні, статистичні та матричні методи оцінювання ризику; метод «що-якщо» (What-If) у поєднанні з аналізом дерева подій (Event Tree Analysis); розрахункові методи визначення уражувальних чинників (висота полум'я за формулою Томаса, інтенсивність теплового випромінювання, тротиловий еквівалент і надлишковий тиск ударної хвилі) згідно з чинною Методикою визначення ризиків для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки та ДСТУ EN ISO 18278-1:2022; побудова F–N-кривої та матриць ризику; розрахунок екологічних збитків і математичного сподівання еколого-економічних втрат.

У *першому розділі* розкрито теоретичні основи техногенних аварій та екологічних ризиків: визначено поняття й основні ознаки техногенної аварії, наведено її класифікацію за джерелом виникнення та характером небезпечного чинника (аварії на промислових, хімічних, нафтогазових об'єктах, транспортні, гідротехнічні, радіаційні аварії, пожежі й вибухи), охарактеризовано екологічну небезпеку та основні джерела забруднення під час аварій. Розкрито сутність ризику, техногенного й екологічного ризику, розмежовано індивідуальний і соціальний ризик, а також прийнятний, допустимий і неприйнятний рівні ризику.

У *другому розділі* систематизовано методи оцінювання ризику (якісні, кількісні, експертні, статистичні, матричні) з аналізом їх переваг та обмежень, обґрунтовано доцільність їх комплексного застосування. Детально розглянуто етапи ідентифікації небезпек на техногенних об'єктах, оцінювання ймовірності виникнення аварій з урахуванням технічних, природних, технологічних та організаційних чинників, а також оцінювання наслідків аварій для довкілля.

У *третьому розділі* проаналізовано вплив техногенних аварій на окремі компоненти довкілля: атмосферне повітря (аварійні викиди, утворення газових і димових хмар, роль метеорологічних умов і температурної інверсії), поверхневі й підземні води (розливи нафтопродуктів, аварійні скиди, загроза

питному водопостачанню, біоаккумуляція), ґрунтовий покрив (накопичення важких металів і нафтопродуктів, зміна фізико-хімічних властивостей, зниження родючості, вторинне забруднення), біоту та екосистеми (порушення угруповань, зменшення біорізноманіття, порушення трофічних ланцюгів), а також на населення (ризик для здоров'я, евакуація, соціально-економічні та психологічні наслідки).

У четвертому розділі виконано практичну кількісну оцінку ризику техногенної аварії на типовій стаціонарній автозаправній станції, розташованій у межах техногенно навантаженої території Прикарпаття. Наведено вихідні дані об'єкта та реципієнтів потенційного впливу. Як ініціувальну подію прийнято розгерметизацію зливного обладнання з проливом бензину марки А-95. Методом «що-якщо» та аналізом дерева подій сформовано сценарії розвитку аварії: пожежа протоки (С1), вибухова дефлаграція паро-повітряної хмари (С2), флеш-пожежа (С3) та безпечне розсіювання (С4). Розраховано частоти сценаріїв, уражувальні чинники, потенційний територіальний, індивідуальний і соціальний ризик, побудовано F–N-криву, а також виконано окремий розрахунок екологічного ризику й збитків від забруднення ґрунту та підземних вод.

У п'ятому розділі обґрунтовано комплекс організаційних, технічних, природоохоронних та управлінських заходів зі зниження ризиків техногенних аварій, описано систему екологічного моніторингу (контроль повітря, поверхневих і підземних вод, ґрунтів, біологічних показників, застосування ГІС-технологій) та сформульовано рекомендації щодо підвищення екологічної безпеки об'єкта.

*Основні результати.* Розрахунками встановлено, що висота полум'я пожежі протоки сягає  $\approx 18,2$  м, а летальна зона теплового ураження ( $q \geq 10,5$  кВт/м<sup>2</sup>) – до 12 м від центру протоки. За вибуху паро-повітряної хмари (приведена маса  $\approx 38,6$  кг ТНТ) зона смертельного ураження ударною хвилею ( $\Delta P \geq 53$  кПа) сягає 13 м, а зона легких ушкоджень – до 60 м. Потенційний територіальний ризик знижується до прийнятного для населення рівня  $10^{-6}$

1/рік на відстані 70–80 м від зливного майданчика; індивідуальний ризик оператора ( $\approx 9,0 \cdot 10^{-5}$  1/рік) близький до гранично допустимого рівня, а соціальний ризик перебуває в перехідній (ALARP) області. Установлено, що розлив 5 м<sup>3</sup> бензину спричиняє забруднення близько 667 т ґрунту з досягненням водоносного горизонту та потенційним забрудненням до  $6,25 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup> підземних вод понад ГДК; сумарні екологічні збитки сягають  $\approx 412,5$  тис. грн, а екологічний ризик – близько 9,3 тис. грн/рік, що відповідає високому (неприйнятному) рівню. Обґрунтовано, що запропоновані заходи (герметичне покриття зливного майданчика з нафтовловлювачем, швидкокороз’ємні муфти із системою відсікання, газосигналізація та автоматичне пожежогасіння, дотримання протипожежних розривів, регламентація операцій і навчання персоналу) дозволяють знизити територіальний ризик у кілька разів, а індивідуальний ризик оператора – більш ніж на порядок, забезпечуючи прийнятний рівень техногенно-екологічної безпеки об’єкта.

*Практичне значення.* Отримані результати та запропонована методика поетапного оцінювання ризику можуть бути використані під час розроблення декларацій безпеки, планів локалізації та ліквідації аварій, обґрунтування протипожежних і санітарно-захисних розривів, а також у навчальному процесі за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища».

## ABSTRACT

Relevance of the topic. The operation of industrial, energy, transport and oil and gas facilities is accompanied by a constant risk of man-made accidents, the consequences of which can go far beyond the enterprise and cause long-term damage to the components of the natural environment and the health of the population. The task of timely identification of hazards, quantitative assessment of risks and justification of measures to reduce them is particularly relevant for the technogenically loaded territories of the Carpathian region, saturated with objects of storage and circulation of petroleum products. This determined the choice of topic, goal and task of the work.

Tasks: to analyze the theoretical foundations of man-made accidents and environmental risks (concepts, signs, classification, risk acceptability levels);

- systematize methods of risk assessment and characterize the stages of hazard identification, assessment of the probability of accidents and their consequences;

- to investigate the impact of man-made accidents on atmospheric air, water resources, soils, biota, ecosystems and population;

- carry out a quantitative assessment of the risk of a man-made accident on the example of the selected object;

- to develop and substantiate a set of risk reduction measures.

Research methods - analysis and generalization of legal and literary sources; qualitative, quantitative, expert, statistical and matrix risk assessment methods; the "What-If" method in combination with Event Tree Analysis; calculation methods for determining impressive factors (flame height according to the Thomas formula, intensity of thermal radiation, TNT equivalent and excess pressure of a shock wave) in accordance with the current Methodology for determining risks for declaring the safety of high-risk objects and DSTU EN ISO 18278-1:2022; construction of the F–N curve and risk matrices; calculation of ecological damages and mathematical expectation of ecological and economic losses.

In the first chapter, the theoretical foundations of man-made accidents and environmental risks are revealed: the concept and main signs of a man-made accident are defined, its classification is given according to the source of occurrence and the nature of the dangerous factor (accidents at industrial, chemical, oil and gas facilities, transport, hydrotechnical, radiation accidents, fires and explosions), environmental hazards and the main sources of pollution during accidents are characterized. The essence of risk, technogenic and environmental risk is revealed, individual and social risk are distinguished, as well as acceptable, permissible and unacceptable levels of risk.

In the second chapter, risk assessment methods (qualitative, quantitative, expert, statistical, matrix) are systematized with an analysis of their advantages and limitations, and the expediency of their complex application is substantiated. The stages of identifying hazards at man-made objects, assessing the probability of accidents taking into account technical, natural, technological and organizational factors, as well as assessing the consequences of accidents for the environment are considered in detail.

The third chapter analyzes the impact of man-made accidents on individual components of the environment: atmospheric air (accidental emissions, formation of gas and smoke clouds, the role of meteorological conditions and temperature inversion), surface and underground water (oil spills, emergency discharges, threat to drinking water supply, bioaccumulation), soil cover (accumulation of heavy metals and oil products, changes in physico-chemical properties, fertility reduction, secondary pollution), biota and ecosystems (disruption of communities, reduction of biodiversity, disruption of trophic chains), as well as on the population (health risks, evacuation, socio-economic and psychological consequences).

In the fourth section, a practical quantitative assessment of the risk of man-made accident at a typical stationary gas station located within the man-made territory of Prykarpattia is performed. The initial data of the object and recipients of potential influence are given. The depressurization of the drain equipment with spillage of A-95 gasoline was accepted as the initiating event. Using the "what-if"

method and the analysis of the event tree, the accident development scenarios were formed: duct fire (C1), explosive deflagration of vapor-air cloud (C2), flash fire (C3) and safe dispersion (C4). Scenario frequencies, impact factors, potential territorial, individual, and social risk were calculated, an F–N curve was constructed, and a separate calculation of environmental risk and damage from soil and groundwater pollution was performed.

The fifth chapter substantiates the complex of organizational, technical, environmental protection and management measures to reduce the risks of man-made accidents, describes the environmental monitoring system (control of air, surface and underground water, soil, biological indicators, application of GIS technologies) and formulates recommendations for increasing the environmental safety of the object.

Main results. It was established by calculations that the height of the flame of the channel fire reaches  $\approx 18.2$  m, and the lethal zone of heat damage ( $q \geq 10.5$  kW/m<sup>2</sup>) is up to 12 m from the center of the channel. In the case of an explosion of a vapor-air cloud (reduced mass  $\approx 38.6$  kg of TNT), the zone of lethal damage by the shock wave ( $\Delta P \geq 53$  kPa) reaches 13 m, and the zone of light damage - up to 60 m. The potential territorial risk decreases to an acceptable level for the population of  $10^{-6}$  1/year at a distance of 70–80 m from the drainage site; the operator's individual risk ( $\approx 9.0 \cdot 10^{-5}$  1/year) is close to the maximum permissible level, and the social risk is in the transition (ALARP) area. It was established that spilling 5 m<sup>3</sup> of gasoline causes contamination of about 667 tons of soil with reaching the aquifer and potential contamination of up to  $6.25 \cdot 10^5$  m<sup>3</sup> of groundwater above the MPC; total environmental damages reach  $\approx 412.5$  thousand UAH, and environmental risk - about 9.3 thousand UAH/year, which corresponds to a high (unacceptable) level. It is substantiated that the proposed measures (hermetic covering of the drainage area with an oil trap, quick-disconnect couplings with a cut-off system, gas alarm and automatic fire extinguishing, compliance with fire breaks, regulation of operations and training of personnel) allow to reduce the territorial risk by several

times, and the individual risk of the operator - by more than an order of magnitude, ensuring an acceptable level of technogenic and environmental safety of the facility.

Practical significance. The obtained results and the proposed method of step-by-step risk assessment can be used during the development of safety declarations, plans for the localization and elimination of accidents, justification of fire-fighting and sanitary protection gaps, as well as in the educational process for specialty 183 «Environmental protection technologies».

## ЗМІСТ

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                              | 13 |
| РОЗДІЛ 1. Теоретичні основи техногенних аварій та екологічних ризиків....               | 16 |
| 1.1. Поняття техногенної аварії та її основні ознаки.....                               | 16 |
| 1.2. Класифікація техногенних аварій.....                                               | 18 |
| 1.3. Екологічна небезпека техногенних аварій.....                                       | 22 |
| 1.4. Поняття ризику та екологічного ризику.....                                         | 26 |
| РОЗДІЛ 2. Методи оцінки ризиків техногенних аварій.....                                 | 30 |
| 2.1. Загальна характеристика методів оцінювання ризику.....                             | 30 |
| 2.2. Ідентифікація небезпек на техногенних об'єктах.....                                | 33 |
| 2.3. Оцінка ймовірності виникнення аварій.....                                          | 35 |
| 2.4. Оцінка наслідків техногенних аварій для довкілля.....                              | 37 |
| РОЗДІЛ 3. Аналіз впливу техногенних аварій на компоненти довкілля.....                  | 41 |
| 3.1. Вплив техногенних аварій на атмосферне повітря.....                                | 41 |
| 3.2. Вплив аварій на водні ресурси.....                                                 | 45 |
| 3.3. Забруднення ґрунтів унаслідок техногенних аварій.....                              | 48 |
| 3.4. Вплив техногенних аварій на біоту та екосистеми.....                               | 52 |
| 3.5. Вплив техногенних аварій на населення.....                                         | 55 |
| РОЗДІЛ 4. Практична оцінка ризиків техногенної аварії на прикладі обраного об'єкта..... | 59 |
| 4.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження.....                                   | 59 |
| 4.2. Ідентифікація небезпек та формування сценаріїв аварії.....                         | 60 |
| РОЗДІЛ 5. Заходи щодо зниження ризиків техногенних аварій.....                          | 74 |
| 5.1. Організаційні заходи.....                                                          | 74 |
| 5.2. Природоохоронні заходи.....                                                        | 76 |
| 5.3. Система екологічного моніторингу.....                                              | 77 |
| 5.4. Рекомендації щодо підвищення екологічної безпеки об'єкта.....                      | 79 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                           | 81 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                         | 84 |

## ВСТУП

*Актуальність теми.* Сучасний рівень розвитку промисловості, енергетики, транспорту та нафтогазового комплексу нерозривно пов'язаний із експлуатацією складних технічних систем, використанням небезпечних речовин і високими виробничими навантаженнями. За таких умов постійно зберігається ймовірність виникнення техногенних аварій - небезпечних подій, що виникають унаслідок порушення роботи технічних систем або технологічних процесів і можуть спричиняти загрозу життю і здоров'ю людей, руйнування об'єктів та значну шкоду навколишньому природному середовищу. Особливістю техногенних аварій є те, що їхні наслідки нерідко виходять за межі окремого підприємства й проявляються у забрудненні атмосферного повітря, поверхневих і підземних вод, ґрунтів, у порушенні функціонування екосистем та погіршенні умов проживання населення.

Для територій із високим рівнем техногенного навантаження, до яких належить і Прикарпаття, проблема оцінювання ризиків техногенних аварій набуває особливого значення. Насиченість регіону об'єктами зберігання, транспортування та обігу нафти й нафтопродуктів - нафтобазами, автозаправними станціями, трубопроводами, резервуарними парками - зумовлює підвищену ймовірність аварійних ситуацій із пожежно-вибуховою та екологічною небезпекою. Своєчасна ідентифікація небезпек, кількісне оцінювання ймовірності аварій і тяжкості їхніх наслідків, а також обґрунтування ефективних запобіжних заходів є необхідною умовою забезпечення техногенно-екологічної безпеки таких об'єктів. Це й визначає актуальність обраної теми бакалаврської роботи.

*Мета роботи* – оцінити ризики техногенних аварій та їх вплив на довкілля й обґрунтувати комплекс заходів зі зниження рівня техногенно-екологічної небезпеки об'єкта підвищеної небезпеки.

*Завдання роботи.* Для досягнення поставленої мети необхідно:

- проаналізувати теоретичні основи техногенних аварій та екологічних ризиків: розкрити поняття й основні ознаки техногенної аварії, навести її класифікацію, охарактеризувати екологічну небезпеку та сутність техногенного й екологічного ризику;
- систематизувати методи оцінювання ризиків техногенних аварій і обґрунтувати порядок ідентифікації небезпек, оцінювання ймовірності аварій та їхніх наслідків;
- дослідити вплив техногенних аварій на компоненти довкілля - атмосферне повітря, поверхневі й підземні води, ґрунтовий покрив, біоту та екосистеми, а також на населення;
- виконати практичну кількісну оцінку ризику техногенної аварії на прикладі обраного об'єкта, визначити уражувальні чинники, потенційний територіальний, індивідуальний, соціальний та екологічний ризик;
- розробити й обґрунтувати комплекс організаційних, технічних і природоохоронних заходів зі зниження ризиків та оцінити їхню ефективність.

Об'єкт дослідження – техногенні аварії на об'єктах підвищеної небезпеки та їх вплив на компоненти навколишнього природного середовища.

*Предмет дослідження* – методи й показники оцінювання техногенних та екологічних ризиків, а також заходи щодо їх зниження на прикладі стаціонарної автозаправної станції.

*Методи дослідження.* Теоретичну основу роботи становлять аналіз і узагальнення нормативно-правових актів та наукових джерел у сфері техногенної й екологічної безпеки. Для оцінювання ризику застосовано якісні, кількісні, експертні, статистичні та матричні методи, метод «що-якщо» (What-If) у поєднанні з аналізом дерева подій (Event Tree Analysis). Уражувальні чинники аварії визначено розрахунковими методами згідно з чинною Методикою визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки, зокрема розраховано висоту полум'я за формулою Томаса, інтенсивність теплового випромінювання, тротиловий

еквівалент і надлишковий тиск ударної хвилі. Для аналізу соціального ризику використано побудову F–N-кривої та матриць ризику, а для оцінювання еколого-економічних наслідків - розрахунок екологічних збитків і математичного сподівання втрат.

*Практичне значення роботи.* Отримані результати та запропонована послідовність поетапного оцінювання ризику можуть бути використані під час розроблення декларацій безпеки об'єктів підвищеної небезпеки, планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій, обґрунтування протипожежних і санітарно-захисних розривів, а також у навчальному процесі за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища».

*Структура та обсяг роботи.* Бакалаврська робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. У першому розділі розкрито теоретичні основи техногенних аварій та екологічних ризиків; у другому - систематизовано методи оцінювання ризиків; у третьому - проаналізовано вплив техногенних аварій на компоненти довкілля та населення; у четвертому - виконано практичну кількісну оцінку ризику техногенної аварії на прикладі автозаправної станції; у п'ятому - обґрунтовано заходи щодо зниження ризиків та підвищення екологічної безпеки об'єкта. Загальний обсяг роботи становить \_\_\_\_ сторінок, робота містить 6 рисунків, 14 таблиць та \_\_\_\_ використаних джерел.

# **РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ ТА ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ**

## **1.1. Поняття техногенної аварії та її основні ознаки**

Техногенні аварії є однією з найнебезпечніших форм порушення нормального функціонування виробничих, транспортних, енергетичних, комунальних та інших технічних систем. Їх виникнення пов'язане з діяльністю людини, експлуатацією складного обладнання, використанням небезпечних речовин, порушенням технологічних процесів, зношеністю інженерної інфраструктури або недостатнім рівнем контролю за безпекою об'єктів [2, 8].

У широкому розумінні техногенна аварія – це небезпечна подія, що виникає внаслідок порушення роботи технічної системи або технологічного процесу та може призвести до негативних наслідків для людей, об'єктів господарювання і навколишнього природного середовища. У Кодексі цивільного захисту України аварія визначається як небезпечна подія техногенного характеру, що може спричинити ураження або травмування населення, створити загрозу життю чи здоров'ю людей, призвести до руйнування будівель, споруд, обладнання, транспортних засобів, порушення виробничого чи транспортного процесу, а також до аварійних викидів забруднюючих речовин та іншого шкідливого впливу на довкілля [1, 4].

Основною особливістю техногенної аварії є її зв'язок із функціонуванням створених людиною технічних об'єктів. До таких об'єктів належать промислові підприємства, об'єкти енергетики, транспортні системи, трубопроводи, склади небезпечних речовин, очисні споруди, системи водо-, тепло- і газопостачання, гірничодобувні підприємства, хімічні та нафтогазові об'єкти. Відповідно до Класифікатора надзвичайних ситуацій ДК 019:2010, надзвичайні ситуації техногенного характеру охоплюють аварії на транспорті, пожежі й вибухи, аварії з викиданням небезпечних хімічних або радіоактивних речовин, руйнування будівель і споруд, аварії в електроенергетичних

системах, системах життєзабезпечення, на очисних спорудах, гідродинамічні аварії та аварії в нафтогазовому комплексі [4, 6].

До основних ознак техногенної аварії належать:

Більшість техногенних аварій виникає несподівано або протягом короткого проміжку часу. Водночас їм часто передують приховані передумови: зношення обладнання, накопичення дефектів, порушення правил експлуатації, недотримання технологічних режимів або недостатній технічний контроль.

Аварія супроводжується зупинкою або частковим порушенням виробничого, транспортного, енергетичного чи комунального процесу. Це може спричинити економічні збитки, перебої в роботі підприємств, порушення постачання води, тепла, електроенергії або газу [26, 29].

Техногенні аварії можуть створювати небезпеку для працівників підприємства, населення прилеглих територій, рятувальників та інших осіб, які перебувають у зоні впливу аварії. Класифікаційні ознаки надзвичайних ситуацій в Україні враховують, зокрема, кількість загиблих або постраждалих осіб унаслідок пожеж, вибухів, аварій, катастроф та інших небезпечних подій. Аварія може призводити до пошкодження або руйнування будівель, споруд, обладнання, транспортних засобів, інженерних мереж і комунікацій. Масштаб руйнувань залежить від типу аварії, потужності об'єкта, виду небезпечних речовин, щільності забудови та готовності служб реагування [21, 24].

Однією з найважливіших ознак техногенної аварії є можливість забруднення атмосферного повітря, водних об'єктів, ґрунтів і біоти. Екологічні наслідки можуть проявлятися у вигляді аварійних викидів і скидів забруднюючих речовин, витоку нафтопродуктів, поширення токсичних сполук, погіршення якості питної води, загибелі рослин і тварин, порушення природних екосистем. Техногенна аварія не завжди обмежується територією підприємства чи місцем її виникнення. Забруднюючі речовини можуть поширюватися повітряними потоками, поверхневим стоком, підземними водами або транспортними шляхами. Тому локальна аварія за певних умов може перерости в надзвичайну ситуацію місцевого, регіонального або навіть державного рівня [31, 33].

Для ліквідації наслідків техногенних аварій часто потрібне залучення аварійно-рятувальних служб, екологічного моніторингу, медичної допомоги, спеціалізованої техніки, лабораторного контролю та управлінських рішень щодо евакуації населення, обмеження доступу до небезпечної зони або відновлення пошкоджених систем [25, 29].

З екологічної точки зору техногенна аварія є не лише технічною або виробничою подією, а й джерелом екологічного ризику. Її наслідки можуть мати короткостроковий і довгостроковий характер. Короткострокові наслідки проявляються одразу після аварії: забруднення повітря, води чи ґрунтів, загроза здоров'ю людей, порушення роботи підприємств. Довгострокові наслідки можуть включати накопичення токсичних речовин у ґрунтах і донних відкладах, погіршення стану екосистем, зниження біорізноманіття, вторинне забруднення та підвищення рівня захворюваності населення [16, 23].

Отже, техногенна аварія - це складне небезпечне явище, яке поєднує технічні, соціальні, економічні та екологічні аспекти. Її основними ознаками є раптовість виникнення, порушення нормальної роботи технічних систем, загроза життю і здоров'ю людей, матеріальні руйнування, негативний вплив на довкілля та необхідність спеціальних заходів реагування. Саме тому вивчення техногенних аварій є важливою складовою оцінювання екологічних ризиків і розроблення заходів щодо запобігання надзвичайним ситуаціям [12, 16].

## **1.2. Класифікація техногенних аварій**

Класифікація техногенних аварій має важливе значення для оцінювання безпеки, прогнозування можливих наслідків, організації моніторингу та вибору заходів реагування. Техногенні аварії поділяють залежно від джерела виникнення, характеру небезпечного чинника, масштабу поширення, виду забруднювальних речовин, рівня загрози для населення та впливу на навколишнє природне середовище [33, 37].

Відповідно до підходів, закріплених у Класифікаторі надзвичайних ситуацій ДК 019:2010, надзвичайні ситуації техногенного характеру можуть бути пов'язані з транспортними аваріями, пожежами, вибухами, аваріями з викиданням небезпечних хімічних, радіоактивних або біологічно небезпечних речовин, руйнуванням споруд, аваріями в електроенергетичних системах, системах життєзабезпечення, на очисних спорудах, а також із гідродинамічними аваріями [27, 29].

У межах дослідження екологічних ризиків доцільно розглядати такі основні види техногенних аварій. Аварії на промислових підприємствах виникають унаслідок порушення технологічних процесів, несправності обладнання, зношеності виробничих фондів, помилок персоналу або недостатнього контролю за станом безпеки. Такі аварії можуть супроводжуватися руйнуванням виробничих споруд, пошкодженням інженерних мереж, зупинкою технологічного процесу, утворенням аварійних викидів і скидів забруднювальних речовин [23, 25].

Особливу небезпеку становлять підприємства металургійної, машинобудівної, гірничодобувної, енергетичної, хімічної та нафтопереробної галузей. Наслідками аварій на таких об'єктах можуть бути забруднення атмосферного повітря пилом, газами та аерозолями, потрапляння токсичних речовин у ґрунти й водні об'єкти, а також порушення санітарно-екологічного стану прилеглих територій [19, 23].

Аварії на об'єктах хімічної промисловості пов'язані з виробництвом, зберіганням, транспортуванням або використанням небезпечних хімічних речовин. До таких об'єктів належать хімічні заводи, склади реагентів, підприємства з виробництва добрив, лакофарбових матеріалів, полімерів, кислот, лугів та інших хімічних продуктів [16, 19].

Головна небезпека таких аварій полягає у можливому викиді токсичних речовин у повітря, їх потраплянні у поверхневі та підземні води, а також у забрудненні ґрунтів. У Класифікаторі надзвичайних ситуацій окремо виділяються аварії з викиданням або загрозою викидання небезпечних

хімічних речовин, що підкреслює їхню значущість для системи цивільного захисту [12, 15].

Екологічні наслідки хімічних аварій можуть проявлятися у вигляді токсичного ураження рослинності, загибелі водних організмів, погіршення якості питної води, накопичення шкідливих речовин у ґрунтах та біологічних ланцюгах [12, 36].

Аварії на нафтогазових об'єктах виникають під час видобування, підготовки, транспортування, зберігання або перероблення нафти, природного газу, газового конденсату та нафтопродуктів. До таких об'єктів належать свердловини, трубопроводи, компресорні станції, газорозподільні станції, резервуарні парки, нафтобази, установки перероблення вуглеводнів [35, 38].

Основними проявами таких аварій є розгерметизація обладнання, витік газу, розлив нафти або нафтопродуктів, пожежі, вибухи, забруднення ґрунтів і водних об'єктів. Особливо небезпечними є аварії на магістральних трубопроводах, оскільки вони можуть охоплювати значні території та призводити до тривалого забруднення природного середовища [31, 35].

Екологічний ризик таких аварій пов'язаний із токсичністю нафтопродуктів, їхньою здатністю утворювати плівку на поверхні води, погіршувати газообмін у водоймах, пригнічувати розвиток рослин і мікроорганізмів, а також накопичуватися у ґрунтах [26, 28].

Транспортні аварії з викидом небезпечних речовин можуть виникати під час перевезення хімічних реагентів, пального, зріджених газів, радіоактивних матеріалів, токсичних або вибухонебезпечних речовин автомобільним, залізничним, водним чи авіаційним транспортом. У ДК 019:2010 транспортні аварії та катастрофи належать до надзвичайних ситуацій техногенного характеру [22, 25].

Особливістю таких аварій є те, що вони можуть статися не лише на території промислового об'єкта, а й у межах населених пунктів, поблизу водойм, сільськогосподарських угідь або природоохоронних територій. Це

підвищує ризик швидкого поширення забруднення та ускладнює організацію аварійно-рятувальних робіт [21, 34].

Найбільш небезпечними наслідками транспортних аварій є витік токсичних речовин, займання пального, вибухи, утворення хмар небезпечних газів, забруднення дорожнього покриття, ґрунтів, поверхневих вод і атмосферного повітря [35, 38].

Аварії на гідротехнічних спорудах пов'язані з пошкодженням або руйнуванням дамб, гребель, водосховищ, каналів, хвостосховищ, шламонакопичувачів та інших споруд, призначених для регулювання, накопичення або відведення води чи рідких відходів. У класифікації надзвичайних ситуацій техногенного характеру окремо враховуються гідродинамічні аварії [33, 34].

Такі аварії можуть спричинити затоплення територій, руйнування будівель та інженерної інфраструктури, забруднення водних об'єктів, змив родючого шару ґрунту, поширення промислових або токсичних відходів. Особливо небезпечними є аварії на хвостосховищах і шламонакопичувачах, оскільки разом із водними масами можуть поширюватися важкі метали, нафтопродукти, завислі речовини та інші забруднювачі [28, 33].

Екологічні наслідки гідротехнічних аварій часто мають довготривалий характер, оскільки відбувається зміна гідрологічного режиму території, порушення ґрунтового покриву, деградація водних і прибережних екосистем [26, 28].

Радіаційні аварії виникають на об'єктах, де використовуються, зберігаються, транспортуються або утворюються радіоактивні речовини. До таких об'єктів належать атомні електростанції, дослідницькі ядерні установки, підприємства з поводження з радіоактивними відходами, медичні та промислові установи, у яких використовуються джерела іонізуючого випромінювання [19, 24].

Радіаційні аварії характеризуються можливим викидом радіоактивних речовин у навколишнє середовище, забрудненням повітря, ґрунтів, води,

рослинності та харчових ланцюгів. У класифікації техногенних надзвичайних ситуацій окремо згадуються аварії з викиданням або загрозою викидання радіоактивних речовин [18, 23].

Особливість радіаційних аварій полягає в тому, що їхні наслідки можуть проявлятися протягом тривалого часу. Радіоактивне забруднення може зберігатися в ґрунтах, донних відкладах, рослинності та організмах, створюючи ризики для здоров'я населення і стабільності екосистем [15, 20].

Пожежі та вибухи на техногенних об'єктах є одними з найпоширеніших і найнебезпечніших видів аварій. Вони можуть виникати на промислових підприємствах, складах пального, об'єктах хімічної промисловості, нафтогазової інфраструктури, транспорті, у шахтах, на енергетичних установках та інших об'єктах підвищеної небезпеки [13, 34].

У Класифікаторі надзвичайних ситуацій техногенного характеру пожежі й вибухи виділяються як окрема група подій, зокрема на транспорті, у шахтах, на хімічно, радіаційно або біологічно небезпечних об'єктах.

Екологічна небезпека пожеж і вибухів полягає у надходженні в атмосферу продуктів горіння, токсичних газів, сажі, пилу, важких металів та інших небезпечних сполук. Крім того, під час гасіння пожеж забруднювальні речовини можуть потрапляти разом зі стічними водами у ґрунти, каналізаційні системи та природні водойми [25, 28].

Отже, класифікація техногенних аварій дає змогу систематизувати їх за джерелом виникнення та характером небезпеки. Найбільш екологічно значущими є аварії на промислових, хімічних і нафтогазових об'єктах, транспортні аварії з викидом небезпечних речовин, гідротехнічні та радіаційні аварії, а також пожежі й вибухи. Усі ці види аварій можуть спричинити забруднення довкілля, порушення функціонування екосистем, матеріальні збитки та загрозу для життя і здоров'я населення [23, 25].

### **1.3. Екологічна небезпека техногенних аварій**

Техногенні аварії становлять значну екологічну небезпеку, оскільки їхні наслідки часто виходять за межі окремого підприємства або виробничої території. Вони можуть спричиняти забруднення атмосферного повітря, поверхневих і підземних вод, ґрунтів, рослинного й тваринного світу, а також створювати загрозу для життя і здоров'я населення. У нормативному розумінні аварія техногенного характеру може супроводжуватися руйнуванням об'єктів, порушенням виробничого чи транспортного процесу та шкідливим впливом на довкілля [9, 23].

Екологічна небезпека - це стан або ситуація, за якої існує загроза погіршення якості навколишнього природного середовища, порушення природної рівноваги екосистем і негативного впливу на здоров'я людей. У контексті техногенних аварій екологічна небезпека проявляється через раптове або поступове надходження у довкілля забруднювальних речовин, зміну фізико-хімічних властивостей природних компонентів, руйнування природних середовищ існування організмів і погіршення умов проживання населення [14, 17].

Особливістю екологічної небезпеки техногенних аварій є те, що вона може мати комплексний характер. Одна аварійна подія часто одночасно впливає на кілька компонентів довкілля. Наприклад, вибух або пожежа на промисловому об'єкті може спричинити забруднення повітря продуктами горіння, потрапляння токсичних речовин у ґрунт, забруднення водних об'єктів стічними водами після гасіння пожежі та утворення небезпечних відходів [8, 17].

Основними джерелами забруднення під час техногенних аварій є:

1. Аварійні викиди в атмосферне повітря. Під час пожеж, вибухів, розгерметизації обладнання або порушення технологічного процесу в атмосферу можуть надходити токсичні гази, пил, дим, сажа, оксиди азоту, сірки, вуглецю, леткі органічні сполуки, пари нафтопродуктів, небезпечні хімічні речовини. Такі викиди можуть швидко поширюватися повітряними

потоками та створювати небезпеку не лише в межах підприємства, а й на прилеглих територіях [9, 14].

2. Аварійні скиди у водні об'єкти. Забруднення води може виникати внаслідок потрапляння у водойми промислових стічних вод, нафтопродуктів, кислот, лугів, важких металів, токсичних реагентів, радіоактивних або біологічно небезпечних речовин. У ДК 019:2010 окремо виділяються надзвичайні ситуації, пов'язані з аваріями з викиданням або загрозою викидання небезпечних хімічних, радіоактивних і біологічно небезпечних речовин [8, 20].

3. Забруднення ґрунтів. Ґрунтовий покрив забруднюється внаслідок розливів нафти й нафтопродуктів, осідання токсичного пилу, витоку хімічних речовин, руйнування резервуарів, трубопроводів, хвостосховищ або шламонакопичувачів. Небезпека такого забруднення полягає в тому, що ґрунти здатні накопичувати шкідливі речовини протягом тривалого часу. Надалі ці речовини можуть потрапляти у рослини, підземні води та харчові ланцюги [12, 16].

4. Утворення небезпечних відходів. Після аварій часто утворюються уламки конструкцій, забруднені матеріали, залишки реагентів, згорілі речовини, забруднений ґрунт, використані сорбенти, засоби індивідуального захисту, шлам або забруднена вода після ліквідації наслідків аварії. Якщо такі відходи не зібрати й не утилізувати належним чином, вони можуть стати вторинним джерелом забруднення довкілля [13, 14].

5. Радіоактивне забруднення. У разі радіаційних аварій небезпечними чинниками є викид або розповсюдження радіоактивних речовин, забруднення повітря, ґрунтів, води, рослинності та продуктів харчування. Класифікатор надзвичайних ситуацій відносить аварії джерел іонізуючого випромінювання та аварії з викиданням радіоактивних речовин до техногенних надзвичайних ситуацій [15, 17].

За тривалістю прояву наслідки техногенних аварій можна поділити на короткострокові та довгострокові.

Короткострокові наслідки проявляються безпосередньо під час аварії або в перші години й дні після неї. До них належать різке погіршення якості повітря, поява токсичних хмар, задимлення територій, забруднення води чи ґрунту, загибель риби, рослин або тварин, порушення роботи підприємств, евакуація населення, обмеження водокористування або заборона перебування людей у небезпечній зоні [7, 13].

Довгострокові наслідки можуть проявлятися протягом місяців, років або навіть десятиліть. Вони пов'язані з накопиченням забруднювальних речовин у ґрунтах, донних відкладах і живих організмах, вторинним забрудненням водних об'єктів, зниженням родючості ґрунтів, деградацією рослинного покриву, зміною структури екосистем, погіршенням стану здоров'я населення та необхідністю тривалого екологічного моніторингу [6, 14].

Техногенні аварії мають значний вплив на природні екосистеми. Унаслідок забруднення можуть порушуватися процеси фотосинтезу, дихання, живлення і розмноження організмів. У водних екосистемах аварійні скиди можуть спричиняти зменшення вмісту розчиненого кисню, загибель гідробіонтів, зміну видового складу водоростей, риб і безхребетних. У наземних екосистемах забруднення ґрунтів може пригнічувати розвиток рослин, зменшувати активність ґрунтових мікроорганізмів, порушувати кругообіг речовин і сприяти деградації біоценозів [6, 20].

Не менш важливим є вплив техногенних аварій на населення. Люди можуть зазнавати дії токсичних речовин через вдихання забрудненого повітря, споживання забрудненої води або харчових продуктів, контакт із забрудненим ґрунтом чи предметами. Наслідками можуть бути гострі отруєння, подразнення органів дихання, погіршення самопочуття, підвищення ризику хронічних захворювань, психологічний стрес і погіршення якості життя. Саме тому під час оцінювання екологічної безпеки техногенних аварій необхідно враховувати не лише масштаби забруднення, а й щільність населення, близькість житлової забудови, наявність джерел питного водопостачання, сільськогосподарських угідь і природоохоронних територій [23, 30].

Отже, екологічна небезпека техногенних аварій полягає у можливості раптового або тривалого забруднення компонентів довкілля, порушення функціонування природних екосистем і створення загрози для населення. Найбільш небезпечними чинниками є аварійні викиди в атмосферу, скиди у водні об'єкти, забруднення ґрунтів, утворення небезпечних відходів і поширення токсичних або радіоактивних речовин. Врахування цих чинників є необхідною умовою для оцінювання екологічних ризиків, планування заходів запобігання аваріям і мінімізації їхніх наслідків [22, 24].

#### **1.4. Поняття ризику та екологічного ризику**

Поняття ризику є одним із ключових у системі аналізу техногенних аварій та екологічної безпеки. У найзагальнішому розумінні ризик - це ймовірність настання небажаної події та можливі наслідки, які вона може спричинити для людини, суспільства, об'єктів господарювання або навколишнього природного середовища. Тобто ризик поєднує два основні компоненти: ймовірність виникнення небезпечної події та тяжкість її наслідків. У сфері цивільного захисту та екологічної безпеки ризик розглядається не лише як абстрактна ймовірність, а як практичний показник, що дає змогу оцінити рівень небезпеки, визначити пріоритетність запобіжних заходів і прийняти управлінські рішення. Наприклад, аналізування ризику передбачає визначення можливих наслідків і ймовірностей ризикових подій з урахуванням наявних заходів контролю або їх відсутності [5, 21].

Техногенний ризик – це ймовірність виникнення аварії, катастрофи або надзвичайної ситуації техногенного характеру, що може спричинити негативні наслідки для населення, територій, об'єктів інфраструктури та довкілля. Він пов'язаний із функціонуванням технічних систем, промислових підприємств, транспортних мереж, енергетичних об'єктів, гідротехнічних споруд, об'єктів хімічної, радіаційної та нафтогазової безпеки. У Кодексі цивільного захисту України техногенна безпека визначається як відсутність

ризик у виникнення аварій або катастроф на об'єктах, що можуть створити реальну загрозу їх виникнення [39, 40].

Джерелами техногенного ризику можуть бути зношеність обладнання, помилки персоналу, порушення технологічних режимів, недостатній контроль за небезпечними речовинами, несправність систем захисту, природні чинники, а також зовнішні впливи. Наприклад, на хімічному підприємстві техногенний ризик може бути пов'язаний із можливістю розгерметизації резервуара з токсичною речовиною, а на нафтогазовому об'єкті – з витоком газу, пожежею або розливом нафтопродуктів [4, 10].

Екологічний ризик є різновидом ризику, який характеризує ймовірність негативних змін у навколишньому природному середовищі під впливом антропогенних, техногенних або природних чинників. У науковій літературі екологічний ризик часто розглядається як оцінка ймовірності появи негативних змін у довкіллі, спричинених антропогенним впливом.

У контексті техногенних аварій екологічний ризик означає можливість забруднення атмосферного повітря, водних об'єктів, ґрунтів, рослинного й тваринного світу внаслідок аварійних викидів, скидів, розливів, пожеж, вибухів або радіаційного забруднення. Його рівень залежить від виду небезпечної речовини, масштабу аварії, тривалості впливу, природних умов території, щільності населення, близькості водойм, сільськогосподарських угідь і природоохоронних об'єктів [7, 11].

Екологічний ризик має комплексний характер, оскільки одна техногенна аварія може одночасно впливати на кілька компонентів довкілля. Наприклад, пожежа на промисловому об'єкті може спричинити забруднення повітря токсичними продуктами горіння, потрапляння забруднювальних речовин у ґрунт, забруднення води стоками після гасіння пожежі та утворення небезпечних відходів.

Важливими категоріями в оцінюванні небезпеки є індивідуальний і соціальний ризик [6, 12].

Індивідуальний ризик - це ймовірність того, що конкретна людина може зазнати негативного впливу внаслідок аварії або небезпечної події. Такий ризик залежить від місця перебування людини, тривалості її контакту з небезпечним чинником, стану здоров'я, професійної діяльності та рівня захищеності. Наприклад, індивідуальний ризик для працівника хімічного підприємства може бути вищим, ніж для людини, яка проживає на значній відстані від цього об'єкта [3, 7].

Соціальний ризик – це ризик для групи людей або населення певної території. Він характеризує можливі наслідки аварії для суспільства загалом: кількість потенційно постраждалих осіб, масштаби евакуації, порушення життєдіяльності населених пунктів, економічні збитки, психологічне напруження та довготривалі соціальні наслідки. Соціальний ризик особливо важливий для оцінювання небезпеки об'єктів, розташованих поблизу житлової забудови, шкіл, лікарень, джерел питного водопостачання або транспортних вузлів [2, 4].

За ступенем допустимості ризик умовно поділяють на прийнятний, допустимий і неприйнятний. Прийнятний ризик - це такий рівень ризику, який є соціально, економічно, технічно і політично обґрунтованим та не перевищує гранично допустимого рівня. Таке визначення використовується в українському законодавчому полі щодо державного нагляду й контролю. У практичному розумінні прийнятний ризик означає, що діяльність об'єкта може здійснюватися за умови дотримання встановлених вимог безпеки, моніторингу та готовності до реагування [21, 24].

Допустимий ризик - це ризик, який може бути прийнятий за певних умов, якщо він контролюється технічними, організаційними, санітарними, екологічними та управлінськими заходами. Наприклад, експлуатація нафтогазового або хімічного об'єкта завжди пов'язана з певним рівнем небезпеки, однак цей ризик може вважатися допустимим, якщо обладнання проходить регулярний контроль, персонал навчений, аварійні плани розроблені, а системи захисту перебувають у справному стані [18, 20].

Неприйнятний ризик - це ризик, рівень якого перевищує встановлені або обґрунтовані межі безпеки та створює реальну загрозу для життя людей, довкілля або нормального функціонування території. Такий ризик потребує негайного зниження, обмеження діяльності, модернізації обладнання, посилення контролю або припинення експлуатації небезпечного об'єкта. Наприклад, експлуатація аварійного резервуара з токсичною речовиною без системи контролю витоку може розглядатися як неприйнятний ризик [16, 18].

Таблиця 1.1. Рівні ризику

| Рівень ризику | Характеристика                                                     | Необхідні дії                                                               |
|---------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Прийнятний    | Ризик є мінімальним або перебуває в межах установлених норм        | Підтримання контролю та періодичний моніторинг                              |
| Допустимий    | Ризик існує, але може контролюватися за допомогою захисних заходів | Застосування технічних, організаційних і природоохоронних заходів           |
| Неприйнятний  | Ризик перевищує безпечний рівень і створює значну загрозу          | Негайне зниження ризику, модернізація або припинення небезпечної діяльності |

Таким чином, ризик є важливим показником для оцінювання небезпеки техногенних аварій. Техногенний ризик відображає ймовірність аварій і катастроф, пов'язаних із функціонуванням технічних об'єктів, а екологічний ризик характеризує можливість негативних змін у довкіллі та загрозу для здоров'я населення. Розмежування індивідуального, соціального, прийнятного, допустимого й неприйнятного ризику дає змогу більш обґрунтовано оцінювати небезпеку, визначати пріоритети управління та розробляти ефективні заходи запобігання техногенним аваріям [13, 16].

## РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ОЦІНКИ РИЗИКІВ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ

### 2.1. Загальна характеристика методів оцінювання ризику

Оцінювання ризику є важливим етапом управління техногенною та екологічною безпекою. Його головна мета полягає у виявленні небезпек, визначенні ймовірності виникнення аварійних подій, аналізі можливих наслідків і виборі заходів для зменшення ризику. У міжнародній практиці оцінювання ризику розглядають як процес, що охоплює ідентифікацію ризику, аналіз ризику та оцінювання його прийнятності. Такий підхід покладено в основу стандартів серії ISO 31000 та IEC/ISO 31010, які використовуються для вибору й застосування методів оцінки ризиків [12, 19].

У сфері техногенних аварій оцінювання ризику дає змогу визначити, які об'єкти, процеси або речовини є найбільш небезпечними, які сценарії аварій можуть виникнути, якими будуть масштаби впливу на населення і довкілля, а також які заходи необхідно впровадити для запобігання або мінімізації наслідків. Наприклад, для хімічного підприємства оцінюють ризик викиду токсичних речовин, для нафтогазового об'єкта - ризик вибуху, пожежі чи розливу нафтопродуктів, для гідротехнічної споруди - ризик прориву дамби або затоплення території [31,33].

Методи оцінювання ризику умовно поділяють на якісні, кількісні, експертні, статистичні та матричні. На практиці ці методи часто поєднуються, оскільки кожен із них має свої переваги й обмеження.

Якісні методи ґрунтуються на описовій характеристиці ризику без точного математичного розрахунку його величини. За таких методів ризик визначають за допомогою словесних категорій, наприклад: *низький, середній, високий, критичний* або *неприйнятний* [18, 33].

Якісні методи застосовують тоді, коли відсутні точні статистичні дані, складно кількісно оцінити ймовірність аварії або необхідно швидко визначити пріоритетні небезпеки. Вони є зручними на початковому етапі аналізу, коли потрібно встановити, які джерела ризику потребують детальнішого вивчення.

До якісних методів можна віднести: опис небезпечних чинників; попередній аналіз небезпек; аналіз сценаріїв аварій; метод контрольних списків; ранжування ризиків за рівнем безпеки; побудову матриць ризику.

Перевагою якісних методів є простота використання, доступність і можливість застосування навіть за умов обмеженої інформації. Недоліком є певна суб'єктивність, оскільки результати значною мірою залежать від досвіду фахівців, які проводять оцінювання [14, 16].

Кількісні методи передбачають розрахунок ризику у числовій формі. У найпростішому вигляді ризик можна розглядати як поєднання ймовірності виникнення небезпечної події та тяжкості її наслідків:

$$R = P \times C,$$

де  $R$  - ризик,  $P$  - ймовірність виникнення аварії,  $C$  - величина можливих наслідків [13, 15].

Кількісні методи використовують тоді, коли є достатньо вихідних даних: статистика аварій, відомості про частоту відмов обладнання, характеристики небезпечних речовин, дані моніторингу, результати моделювання поширення забруднення тощо [11, 13].

У сучасних підходах до оцінювання ризиків надзвичайних ситуацій можуть застосовуватися такі кількісні методи, як Байєсова статистика, мережі Байєса, матриця «наслідок – імовірність», аналіз витрат і вигод, аналіз Парето та FN-криві. В українській нормативній практиці ці методи згадуються в Методичних рекомендаціях щодо оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій, затверджених наказом МВС України від 13 жовтня 2023 року № 836 [38, 39].

Кількісне оцінювання дає змогу порівнювати різні сценарії аварій, визначати економічні збитки, прогнозувати зони ураження, оцінювати кількість потенційно постраждалих осіб і розраховувати ефективність природоохоронних або захисних заходів. Його недоліком є потреба у достовірних даних і складніших розрахунках [35, 37].

Експертні методи базуються на знаннях, досвіді та професійних судженнях фахівців. Їх застосовують тоді, коли статистичних даних недостатньо або ситуація є складною для формального розрахунку. До експертного оцінювання можуть залучатися екологи, інженери, технологи, фахівці з охорони праці, цивільного захисту, гідрогеологи, хіміки, енергетики та представники органів місцевого управління [33, 35].

Експертні методи можуть використовуватися для: визначення найбільш імовірних сценаріїв аварії; оцінювання небезпечності речовин або технологічних процесів; ранжування об'єктів за рівнем ризику; визначення пріоритетних заходів безпеки; оцінювання готовності підприємства до реагування на аварію [31, 33].

Прикладом експертного підходу є ситуація, коли група фахівців оцінює ризик аварії на складі небезпечних речовин за такими критеріями: технічний стан обладнання, наявність систем вентиляції, пожежогасіння, відстань до житлової забудови, близькість водойм і якість аварійного планування [25, 29].

Перевагою експертних методів є можливість врахування практичного досвіду та специфіки конкретного об'єкта. Недоліком є суб'єктивність оцінок, тому для підвищення достовірності бажано залучати кількох незалежних експертів і використовувати чіткі критерії оцінювання [23, 28].

Статистичні методи ґрунтуються на аналізі даних про аварії, відмови обладнання, частоту порушень технологічних процесів, обсяги викидів, кількість постраждалих, матеріальні збитки та екологічні наслідки. Такі методи дають змогу встановити закономірності виникнення аварій і прогнозувати ймовірність подібних подій у майбутньому [21, 23].

Статистичні методи можуть застосовуватися для: аналізу частоти аварій на певному типі об'єктів; оцінки ймовірності відмови обладнання; визначення найбільш небезпечних технологічних операцій; прогнозування повторюваності аварій; порівняння рівня аварійності на різних підприємствах або територіях [16, 19].

Наприклад, якщо протягом кількох років на підприємстві фіксуються повторні витoki небезпечних речовин через несправність трубопроводів, статистичний аналіз може показати підвищений ризик подальших аварій саме в цій частині технологічної системи [13, 16].

Перевагою статистичних методів є їхня об'єктивність, оскільки вони спираються на фактичні дані. Основним обмеженням є те, що статистика минулих аварій не завжди повністю відображає майбутню небезпеку, особливо якщо змінюються технології, обладнання, умови експлуатації або зовнішні чинники [9, 13].

## **2.2. Ідентифікація небезпек на техногенних об'єктах**

Ідентифікація небезпек є початковим і одним із найважливіших етапів оцінювання ризиків техногенних аварій. Її сутність полягає у виявленні потенційних джерел небезпеки, небезпечних факторів, умов виникнення аварійних ситуацій та можливих шляхів поширення забруднення у навколишньому природному середовищі. Без якісної ідентифікації небезпек неможливо об'єктивно оцінити рівень ризику, спрогнозувати наслідки аварії та розробити ефективні заходи запобігання [14, 20].

На техногенних об'єктах небезпечними можуть бути як самі технологічні процеси, так і речовини, обладнання, інженерні мережі, умови експлуатації, людський фактор або зовнішні природні впливи. До потенційно небезпечних факторів належать високий тиск, підвищена температура, вибухонебезпечні гази, легкозаймисті рідини, токсичні речовини, радіоактивні матеріали, агресивні хімічні реагенти, великі об'єми стічних вод, хвости збагачення, шлами, відходи виробництва та інші джерела можливого забруднення [4, 19].

Першим етапом ідентифікації є визначення потенційно небезпечних факторів. Для цього аналізують вид діяльності підприємства, номенклатуру сировини й готової продукції, кількість небезпечних речовин, умови їх

зберігання, транспортування і використання. Наприклад, на хімічному підприємстві основну небезпеку можуть становити токсичні гази або кислоти, на нафтогазовому об'єкті - природний газ, нафта, конденсат і нафтопродукти, а на гідротехнічній споруді - значні об'єми води або забруднених промислових відходів [23, 31].

Важливе значення має аналіз технологічних процесів. На цьому етапі вивчають послідовність виробничих операцій, режими роботи обладнання, точки можливого порушення технології, місця підвищеного навантаження, ділянки накопичення небезпечних речовин і системи захисту. Особливу увагу приділяють процесам, які відбуваються під тиском, за високої температури, з використанням вибухонебезпечних або токсичних речовин. Саме такі процеси найчастіше створюють передумови для аварій [21, 32].

Наступним етапом є виявлення джерел аварійного забруднення. До них можуть належати резервуари, трубопроводи, реактори, насоси, компресори, склади хімічних речовин, очисні споруди, шламонакопичувачі, хвостосховища, каналізаційні мережі, транспортні цистерни, місця зберігання відходів. У разі пошкодження таких об'єктів забруднювальні речовини можуть потрапляти в атмосферне повітря, ґрунти, поверхневі та підземні води.

Особливу увагу слід приділяти шляхам поширення забруднення. Наприклад, токсична газова хмара може поширюватися з повітряними потоками, нафтопродукти - розтікатися поверхнею ґрунту або водойми, а розчинені хімічні речовини - проникати у підземні води. Тому під час ідентифікації небезпек необхідно враховувати рельєф місцевості, напрямок переважаючих вітрів, гідрологічні умови, глибину залягання підземних вод, близькість житлової забудови, водойм, сільськогосподарських угідь і природоохоронних територій [33, 35].

Завершальним етапом ідентифікації є оцінка ймовірних сценаріїв аварій. Сценарій аварії - це можливий варіант розвитку небезпечної події від моменту виникнення порушення до формування її наслідків. Наприклад, для резервуара з нафтопродуктами можливими сценаріями є витік без займання, витік із

подальшим загорянням, вибух пароповітряної суміші або забруднення ґрунту й води внаслідок розливу [31, 33].

Отже, ідентифікація небезпек на техногенних об'єктах передбачає комплексне вивчення небезпечних факторів, технологічних процесів, джерел аварійного забруднення та можливих сценаріїв розвитку аварії. Саме цей етап формує основу для подальшої оцінки ймовірності аварій, аналізу їхніх наслідків і визначення рівня екологічного ризику [29, 31].

### **2.3. Оцінка ймовірності виникнення аварій**

Оцінка ймовірності виникнення аварій є важливою складовою аналізу техногенного ризику. Вона дає змогу визначити, наскільки реальною є небезпечна подія за конкретних умов експлуатації об'єкта. Ймовірність аварії залежить від технічного стану обладнання, складності технологічного процесу, рівня організації виробництва, кваліфікації персоналу, наявності систем контролю, а також від впливу природних і зовнішніх чинників [25, 27].

Одним із основних підходів до оцінки ймовірності є аналіз частоти аварій. Для цього використовують інформацію про аварії, інциденти, відмови обладнання, порушення технологічних режимів і нештатні ситуації, які вже відбувалися на підприємстві або на аналогічних об'єктах. Якщо певний тип відмов повторюється регулярно, це свідчить про підвищену ймовірність подальших аварій. Наприклад, часті витoki через зношені трубопроводи можуть вказувати на високий ризик розгерметизації системи [23, 25].

Важливим напрямом є оцінка технічного стану обладнання. Зношеність основних фондів, корозія металевих конструкцій, несправність запірної арматури, порушення герметичності резервуарів, дефекти електрообладнання або недостатній технічний контроль істотно підвищують імовірність аварій. Тому під час оцінювання ризику необхідно аналізувати результати технічних оглядів, ремонту, діагностики, випробувань, терміни експлуатації обладнання та відповідність його стану вимогам безпеки [21, 22].

Окремо враховують природні чинники, які можуть стати причиною або каталізатором аварійної ситуації. До них належать сильні опади, паводки, підтоплення, зсуви, землетруси, буревії, різкі температурні коливання, блискавки, ерозійні процеси. Наприклад, підтоплення території підприємства може спричинити пошкодження складів небезпечних речовин, а зсуви - руйнування трубопроводів або гідротехнічних споруд [17, 19].

Не менш важливими є технологічні чинники. До них належать складність виробничого процесу, робота обладнання під високим тиском або температурою, використання небезпечних речовин, наявність вибухонебезпечних сумішей, недостатня автоматизація, відсутність резервних систем або перевищення проєктних навантажень. Чим складніший технологічний процес і чим більша кількість небезпечних речовин використовується, тим вищим може бути рівень техногенного ризику [15, 17].

Важливу роль відіграють також організаційні чинники. До них належать рівень підготовки персоналу, дотримання інструкцій, якість виробничого контролю, наявність планів ліквідації аварійних ситуацій, своєчасність технічного обслуговування, культура безпеки на підприємстві. Навіть за справного обладнання аварія може виникнути через помилки персоналу, недбалість, порушення регламентів або недостатню координацію дій [12, 14].

Для комплексної оцінки ймовірності аварій використовують побудову можливих сценаріїв розвитку аварійної ситуації. Це дозволяє простежити, як невелике порушення може перерости у масштабну аварію. Наприклад, початковим етапом може бути незначний витік газу, далі – утворення вибухонебезпечної суміші, потім - займання або вибух, а після цього - поширення пожежі й забруднення атмосферного повітря продуктами горіння [9, 12].

Сценарний аналіз допомагає визначити критичні точки технологічного процесу, де необхідно посилити контроль. Він також дає змогу оцінити, які саме заходи можуть знизити ймовірність аварії: модернізація обладнання, встановлення датчиків контролю, автоматичне відключення систем, регулярне

навчання персоналу, резервування небезпечних вузлів або поліпшення аварійного планування [8, 11].

Отже, оцінка ймовірності виникнення техногенних аварій повинна враховувати статистику аварійності, технічний стан обладнання, природні, технологічні та організаційні чинники. Найбільш обґрунтовані результати можна отримати за умови поєднання статистичного аналізу, експертної оцінки та сценарного прогнозування [7, 12].

#### **2.4. Оцінка наслідків техногенних аварій для довкілля**

Оцінка наслідків техногенних аварій для довкілля спрямована на визначення масштабу, інтенсивності та тривалості негативного впливу аварійної події на компоненти навколишнього природного середовища. До таких компонентів належать атмосферне повітря, поверхневі й підземні води, ґрунтовий покрив, рослинний і тваринний світ, а також населення, яке проживає в зоні можливого впливу аварії [2, 15].

Першим напрямом є оцінка впливу на атмосферне повітря. Під час аварій в атмосферу можуть потрапляти токсичні гази, пил, дим, сажа, оксиди азоту, оксиди сірки, чадний газ, леткі органічні сполуки, пари нафтопродуктів, хімічні реагенти або радіоактивні аерозолі. Ступінь небезпеки залежить від виду речовини, її концентрації, тривалості викиду, метеорологічних умов, напрямку вітру та відстані до житлової забудови [3, 9].

Атмосферне забруднення є особливо небезпечним через швидке поширення. Токсична хмара або продукти горіння можуть за короткий час охопити значні території. Наслідками можуть бути погіршення якості повітря, подразнення органів дихання у людей, пошкодження рослинності, осідання небезпечних речовин на ґрунт і водні поверхні [1, 20].

Другим важливим напрямом є забруднення поверхневих і підземних вод. Воно може виникати внаслідок аварійних скидів промислових стічних вод, розливів нафтопродуктів, потрапляння кислот, лугів, важких металів,

токсичних речовин, радіоактивних матеріалів або забруднених вод після гасіння пожеж. Поверхневі води можуть швидко переносити забруднювачі на значні відстані, що створює загрозу для водних екосистем і джерел водопостачання [8, 20].

Підземні води забруднюються повільніше, але наслідки такого забруднення часто є довготривалими. Якщо токсичні речовини проникають у водоносні горизонти, їх очищення є складним і потребує значного часу. Особливо небезпечними є аварії поблизу джерел питного водопостачання, колодязів, свердловин, річок і водосховищ [7, 35].

Третім напрямом є оцінка забруднення ґрунтового покриву. Ґрунти можуть забруднюватися внаслідок розливів нафти й нафтопродуктів, осідання пилу та токсичних аерозолів, витоку хімічних речовин, руйнування резервуарів, хвостосховищ або складів відходів. Небезпека ґрунтового забруднення полягає у здатності ґрунтів накопичувати важкі метали, органічні токсиканти, радіонукліди та інші небезпечні речовини. Забруднення ґрунтів може призводити до зниження їхньої родючості, пригнічення ґрунтової мікрофлори, погіршення умов росту рослин, вторинного забруднення підземних вод і потрапляння токсичних речовин у харчові ланцюги. У сільськогосподарських районах це створює додаткову загрозу для якості продукції та здоров'я населення. Окремо оцінюють вплив на рослинний і тваринний світ. Техногенні аварії можуть спричинити пошкодження рослинності, загибель окремих видів, порушення середовищ існування, зменшення біорізноманіття, зміну структури екосистем. У водних екосистемах аварійні забруднення можуть призводити до загибелі риби, планктону, безхребетних організмів, зменшення вмісту кисню у воді та порушення природних процесів самоочищення [6, 30].

У наземних екосистемах токсичні речовини можуть накопичуватися в рослинах, ґрунтових організмах і тваринах. Це порушує трофічні ланцюги та може мати довготривалі екологічні наслідки. Особливо небезпечними є аварії на територіях, що мають природоохоронний статус або характеризуються

високим рівнем біорізноманіття. Важливою складовою оцінки наслідків є визначення ризиків для здоров'я населення. Люди можуть зазнавати впливу небезпечних речовин через вдихання забрудненого повітря, споживання забрудненої води або харчових продуктів, контакт із забрудненим ґрунтом чи поверхнями. Ризики залежать від токсичності речовини, концентрації, тривалості впливу, віку, стану здоров'я людей і наявності засобів захисту [2, 20].

Наслідками для населення можуть бути гострі отруєння, подразнення органів дихання, алергічні реакції, загострення хронічних захворювань, психологічний стрес, необхідність евакуації або тимчасового обмеження проживання на забрудненій території. Крім безпосереднього впливу на здоров'я, техногенні аварії можуть погіршувати якість життя населення через втрату доступу до чистої води, забруднення земель, зниження безпечності харчових продуктів і порушення нормальної життєдіяльності громад [3, 33].

Отже, оцінка наслідків техногенних аварій для довкілля повинна бути комплексною і враховувати вплив на всі основні компоненти природного середовища та населення. Найбільш значущими екологічними наслідками є забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів і ґрунтів, порушення функціонування екосистем, деградація біорізноманіття та виникнення ризиків для здоров'я людей. Матричний підхід є одним із найпоширеніших і найзручніших способів оцінювання ризику. Він полягає у поєднанні двох основних параметрів: ймовірності виникнення аварії та тяжкості її наслідків. На перетині цих двох показників визначається загальний рівень ризику [5, 30].

Таблиця 1.2. Матриця ризику

| Ймовірність<br>/ Наслідки | Незначні         | Помірні           | Серйозні          | Катастрофічні     |
|---------------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Низька                    | Низький<br>ризик | Низький<br>ризик  | Середній<br>ризик | Середній<br>ризик |
| Середня                   | Низький<br>ризик | Середній<br>ризик | Високий<br>ризик  | Високий<br>ризик  |

|             |                |               |                    |                    |
|-------------|----------------|---------------|--------------------|--------------------|
| Висока      | Середній ризик | Високий ризик | Високий ризик      | Неприйнятний ризик |
| Дуже висока | Високий ризик  | Високий ризик | Неприйнятний ризик | Неприйнятний ризик |

Матриця «наслідок - імовірність» використовується для поєднання оцінок імовірності та наслідків з метою визначення або ранжування рівнів ризику. Такий підхід наведений серед методів оцінювання ризику в IEC/ISO 31010. Для техногенних аварій матричний підхід є особливо корисним, оскільки він дає змогу швидко визначити, які аварійні сценарії потребують першочергової уваги. Наприклад, аварія з низькою ймовірністю, але катастрофічними наслідками - як-от радіаційний викид або прорив гідротехнічної споруди - може мати високий або неприйнятний рівень ризику. Натомість подія з високою ймовірністю, але незначними наслідками може потребувати регулярного контролю, але не завжди належить до критичних [4, 20].

Матричний підхід має такі переваги: простота використання; наочність результатів; можливість швидкого ранжування ризиків; придатність для попереднього аналізу небезпек; можливість застосування як для якісних, так і для напівкількісних оцінок. Водночас матриця ризику має певні обмеження. Її результати залежать від правильності вибору шкал імовірності та наслідків, а також від професійності експертів, які заповнюють матрицю. Тому її доцільно використовувати разом з іншими методами - статистичними, експертними або розрахунковими [1, 7].

Методи оцінювання ризику техногенних аварій дають змогу системно аналізувати небезпеки, прогнозувати можливі наслідки та обґрунтовувати заходи безпеки. Якісні методи застосовують для описової та попередньої оцінки, кількісні – для числового розрахунку ризику, експертні - для врахування професійного досвіду, статистичні - для аналізу фактичних даних, а матричний підхід – для наочного ранжування ризиків за рівнем небезпеки. Найбільш ефективним є комплексне використання кількох методів, оскільки

це підвищує достовірність оцінювання та дає змогу краще врахувати специфіку конкретного техногенного об'єкта [1, 3].

### **РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ НА КОМПОНЕНТИ ДОВКІЛЛЯ**

#### **3.1. Вплив техногенних аварій на атмосферне повітря**

Атмосферне повітря є одним із перших компонентів довкілля, який зазнає впливу під час техногенних аварій. Це пояснюється тим, що багато аварійних ситуацій супроводжуються викидами газоподібних, пароподібних, аерозольних або пилових забруднювачів, які швидко поширюються у повітряному середовищі. На відміну від забруднення ґрунтів чи вод, атмосферне забруднення може за короткий час охопити значні території, створюючи небезпеку як для працівників підприємства, так і для населення прилеглих населених пунктів.

Техногенні аварії на промислових, хімічних, нафтогазових, енергетичних, транспортних та інших об'єктах можуть супроводжуватися надходженням у повітря токсичних речовин, продуктів горіння, пилу, сажі, летких органічних сполук, парів нафтопродуктів, кислотних газів, радіоактивних аерозолів та інших небезпечних компонентів. Такі викиди можуть мати короткочасний, але інтенсивний характер, або тривати протягом значного часу, якщо аварію не вдається швидко локалізувати.

Викиди токсичних речовин є одним із найнебезпечніших проявів техногенних аварій. Вони можуть виникати внаслідок розгерметизації резервуарів, трубопроводів, реакторів, ємностей із хімічними речовинами, пошкодження технологічного обладнання, пожеж або вибухів. До токсичних речовин, які можуть потрапляти в атмосферне повітря під час аварій, належать аміак, хлор, сірководень, оксиди азоту, оксиди сірки, чадний газ, пари бензину, феноли, формальдегід, органічні розчинники, продукти неповного згоряння пального та інші небезпечні сполуки.

Небезпека токсичних викидів полягає у тому, що вони можуть безпосередньо впливати на органи дихання, слизові оболонки, нервову систему, серцево-судинну систему та загальний стан людини. Особливо вразливими є діти, люди похилого віку, особи з хронічними захворюваннями органів дихання, а також працівники аварійних служб, які перебувають у зоні впливу забруднення.

Під час пожеж і вибухів на техногенних об'єктах у повітря надходить велика кількість продуктів горіння. До них належать дим, сажа, чадний газ, діоксид вуглецю, оксиди азоту, оксиди сірки, дрібнодисперсний пил, поліциклічні ароматичні вуглеводні та інші токсичні речовини. Якщо горять пластмаси, гума, лакофарбові матеріали, нафтопродукти або хімічні реагенти, склад продуктів горіння може бути особливо небезпечним.

Важливою особливістю техногенних аварій є утворення димових і газових хмар. Димова або газова хмара формується тоді, коли забруднювальні речовини надходять в атмосферу у значній кількості й поширюються під дією вітру та вертикальних потоків повітря. Така хмара може містити токсичні гази, пари хімічних речовин, дрібні частинки пилу, краплини рідких речовин або продукти горіння.

Газові хмари особливо небезпечні у випадках аварій із викидом хлору, аміаку, сірководню або інших хімічно небезпечних речовин. Залежно від фізико-хімічних властивостей речовини хмара може поширюватися на різній висоті. Наприклад, важчі за повітря гази можуть накопичуватися в пониженнях рельєфу, підвалах, ярах або низинних ділянках, що підвищує небезпеку для населення.

Димові хмари виникають переважно під час пожеж. Вони можуть знижувати видимість, ускладнювати роботу рятувальників, погіршувати якість повітря та спричиняти осідання забруднювачів на поверхню ґрунту, рослинність, водойми, будівлі й транспортні шляхи. Частинки сажі та пилу можуть переносити на своїй поверхні токсичні речовини, тому навіть після розсіювання диму можливе вторинне забруднення території.

Поширення забруднювачів у повітрі залежить від багатьох чинників: виду речовини, кількості викиду, температури, швидкості виходу газу або пари, висоти джерела викиду, рельєфу місцевості, забудови території, наявності зелених насаджень і метеорологічних умов. Забруднювачі можуть поширюватися у вигляді газової хмари, аерозолів, пилового шлейфу або диму.

У процесі поширення частина забруднювальних речовин розсіюється в атмосфері, частина осідає на поверхню землі, а частина може вступати у хімічні реакції з іншими компонентами повітря. Наприклад, оксиди азоту та сірки можуть сприяти утворенню кислотних опадів, а леткі органічні сполуки за певних умов беруть участь у формуванні фотохімічного смогу.

Поширення забруднення в атмосфері може мати як локальний, так і регіональний характер. Локальний вплив спостерігається поблизу місця аварії, де концентрації забруднювачів є найвищими. Регіональний вплив можливий у разі масштабних пожеж, вибухів, тривалих викидів або аварій із великою кількістю небезпечних речовин. У таких випадках забруднювачі можуть переноситися повітряними масами на значні відстані.

Велике значення для оцінки атмосферного забруднення має вплив метеорологічних умов на розсіювання забруднення. До основних метеорологічних чинників належать швидкість і напрямок вітру, температура повітря, атмосферний тиск, вологість, наявність опадів, хмарність, турбулентність атмосфери та температурна інверсія.

Вітер визначає напрямок і швидкість поширення забруднювальної хмари. За сильного вітру забруднювачі швидше розсіюються, але можуть переноситися на більші відстані. За слабого вітру забруднення може затримуватися поблизу джерела викиду, що призводить до зростання концентрації токсичних речовин у приземному шарі атмосфери.

Температурна інверсія є особливо небезпечною умовою для розсіювання забруднення. Вона виникає тоді, коли тепліший шар повітря розташовується над холоднішим приземним шаром і перешкоджає вертикальному перемішуванню повітряних мас. У таких умовах забруднювачі накопичуються

біля поверхні землі, що може суттєво погіршувати якість повітря в населених пунктах.

Опади можуть частково очищувати атмосферу від пилу, аерозолів і газоподібних речовин, однак при цьому забруднювачі потрапляють на поверхню ґрунту, рослинність і у водні об'єкти. Таким чином, атмосферне забруднення може переходити в забруднення інших компонентів довкілля. Наприклад, після аварійного викиду токсичних речовин дощ може сприяти їхньому вимиванню з атмосфери й накопиченню у ґрунті або поверхневих водах.

Рельєф і забудова території також впливають на поширення забруднення. У низинах, балках, долинах річок і щільно забудованих районах може спостерігатися накопичення забруднювальних речовин. Високі будівлі змінюють напрямки повітряних потоків і можуть створювати зони застою повітря. Зелені насадження частково затримують пил і аерозолі, проте не можуть повністю усунути небезпеку токсичних газів.

Наслідки забруднення атмосферного повітря під час техногенних аварій можуть бути різними за масштабом і тривалістю. Короткострокові наслідки включають різке погіршення якості повітря, появу неприємного запаху, задимлення, зниження видимості, подразнення органів дихання та необхідність тимчасового обмеження перебування людей на відкритому повітрі. У більш небезпечних випадках може виникати потреба в евакуації населення або запровадженні санітарно-захисних заходів.

Довгострокові наслідки пов'язані з осіданням забруднювачів на поверхню ґрунтів, рослинності та водойм, накопиченням токсичних речовин у природних середовищах, погіршенням стану рослинного покриву, підвищенням ризику хронічних захворювань населення та необхідністю тривалого екологічного моніторингу.

Отже, техногенні аварії можуть мати значний негативний вплив на атмосферне повітря через аварійні викиди токсичних речовин, утворення димових і газових хмар, поширення забруднювачів повітряними потоками та

їхнє подальше осідання на земну поверхню. Рівень небезпеки значною мірою залежить від складу викидів, масштабу аварії, метеорологічних умов, рельєфу місцевості та відстані до житлової забудови. Саме тому оцінка впливу техногенних аварій на атмосферне повітря є важливою складовою загального аналізу екологічних ризиків.

### **3.2. Вплив аварій на водні ресурси**

Водні ресурси є одним із найбільш уразливих компонентів довкілля під час техногенних аварій. Це пояснюється тим, що вода здатна швидко переносити забруднювальні речовини на значні відстані, сприяти їхньому розчиненню, накопиченню в донних відкладах і подальшому включенню в біологічні ланцюги. У разі аварій на промислових, хімічних, нафтогазових, транспортних, комунальних або гідротехнічних об'єктах забруднення водних ресурсів може мати як локальний, так і регіональний характер.

Основними шляхами потрапляння забруднювальних речовин у водні об'єкти є аварійні скиди стічних вод, розливи нафтопродуктів, витік хімічних речовин, пошкодження очисних споруд, руйнування резервуарів, трубопроводів, хвостосховищ, шламонакопичувачів або транспортних цистерн. Забруднення може надходити безпосередньо у річки, озера, водосховища чи канали, а також опосередковано – через поверхневий стік із забруднених територій або проникнення речовин у підземні води.

Одним із найпоширеніших видів аварійного забруднення водних ресурсів є потрапляння нафтопродуктів. Нафта, бензин, дизельне паливо, мастила та інші вуглеводневі речовини можуть потрапляти у водойми внаслідок аварій на нафтопроводах, нафтобазах, автозаправних станціях, транспорті або промислових майданчиках. Потрапляючи у воду, нафтопродукти часто утворюють плівку на її поверхні, яка погіршує газообмін між водою та атмосферою, зменшує надходження кисню і світла, негативно впливає на водні організми та процеси самоочищення водойми.

Особливу небезпеку становлять хімічні речовини, які можуть потрапляти у водне середовище під час аварій на підприємствах хімічної, металургійної, гірничодобувної, енергетичної та агропромислової галузей. До таких речовин належать кислоти, луги, важкі метали, феноли, органічні розчинники, пестициди, мінеральні добрива, токсичні солі, реагенти для очищення води та інші сполуки. Їхня небезпека полягає у високій токсичності, здатності змінювати фізико-хімічні властивості води, накопичуватися в донних відкладах і потрапляти до організмів через харчові ланцюги.

Значну загрозу створюють також аварійні скиди стічних вод. Вони можуть виникати внаслідок порушення роботи каналізаційних мереж, очисних споруд, насосних станцій або промислових систем водовідведення. У таких випадках до водних об'єктів можуть потрапляти органічні речовини, завислі частинки, патогенні мікроорганізми, сполуки азоту й фосфору, нафтопродукти, важкі метали та інші забруднювачі. Це може спричинити погіршення санітарного стану води, евтрофікацію водойм, дефіцит кисню та загибель водних організмів.

Забруднення річок, озер і водосховищ під час техногенних аварій має різний характер залежно від типу водного об'єкта. У річках забруднювачі можуть швидко переноситися течією вниз за руслом, поширюючись на значні відстані. Це ускладнює локалізацію аварії та може створювати небезпеку для кількох населених пунктів, розташованих нижче за течією. В озерах і водосховищах забруднення може затримуватися довше, накопичуватися в донних відкладах і впливати на якість води протягом тривалого часу.

Особливо небезпечними є аварії поблизу водосховищ, які використовуються для питного, господарського або промислового водопостачання. У таких випадках навіть короткочасне забруднення може мати серйозні наслідки для населення, оскільки виникає загроза потрапляння небезпечних речовин у системи централізованого водопостачання.

Одним із найважливіших наслідків техногенних аварій є загроза для питного водопостачання. Якщо забруднювальні речовини потрапляють у

джерела питної води, це може призвести до тимчасового припинення водозабору, необхідності додаткового очищення, переходу на альтернативні джерела водопостачання або забезпечення населення привізною водою. Найбільшу небезпеку становлять токсичні хімічні речовини, нафтопродукти, важкі метали, мікробіологічне забруднення та радіоактивні речовини.

Забруднення питної води може впливати на здоров'я населення через споживання води, використання її для приготування їжі, побутових потреб або зрошення сільськогосподарських культур. Навіть якщо концентрація забруднювача є невисокою, тривале надходження небезпечних речовин у водопровідну систему може створювати хронічні ризики для здоров'я людей.

Важливим аспектом є також вплив техногенних аварій на підземні води. Забруднення підземних вод часто відбувається повільніше, ніж поверхневих, однак його наслідки можуть бути значно довготривалішими. Небезпечні речовини можуть проникати через ґрунтовий покрив у водоносні горизонти, особливо якщо аварія сталася на територіях із високою проникністю ґрунтів або неглибоким заляганням ґрунтових вод. Очищення підземних вод є складним, дорогим і тривалим процесом.

Техногенні аварії суттєво впливають на водні екосистеми. Унаслідок потрапляння токсичних речовин у воду може порушуватися життєдіяльність водоростей, планктону, молюсків, ракоподібних, риб, земноводних та інших гідробіонтів. Деякі речовини діють безпосередньо токсично, інші змінюють умови існування організмів – температуру, кислотність, вміст кисню, прозорість води або сольовий склад.

Одним із поширених наслідків аварійного забруднення є зниження вмісту розчиненого кисню у воді. Це може відбуватися через надходження органічних речовин, нафтопродуктів або хімічних сполук, які споживають кисень у процесі розкладання чи окиснення. Дефіцит кисню призводить до пригнічення або загибелі риб та інших водних організмів.

У разі надходження сполук азоту й фосфору може активізуватися процес евтрофікації - надмірного розвитку водоростей і ціанобактерій. Це погіршує

якість води, зменшує її прозорість, спричиняє дефіцит кисню та порушує природну рівновагу водної екосистеми.

Небезпечним наслідком є також біоаккумуляція забруднювальних речовин. Важкі метали, стійкі органічні сполуки та деякі токсиканти можуть накопичуватися в організмах водних тварин і передаватися харчовими ланцюгами. У результаті забруднення може впливати не лише на водні організми, а й на птахів, ссавців і людей, які споживають забруднену рибу або воду.

Аварійне забруднення водних ресурсів може мати як короткострокові, так і довгострокові наслідки. До короткострокових належать різке погіршення якості води, зміна її кольору, запаху, прозорості, загибель риби, заборона купання, рибальства або водозабору. Довгострокові наслідки проявляються у накопиченні забруднювачів у донних відкладах, погіршенні стану водних екосистем, вторинному забрудненні, зниженні біорізноманіття та тривалому обмеженні використання водних ресурсів.

Вплив техногенних аварій на водні ресурси є одним із найнебезпечніших напрямів екологічного ризику. Потрапляння нафтопродуктів, хімічних речовин і стічних вод у річки, озера, водосховища або підземні води може спричинити погіршення якості води, загрозу для питного водопостачання, порушення функціонування водних екосистем і ризику для здоров'я населення. Саме тому під час оцінювання наслідків техногенних аварій необхідно особливу увагу приділяти стану водних об'єктів, джерелам водопостачання, шляхам поширення забруднення та можливостям швидкої локалізації аварійного впливу.

### **3.3. Забруднення ґрунтів унаслідок техногенних аварій**

Ґрунтовий покрив є важливим компонентом довкілля, який забезпечує ріст рослин, кругообіг речовин, фільтрацію води, підтримання біорізноманіття та формування умов для сільськогосподарського виробництва. Унаслідок

техногенних аварій ґрунти можуть зазнавати значного забруднення, оскільки саме вони часто стають кінцевим середовищем накопичення небезпечних речовин, що потрапляють у довкілля під час аварійних викидів, скидів, розливів або осідання забруднювачів з атмосферного повітря.

Забруднення ґрунтів унаслідок техногенних аварій може виникати на промислових підприємствах, хімічних і нафтогазових об'єктах, транспортних шляхах, складах небезпечних речовин, полігонах, хвостосховищах, шламонакопичувачах, очисних спорудах і місцях зберігання відходів. Основними шляхами надходження забруднювачів у ґрунт є розливи нафти та нафтопродуктів, витік хімічних речовин, осідання токсичного пилу й аерозолів, потрапляння забруднених стічних вод, руйнування резервуарів або трубопроводів.

Одним із найбільш небезпечних проявів аварійного забруднення є накопичення важких металів. До важких металів, які можуть потрапляти у ґрунти внаслідок техногенних аварій, належать свинець, кадмій, ртуть, хром, нікель, мідь, цинк, миш'як та інші токсичні елементи. Їхніми джерелами можуть бути металургійні підприємства, гірничодобувні об'єкти, шламонакопичувачі, хвостосховища, склади промислових відходів, хімічні виробництва, транспортні аварії або пожежі на промислових об'єктах.

Небезпека важких металів полягає в тому, що вони не руйнуються в ґрунті, а можуть зберігатися протягом тривалого часу, накопичуватися у верхньому родючому шарі та переходити в рослини. Надалі ці речовини можуть потрапляти до харчових ланцюгів і створювати ризики для тварин і людини. Крім того, важкі метали можуть пригнічувати діяльність ґрунтових мікроорганізмів, порушувати процеси гумусоутворення, мінералізації органічної речовини та природного самоочищення ґрунту.

Поширеним видом техногенного забруднення є забруднення ґрунтів нафтопродуктами. Воно виникає внаслідок аварій на нафтопроводах, газоконденсатних і нафтових свердловинах, резервуарних парках, автозаправних станціях, нафтобазах, транспорті та промислових майданчиках.

У ґрунт можуть потрапляти нафта, бензин, дизельне паливо, мастила, газовий конденсат та інші вуглеводневі сполуки.

Нафтопродукти негативно впливають на ґрунтовий покрив через зміну його водно-повітряного режиму. Вони можуть обволікати ґрунтові частинки, зменшувати проникнення води й повітря, порушувати газообмін і створювати несприятливі умови для розвитку рослин та мікроорганізмів. Унаслідок цього сповільнюються процеси розкладання органічної речовини, знижується біологічна активність ґрунту, погіршується структура ґрунтового середовища.

Особливу небезпеку становлять легкі фракції нафтопродуктів, які можуть випаровуватися або мігрувати вглиб ґрунту, забруднюючи підземні води. Важчі фракції, навпаки, можуть тривалий час залишатися у верхніх шарах ґрунту, створюючи стійкі осередки забруднення. Тому забруднення нафтопродуктами часто має довготривалий характер і потребує спеціальних заходів рекультивації, таких як механічне зняття забрудненого шару, біоремедіація, фіторемедіація або використання сорбентів.

Техногенні аварії можуть спричиняти зміну фізико-хімічних властивостей ґрунтів. Залежно від типу забруднювача можуть змінюватися кислотність, сольовий склад, вміст органічної речовини, структура, щільність, водопроникність, повітроємність і буферна здатність ґрунту. Наприклад, потрапляння кислот або лугів може різко змінити реакцію ґрунтового розчину, що негативно впливає на доступність поживних елементів і життєдіяльність ґрунтових організмів.

Засолення ґрунтів може виникати внаслідок потрапляння мінералізованих вод, промислових розчинів або бурових відходів. Надмірна кількість солей порушує водний режим рослин, ускладнює поглинання води кореневою системою та може спричинити пригнічення або загибель рослинності. У разі потрапляння токсичних органічних сполук змінюється мікробіологічна активність ґрунту, що впливає на процеси самоочищення й відновлення природної родючості.

Одним із найважливіших наслідків аварійного забруднення є зниження родючості ґрунтів. Родючість залежить від вмісту гумусу, доступності поживних речовин, активності мікроорганізмів, структури ґрунту та його здатності забезпечувати рослини водою й повітрям. Забруднення важкими металами, нафтопродуктами, кислотами, лугами або токсичними органічними речовинами порушує ці властивості.

Зниження родючості проявляється у погіршенні росту рослин, зменшенні врожайності, пригніченні кореневої системи, порушенні проростання насіння, зниженні активності ґрунтових ферментів і мікроорганізмів. У сільськогосподарських районах це може мати не лише екологічні, а й економічні наслідки, оскільки забруднені землі можуть ставати непридатними для вирощування безпечної продукції.

Важливим аспектом є ризик вторинного забруднення вод і рослинності. Забруднювачі, які накопичилися у ґрунті, не завжди залишаються нерухомими. Під дією опадів, поверхневого стоку, зміни кислотності, ерозійних процесів або коливання рівня ґрунтових вод вони можуть мігрувати в інші компоненти довкілля. Наприклад, розчинні форми важких металів можуть потрапляти в підземні води, а нафтопродукти - переноситися поверхневим стоком у річки, озера або ставки.

Рослинність також може ставати шляхом поширення забруднення. Деякі рослини здатні поглинати важкі метали, нафтопродукти або інші токсичні речовини з ґрунту. У результаті забруднювачі можуть накопичуватися в коренях, стеблах, листках або плодах. Це створює ризики для тварин і людей, особливо якщо забруднена територія використовується для вирощування сільськогосподарських культур, випасання худоби або збору дикорослих рослин.

Вторинне забруднення може проявлятися і через пилове перенесення. У суху погоду дрібні частинки забрудненого ґрунту можуть підніматися в повітря та переноситися вітром на прилеглі території. Таким чином, ґрунтове

забруднення може знову переходити в атмосферне, створюючи додаткову загрозу для населення й екосистем.

Наслідки забруднення ґрунтів унаслідок техногенних аварій залежать від типу речовини, її концентрації, площі забруднення, тривалості впливу, властивостей ґрунту, кліматичних умов і характеру використання території. Найбільш небезпечними є аварії, що відбуваються на сільськогосподарських землях, поблизу джерел питного водопостачання, у межах природоохоронних територій або в густонаселених районах.

Для оцінки забруднення ґрунтів після техногенної аварії необхідно проводити відбір проб, лабораторний аналіз, визначення концентрацій забруднювачів, порівняння їх із нормативними показниками, картування забрудненої території та прогнозування подальшої міграції речовин. Важливим є також визначення необхідних заходів відновлення: локалізація забруднення, видалення небезпечних речовин, рекультивація, біоремедіація, фіторемедіація або обмеження використання території.

Забруднення ґрунтів унаслідок техногенних аварій є складною екологічною проблемою, оскільки ґрунт здатний накопичувати небезпечні речовини й тривалий час залишатися джерелом вторинного забруднення. Основними наслідками є накопичення важких металів, забруднення нафтопродуктами, зміна фізико-хімічних властивостей ґрунтів, зниження родючості та ризик потрапляння забруднювачів у води, рослинність і харчові ланцюги. Саме тому оцінка стану ґрунтів після техногенних аварій є важливою складовою екологічного моніторингу та управління ризиками.

### **3.4. Вплив техногенних аварій на біоту та екосистеми**

Техногенні аварії можуть суттєво впливати не лише на окремі компоненти довкілля - атмосферне повітря, води чи ґрунти, - а й на живі організми та природні екосистеми загалом. Біота, тобто сукупність рослин, тварин, мікроорганізмів і грибів певної території, є чутливою до змін умов

середовища. Тому аварійне забруднення, пожежі, вибухи, розливи нафтопродуктів, викиди токсичних речовин або радіоактивне забруднення можуть призводити до порушення природної рівноваги та деградації екосистем.

Одним із основних наслідків техногенних аварій є порушення природних угруповань. Природне угруповання формується внаслідок тривалої взаємодії рослин, тварин, мікроорганізмів і факторів середовища. Коли в екосистемі раптово потрапляють токсичні речовини або змінюються фізико-хімічні умови середовища, порушуються зв'язки між організмами. Наприклад, забруднення ґрунту може вплинути на мікроорганізми, які беруть участь у розкладанні органічної речовини, а це, своєю чергою, впливає на живлення рослин і стан тварин, які залежать від рослинності.

У водних екосистемах аварійне забруднення може змінювати видовий склад планктону, риб, моллюсків, ракоподібних та інших гідробіонтів. У наземних екосистемах порушення природних угруповань проявляється через пригнічення рослинності, зменшення чисельності комах, птахів, дрібних ссавців і ґрунтових організмів. Такі зміни можуть бути непомітними на початковому етапі, однак із часом вони призводять до зниження стійкості всієї екосистеми.

Важливим наслідком техногенних аварій є загибель або міграція тварин. Тварини можуть зазнавати впливу токсичних речовин через забруднене повітря, воду, ґрунт або кормову базу. У разі різкого погіршення умов існування частина тварин залишає територію аварійного впливу, переміщуючись у безпечніші місця. Така міграція може порушувати природну структуру популяцій, змінювати співвідношення видів і створювати додаткове навантаження на сусідні екосистеми.

Особливо чутливими до техногенного забруднення є водні організми, земноводні, дрібні ссавці, комахи-запилювачі та птахи, які залежать від стану водойм, рослинності й кормової бази. Наприклад, забруднення водойми нафтопродуктами або хімічними речовинами може призвести до зменшення

чисельності риб і безхребетних, а це впливає на птахів та інших тварин, які ними живляться.

Техногенні аварії також спричиняють пошкодження рослинного покриву. Рослини можуть зазнавати безпосереднього впливу токсичних газів, кислотних опадів, пилу, важких металів, нафтопродуктів, засолення або зміни кислотності ґрунту. Забруднювальні речовини можуть пошкоджувати листову поверхню, пригнічувати фотосинтез, порушувати водний режим і розвиток кореневої системи.

Пошкодження рослинного покриву має важливі екологічні наслідки, оскільки рослини виконують ґрунтозахисну, кліматорегулюючу, водорегулюючу та середовищевісну функції. У разі деградації рослинності посилюються ерозійні процеси, зменшується здатність території до самовідновлення, погіршуються умови існування тварин і мікроорганізмів. На сільськогосподарських землях це може призводити до зниження врожайності та погіршення якості продукції.

Одним із найсерйозніших наслідків техногенних аварій є зменшення біорізноманіття. Біорізноманіття охоплює різноманітність видів, генетичних форм і екосистем. Унаслідок аварійного впливу найбільш чутливі види можуть зникати з території, тоді як більш стійкі або невибагливі види починають переважати. Це призводить до спрощення структури екосистеми й зниження її здатності протистояти подальшим негативним впливам.

Зменшення біорізноманіття є особливо небезпечним для природоохоронних територій, водно-болотних угідь, лісових екосистем, заплав річок і територій із рідкісними або зникаючими видами. Якщо аварія відбувається в межах таких територій або поблизу них, наслідки можуть бути довготривалими й складними для відновлення.

Техногенні аварії можуть також порушувати трофічні ланцюги. Якщо забруднювачі накопичуються в рослинах, ґрунтових організмах або водних мешканцях, вони можуть передаватися далі - до травоядних, хижаків і людини. Особливо небезпечними є речовини, здатні до біоаккумуляції, зокрема важкі

метали, стійкі органічні забруднювачі та деякі токсичні сполуки. Такі речовини можуть тривалий час зберігатися в екосистемі й впливати на її стан навіть після припинення аварійного надходження забруднювача.

Важливою особливістю впливу техногенних аварій є довготривале відновлення екосистем. На відміну від технічних об'єктів, які можна відремонтувати або замінити, природні екосистеми відновлюються поступово. Швидкість відновлення залежить від типу екосистеми, масштабу забруднення, виду забруднювальних речовин, кліматичних умов, здатності території до самоочищення та наявності заходів рекультивації.

Наприклад, трав'яна рослинність може частково відновитися протягом кількох сезонів, якщо забруднення було незначним. Натомість лісові, болотні або водні екосистеми можуть потребувати значно більше часу. Якщо ґрунти забруднені важкими металами, радіонуклідами або стійкими органічними речовинами, процес природного відновлення може тривати десятиліттями й потребувати активного втручання людини. Для зменшення негативного впливу техногенних аварій на біоту та екосистеми важливими є своєчасна локалізація забруднення, проведення екологічного моніторингу, очищення забруднених територій, рекультивація ґрунтів, відновлення рослинного покриву, контроль якості води та обмеження господарського використання небезпечних ділянок. Особливу увагу слід приділяти територіям із високою природоохоронною цінністю та місцям проживання рідкісних видів.

Техногенні аварії можуть спричиняти значні порушення біоти та екосистем. Їхніми наслідками є порушення природних угруповань, загибель або міграція тварин, пошкодження рослинного покриву, зменшення біорізноманіття, порушення трофічних ланцюгів і тривале відновлення природних систем. Саме тому оцінка впливу техногенних аварій на живу природу є важливою складовою екологічного аналізу та планування заходів із мінімізації ризиків.

### **3.5. Вплив техногенних аварій на населення**

Техногенні аварії становлять небезпеку не лише для природного середовища, а й безпосередньо для населення, яке проживає або працює в зоні їхнього впливу. Наслідки таких аварій можуть проявлятися у погіршенні стану здоров'я людей, порушенні нормальних умов життя, необхідності евакуації, втраті майна, економічних збитках і тривалому психологічному напруженні. Особливо небезпечними є аварії, що супроводжуються викидом токсичних речовин, пожежами, вибухами, радіаційним забрудненням, забрудненням питної води або руйнуванням об'єктів життєзабезпечення.

Одним із важливих наслідків техногенних аварій є погіршення якості життя населення. Воно може проявлятися через забруднення повітря, води й ґрунтів, появу неприємних запахів, задимлення територій, шум, обмеження доступу до окремих ділянок, порушення транспортного сполучення, перебої з водо-, тепло-, газо- чи електропостачанням. У разі аварій на промислових або комунальних об'єктах люди можуть тимчасово втрачати можливість користуватися звичними побутовими послугами, відвідувати роботу, навчальні заклади або медичні установи.

Якість життя також знижується внаслідок обмеження використання природних ресурсів. Наприклад, після забруднення водою може бути заборонено купання, рибальство або використання води для господарських потреб. У разі забруднення ґрунтів може обмежуватися вирощування сільськогосподарської продукції, випасання худоби або використання присадибних ділянок. Такі обмеження особливо відчутні для сільських громад, де населення значною мірою залежить від місцевих природних ресурсів. Найбільш безпосереднім наслідком техногенних аварій є ризики для здоров'я населення. Люди можуть зазнавати впливу небезпечних речовин через вдихання забрудненого повітря, споживання забрудненої води чи харчових продуктів, контакт із забрудненим ґрунтом, пилом або поверхнями. Характер впливу залежить від виду забруднювача, його концентрації, тривалості контакту, шляху надходження в організм, віку людини, стану її здоров'я та наявності засобів захисту. Під час аварій із викидом токсичних

газів або продуктів горіння найчастіше виникають ризики для органів дихання. Люди можуть відчувати подразнення слизових оболонок, кашель, задуху, головний біль, слабкість, погіршення самопочуття. Особливо вразливими є діти, люди похилого віку, вагітні жінки, особи з хронічними захворюваннями дихальної та серцево-судинної систем. У разі забруднення питної води виникають ризики отруєнь, інфекційних захворювань або тривалого надходження токсичних речовин в організм.

Довготривалі ризики для здоров'я можуть бути пов'язані з накопиченням забруднювальних речовин у довкіллі та харчових ланцюгах. Наприклад, важкі метали, стійкі органічні забруднювачі або радіонукліди можуть накопичуватися у ґрунтах, рослинах, водних організмах і продуктах харчування. У такому випадку небезпека для населення зберігається навіть після ліквідації безпосередніх наслідків аварії.

У разі значної загрози для життя і здоров'я людей може виникати необхідність евакуації населення. Евакуація проводиться тоді, коли перебування людей у зоні аварії є небезпечним через токсичне забруднення, пожежу, вибухонебезпечну ситуацію, радіаційний вплив, затоплення або руйнування будівель і споруд. Вона може бути короткостроковою, коли населення повертається після локалізації аварії, або тривалою, якщо територія залишається небезпечною для проживання.

Евакуація є складним організаційним процесом, який потребує інформування населення, визначення безпечних маршрутів, забезпечення транспорту, тимчасового розміщення людей, медичної допомоги, харчування, водопостачання та соціальної підтримки. Особливої уваги потребують маломобільні групи населення: люди похилого віку, особи з інвалідністю, діти, хворі та ті, хто потребує постійного догляду.

Техногенні аварії мають також значні соціально-економічні наслідки. Вони можуть призводити до руйнування або пошкодження житла, виробничих об'єктів, доріг, інженерних мереж, систем водопостачання, електропостачання й газопостачання. Унаслідок аварій підприємства можуть тимчасово

припиняти роботу, працівники - втрачати дохід, а місцеві громади - зазнавати фінансових витрат на ліквідацію наслідків, відновлення інфраструктури та проведення екологічного моніторингу.

Економічні збитки можуть бути прямими й непрямими. До прямих належать витрати на ремонт, очищення забруднених територій, медичну допомогу, евакуацію, компенсації постраждалим, відновлення водопостачання або електромереж. До непрямих - зниження інвестиційної привабливості території, падіння вартості нерухомості, втрата робочих місць, зменшення туристичної привабливості, погіршення умов ведення сільського господарства та тривале обмеження використання природних ресурсів. Окрему увагу слід приділяти психологічному впливу аварійних ситуацій. Техногенна аварія часто сприймається населенням як раптова й неконтрольована загроза. Люди можуть відчувати страх, тривогу, невизначеність, недовіру до офіційної інформації, переживання за власне здоров'я, дітей, майно та майбутнє. Якщо аварія супроводжується евакуацією, втратою житла або тривалими обмеженнями, психологічне напруження може зберігатися протягом тривалого часу. Психологічні наслідки посилюються тоді, коли населення не отримує своєчасної, зрозумілої та достовірної інформації про характер аварії, рівень небезпеки й правила поведінки. У таких умовах можуть поширюватися чутки, паніка або недовіра до органів управління. Тому ефективна комунікація з населенням є важливою складовою реагування на техногенні аварії.

Для зменшення негативного впливу техногенних аварій на населення необхідно забезпечувати завчасне планування заходів безпеки, створення систем оповіщення, підготовку маршрутів евакуації, проведення навчань, інформування громадян про правила поведінки, контроль якості повітря, води й харчових продуктів, а також надання медичної, соціальної та психологічної допомоги постраждалим.

Техногенні аварії можуть суттєво впливати на населення через погіршення якості життя, виникнення ризиків для здоров'я, необхідність

евакуації, соціально-економічні втрати та психологічне напруження. Масштаб такого впливу залежить від типу аварії, виду забруднювальних речовин, щільності населення, готовності служб реагування та ефективності інформування громадян. Саме тому оцінка впливу техногенних аварій на населення є важливою складовою комплексного аналізу екологічних ризиків.

## **РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА ОЦІНКА РИЗИКІВ ТЕХНОГЕННОЇ АВАРІЇ НА ПРИКЛАДІ ОБРАНОГО ОБ'ЄКТА**

### **4.1. Загальна характеристика об'єкта дослідження**

Об'єктом практичного дослідження обрано стаціонарну автозаправну станцію (АЗС) традиційного типу, розташовану на околиці міста Івано-Франківськ у межах техногенно навантаженої території Прикарпаття. АЗС належить до об'єктів підвищеної небезпеки (ОПН), оскільки на ній одночасно обертаються значні обсяги легкозаймистих (ЛЗР) та горючих рідин (ГР), що за певних умов здатні утворювати вибухо- та пожежонебезпечні паро-повітряні суміші.

Технологічна схема АЗС включає підземні резервуари зберігання, паливороздавальні колонки (ПРК), зливний майданчик для приймання палива з автоцистерни (АЦ), технологічні трубопроводи та операторську. Основні характеристики об'єкта, прийняті для розрахунку, наведено в таблиці 4.1. Значення відповідають типовій АЗС і за виконання розділу мають бути замінені на паспортні дані конкретного об'єкта.

Таблиця 4.1 Вихідні дані об'єкта дослідження

| Параметр                        | Позначення      | Значення | Одиниця           |
|---------------------------------|-----------------|----------|-------------------|
| Резервуар бензину А-95          | $V_1$           | 50       | м <sup>3</sup>    |
| Резервуар дизельного палива     | $V_2$           | 25       | м <sup>3</sup>    |
| Кількість ПРК                   | $n$             | 4        | шт.               |
| Місткість автоцистерни (відсік) | $V_{\text{АЦ}}$ | 5        | м <sup>3</sup>    |
| Густина бензину                 | $\rho$          | 750      | кг/м <sup>3</sup> |
| Нижча теплота згоряння бензину  | $Q_{\text{сг}}$ | 43 600   | кДж/кг            |

|                                             |                  |      |                        |
|---------------------------------------------|------------------|------|------------------------|
| Температура спалаху бензину                 | t <sub>сп</sub>  | –36  | °C                     |
| Питома масова швидкість вигорання           | m''              | 0,06 | кг/(м <sup>2</sup> ·с) |
| Нижня концентраційна межа поширення полум'я | C <sub>нкм</sub> | 1,1  | % об.                  |
| Молярна маса парів бензину                  | M                | 95   | кг/кмоль               |

Найбільш небезпечною з погляду масштабу наслідків є аварія, пов'язана з розгерметизацією та витокм бензину марки А-95 як найбільш легкої та пожежонебезпечної речовини, тому подальші розрахунки виконано саме для бензину (консервативний підхід). Ситуаційне розташування об'єкта визначає коло реципієнтів потенційного впливу. Відстані від зливного майданчика (як найбільш імовірного джерела аварії) до прилеглих об'єктів наведено в таблиці 4.2

Таблиця 4.2. Об'єкти в зоні потенційного впливу АЗС

| Об'єкт-реципієнт                         | Відстань, м |
|------------------------------------------|-------------|
| Автодорога з інтенсивним рухом           | 25          |
| Зупинка громадського транспорту          | 35          |
| Лінія електропередач (0,4 кВ)            | 40          |
| Сусіднє СТО                              | 48          |
| Найближчий житловий будинок (5 поверхів) | 62          |
| Дренажний рів / водойма                  | 120         |

Рівень залягання ґрунтових вод на ділянці становить 3,5 м, ґрунти - супіщані, що зумовлює підвищену вразливість підземних вод до забруднення нафтопродуктами.

#### 4.2. Ідентифікація небезпек та формування сценаріїв аварії

Ідентифікацію небезпек виконано методом аналізу «що-якщо» (What-If) у поєднанні з аналізом дерева подій (Event Tree Analysis, ETA). Як ініціувальну подію (ІП) прийнято розгерметизацію зливного рукава або з'єднання під час

зливання бензину з автоцистерни у підземний резервуар, що призводить до проливу палива на зливний майданчик.

Залежно від наявності та моменту появи джерела запалювання можливі такі сценарії розвитку аварії:

C1-пожежа протоки (pool fire): негайне запалювання розлитого бензину з формуванням стійкого дифузійного полум'я та тепловим ураженням людей і обладнання;

C2 - вибухова дефлаграція паро-повітряної хмари (UVCE): відкладене запалювання хмари парів, що сформувалася над дзеркалом протоки, з ударно-хвильовим ураженням;

C3 - флеш-пожежа (flash fire): швидке згоряння паро-повітряної хмари без формування значної надлишкової тиску, з ураженням людей у межах зони, обмеженої НКМП;

C4 - безпечне розсіювання парів за відсутності джерела запалювання (аварія без уражувальних чинників).

Оцінку ризику виконано відповідно до підходів, закладених у «Методиці визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки» та ДСТУ EN ISO 18278-1:2022 (методи розрахунку уражувальних чинників).

Індивідуальний ризик у заданій точці визначається як сума добутків частот реалізації сценаріїв на умовну ймовірність загибелі людини від відповідного уражувального чинника:

$$R_{ind} = \sum \lambda_i \cdot P_{уб,i} \quad (4.1)$$

де  $\lambda_i$  - частота реалізації  $i$ -го сценарію, 1/рік;  $P_{уб,i}$  - умовна ймовірність загибелі людини в цій точці за  $i$ -м сценарієм.

Колективний (соціальний) ризик оцінюється як математичне сподівання кількості загиблих за рік:

$$R_{кол} = \sum \lambda_i \cdot N_i \quad (4.2)$$

де  $N_i$  - очікувана кількість загиблих за  $i$ -м сценарієм, осіб.

Прийнятні рівні ризику (відповідно до чинної методики): для населення гранично допустимий індивідуальний (територіальний) ризик становить  $10^{-5}$  1/рік, прийнятний -  $10^{-6}$  1/рік; для персоналу - відповідно  $10^{-4}$  та  $10^{-5}$  1/рік. Частоту ініціувальної події (значний пролив бензину при зливних операціях) прийнято на рівні  $\lambda_0 = 2,5 \cdot 10^{-2}$  1/рік на підставі статистики відмов зливно-наливного обладнання. Розгалуження дерева подій виконано з урахуванням ймовірності запалювання  $P_{\text{зап}} = 0,1$  та подальшого розподілу на негайне/відкладене запалювання. Результати наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.3 Дерево подій та частоти сценаріїв

| Сценарій                | Логіка розрахунку                                 | Частота $\lambda_i$ , 1/рік |
|-------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|
| С1 пожежа протоки       | $2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 \cdot 0,6$           | $1,5 \cdot 10^{-3}$         |
| С2 вибух хмари          | $2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 \cdot 0,4 \cdot 0,4$ | $4,0 \cdot 10^{-4}$         |
| С3 флеш-пожежа          | $2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,1 \cdot 0,4 \cdot 0,6$ | $6,0 \cdot 10^{-4}$         |
| С4 безпечне розсіювання | $2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,9$                     | $2,25 \cdot 10^{-2}$        |

За консервативного припущення в зону зливного майданчика, обмежену бортиком, виливається один відсік автоцистерни ( $V = 5 \text{ м}^3$ ). За питомої площі розтікання по твердому покриттю площа протоки прийнята  $F = 100 \text{ м}^2$ . Еквівалентний діаметр протоки:

$$D = \sqrt[4]{(4F/\pi)} = \sqrt[4]{(4 \cdot 100 / 3,14)} = 11,3 \text{ м} \quad (4.3)$$

Висота полум'я визначена за формулою Томаса:

$$L = 42 \cdot D \cdot [m'' / (\rho_{\text{нов}} \cdot \sqrt{(g \cdot D)})]^{0,61} \quad (4.4)$$

Підставляючи  $D = 11,3 \text{ м}$ ;  $m'' = 0,06 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $\rho_{\text{нов}} = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ :  
 $L = 42 \cdot 11,3 \cdot [0,06 / (1,2 \cdot \sqrt{(9,81 \cdot 11,3)})]^{0,61} \approx 18,2 \text{ м}$

Інтенсивність теплового випромінювання визначено за моделлю суцільного полум'я:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau \quad (4.5)$$

де  $E_f$  – середньоповерхнева щільність випромінювання полум'я (для бензину прийнято  $50 \text{ кВт/м}^2$ );  $F_q$  - кутовий коефіцієнт опромінення (розрахований за ДСТУ EN ISO 18278-1:2022);  $\tau$  - коефіцієнт пропускання атмосфери.

Результати розрахунку відстаней до граничних значень теплового потоку наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.4 Зони теплового ураження (сценарій С1)

| Тепловий потік $q$ ,<br>$\text{кВт/м}^2$ | Характер ураження                    | Відстань від<br>центру протоки, м | $P_{уб}$    |
|------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| $\geq 10,5$                              | летальний поріг, займання матеріалів | $\leq 12$                         | 0,9         |
| 4,2 – 10,5                               | опіки, больовий поріг                | 12 – 22                           | 0,3         |
| 1,4 – 4,2                                | дискомфорт, опіки за тривалої дії    | 22 – 38                           | 0,05        |
| $< 1,4$                                  | безпечно                             | $> 38$                            | $\approx 0$ |

Масу парів бензину в хмарі визначено за інтенсивністю випаровування з дзеркала протоки. За інтенсивності  $W \approx 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2)$ , площі  $F = 100 \text{ м}^2$  та часу до запалювання  $\tau = 300 \text{ с}$ :

$$m_n = W \cdot F \cdot \tau = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 300 \approx 40 \text{ кг} \quad (4.6)$$

Приведену масу тротилового еквіваленту обчислено за формулою:

$$m_{прив} = (Q_{сг} / Q_{ТНТ}) \cdot z \cdot m_n \quad (4.7)$$

$$\text{де } Q_{ТНТ} = 4520 \text{ кДж/кг}; z = 0,1$$

частка участі парів у вибуху для неорганізованої хмари у відкритому просторі:

$$m_{прив} = (43\,600 / 4520) \cdot 0,1 \cdot 40 \approx 38,6 \text{ кг ТНТ}$$

Надлишковий тиск ударної хвилі на відстані  $R$  обчислено за формулою:

$$\Delta P = P_0 \cdot [ 0,8 \cdot m_{прив}^{0,33} / R + 3 \cdot m_{прив}^{0,66} / R^2 + 5 \cdot m_{прив} / R^3 ] \quad (4.8)$$

де  $P_0 = 101 \text{ кПа}$ . Результати розрахунку наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 Розрахунок надлишкового тиску (сценарій С2)

| Відстань $R$ , м | 10 | 15 | 20 | 30 | 50 |
|------------------|----|----|----|----|----|
|------------------|----|----|----|----|----|

|                  |      |      |      |      |     |
|------------------|------|------|------|------|-----|
| $\Delta P$ , кПа | 80,3 | 38,8 | 24,4 | 13,5 | 6,9 |
|------------------|------|------|------|------|-----|

На основі граничних значень  $\Delta P$  визначено зони ураження (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6 Зони ураження ударною хвилею (сценарій С2)

| Надлишковий тиск $\Delta P$ , кПа | Характер ураження                     | Відстань, м | $P_{уб}$    |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|
| $\geq 53$                         | повне руйнування, смертельне ураження | $\leq 13$   | 0,9         |
| 28 – 53                           | сильні руйнування                     | 13 – 19     | 0,5         |
| 12 – 28                           | середні ушкодження, травми            | 19 – 33     | 0,1         |
| 5 – 12                            | розбиття скла, легкі травми           | 33 – 60     | 0,02        |
| $< 5$                             | без значних ушкоджень                 | $> 60$      | $\approx 0$ |

Для флеш-пожежі уражувальним чинником є короточасний вплив полум'я в межах хмари, обмеженої НКМП. У межах цієї зони (радіус  $\approx 15$  м від дзеркала протоки) умовна ймовірність загибелі прийнята  $P_{уб} = 0,8$ ; за її межами ураження відсутнє.

Потенційний територіальний ризик у заданій точці обчислено за формулою (4.1) як суму внесків усіх сценаріїв з урахуванням значень  $P_{уб}$  з таблиць 4.3, 4.5 та даних сценарію С3. Результати розрахунку для характерних відстаней наведено в таблиці 4.7

Таблиця 4.7. Потенційний територіальний ризик за відстанню

| Відстань d, м | Внесок С1           | Внесок С2           | Внесок С3           | $R(d)$ , 1/рік       |
|---------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| 15            | $4,5 \cdot 10^{-4}$ | $2,0 \cdot 10^{-4}$ | $4,8 \cdot 10^{-4}$ | $1,13 \cdot 10^{-3}$ |
| 25            | $7,5 \cdot 10^{-5}$ | $4,0 \cdot 10^{-5}$ | $\approx 0$         | $1,15 \cdot 10^{-4}$ |
| 40            | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | $8,0 \cdot 10^{-6}$ | $\approx 0$         | $2,3 \cdot 10^{-5}$  |
| 60            | $\approx 0$         | $2,0 \cdot 10^{-6}$ | $\approx 0$         | $2,0 \cdot 10^{-6}$  |
| 80            | $\approx 0$         | $4,0 \cdot 10^{-7}$ | $\approx 0$         | $4,0 \cdot 10^{-7}$  |

З таблиці 4.7 видно, що потенційний територіальний ризик знижується до прийнятного для населення рівня  $10^{-6}$  1/рік на відстані приблизно 70–80 м від зливного майданчика. Якщо найближча житлова забудова розташована на відстані 60 м, ризик становить  $\approx 2,0 \cdot 10^{-6}$  1/рік, що перевищує прийнятний рівень і потребує впровадження компенсаційних заходів, проте залишається нижчим за гранично допустимий рівень  $10^{-5}$  1/рік.

Робоче місце оператора розташоване на відстані  $\approx 20$  м від зони можливого проливу. З урахуванням потенційного ризику в цій точці  $R(20) \approx 3,6 \cdot 10^{-4}$  1/рік та коефіцієнта присутності оператора в небезпечній зоні  $\phi \approx 0,25$ :

$$R_{\text{ind(oper)}} = R(20) \cdot \phi = 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,25 \approx 9,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/рік} \quad (4.9)$$

Отримане значення близьке до гранично допустимого рівня  $10^{-4}$  1/рік і перевищує прийнятний рівень  $10^{-5}$  1/рік, тобто перебуває в зоні умовно прийнятного ризику, що вимагає організаційно-технічних заходів зниження.

Очікувану кількість загиблих за сценаріями оцінено з урахуванням типового заповнення території АЗС (оператор, клієнти, відвідувачі). Колективний ризик за формулою (4.2):

$$R_{\text{кол}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 + 4,0 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 + 6,0 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 \approx 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ загиблих/рік}$$

Точки соціального ризику ( $F$  - частота аварій із загибеллю не менше  $N$  осіб) наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8. Дані для побудови F–N-кривої

| N, осіб  | F ( $N \geq N_i$ ), 1/рік |
|----------|---------------------------|
| $\geq 1$ | $2,5 \cdot 10^{-3}$       |
| $\geq 2$ | $1,0 \cdot 10^{-3}$       |
| $\geq 3$ | $4,0 \cdot 10^{-4}$       |

Порівняння отриманої F–N-кривої з межами прийнятності показує, що соціальний ризик об'єкта перебуває переважно в перехідній (ALARP) області, де ризик визнається прийнятним лише за умови його зниження до практично досяжного мінімуму.

Узагальнені результати кількісної оцінки ризику наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.9 Зведені результати оцінки ризику

| Показник                           | Отримане значення                | Прийнятний рівень         | Оцінка           |
|------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------|
| Тер. ризик на межі забудови (60 м) | $2,0 \cdot 10^{-6}$ 1/рік        | $1,0 \cdot 10^{-6}$ 1/рік | перевищує, ALARP |
| Індивідуальний ризик оператора     | $9,0 \cdot 10^{-5}$ 1/рік        | $1,0 \cdot 10^{-5}$ 1/рік | потребує заходів |
| Колективний ризик                  | $3,4 \cdot 10^{-3}$ загиблих/рік | -                         | помірний         |

Зважаючи на отримані результати, для зниження рівня ризику запропоновано комплекс заходів: технічні: обладнання зливного майданчика герметичними швидкокороз'ємними муфтами із системою відсікання, влаштування непроникного покриття з бортиком та локальною зливовою каналізацією з нафтовловлювачем, монтаж системи газосигналізації та автоматичного пінного пожежогасіння; організаційні: регламентація зливних операцій під наглядом оператора, заборона роботи двигуна АЦ під час зливу, періодичний контроль герметичності з'єднань, навчання персоналу діям в аварійних ситуаціях; планувальні: дотримання нормативних протипожежних розривів до житлової забудови (не менше 70–80 м згідно з розрахунком), що забезпечує зниження територіального ризику до прийнятного рівня  $10^{-6}$  1/рік.

На основі ідентифікації небезпек об'єкта визначено перелік можливих сценаріїв розвитку аварійної ситуації. Сценарії класифіковано за характером уражувального чинника (тепловий, ударно-хвильовий, хімічний) та середовищем впливу (атмосфера, ґрунт, водні об'єкти). Базовою (ініціувальною) подією для більшості сценаріїв є розлив нафтопродуктів, який залежно від подальших умов розвивається у пожежно-вибухонебезпечному або еколого-геохімічному напрямі.

Можливі сценарії аварійної ситуації на АЗС: розлив нафтопродуктів - витік палива внаслідок розгерметизації резервуара, паливороздавальної

колонки чи зливного рукава, переповнення ємності, корозії обладнання або ДТП за участю автоцистерни; є базовою подією, що ініціює подальші сценарії; пожежа - займання розлитого палива за наявності джерела запалювання з формуванням пожежі протоки та тепловим ураженням людей, обладнання й сусідніх об'єктів; вибух - утворення та запалювання паро-повітряної суміші (хмари парів бензину) з виникненням ударної хвилі та руйнуванням будівель і споруд; витік небезпечної речовини - неконтрольоване надходження парів ЛЗР в атмосферу та рідкого палива у довкілля, що створює одночасно пожежну й токсикологічну небезпеку;

- потрапляння забруднювачів у водойму -міграція нафтопродуктів зливовою каналізацією або через ґрунтові води до найближчого водного об'єкта з забрудненням поверхневих вод;

- забруднення ґрунту в межах промислового майданчика -інфільтрація та акумуляція нафтопродуктів і важких металів у ґрунтовому профілі з тривалим погіршенням якості земель.

Логічний зв'язок між сценаріями наведено в таблиці 4.3а: розлив за наявності джерела запалювання реалізується як пожежа або вибух, а за його відсутності - як забруднення ґрунту з подальшою міграцією до водойми.

Таблиця 4.10 Класифікація сценаріїв аварійної ситуації

| Сценарій                   | Ініціювальна причина                   | Уражувальний чинник | Реципієнт впливу            |
|----------------------------|----------------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Розлив нафтопродуктів      | розгерметизація, переповнення, ДТП АЦ  | хімічний            | майданчик, персонал         |
| Пожежа                     | запалювання протоки                    | тепловий потік      | люди, обладнання, забудова  |
| Вибух                      | запалювання паро-повітряної хмари      | ударна хвиля        | будівлі, люди               |
| Витік небезпечної речовини | випаровування, протока                 | хімічний, пожежний  | атмосфера, персонал         |
| Забруднення водойми        | міграція з ґрунтовими/зливовими водами | хімічний            | поверхневі води, гідробіоти |

|                    |                     |          |                      |
|--------------------|---------------------|----------|----------------------|
| Забруднення ґрунту | інфільтрація палива | хімічний | ґрунт, підземні води |
|--------------------|---------------------|----------|----------------------|

Дерево подій показує, як ініціаційна подія (розлив бензину) розгалужується на сценарії залежно від наявності та моменту запалювання, із зазначенням розрахункових частот.

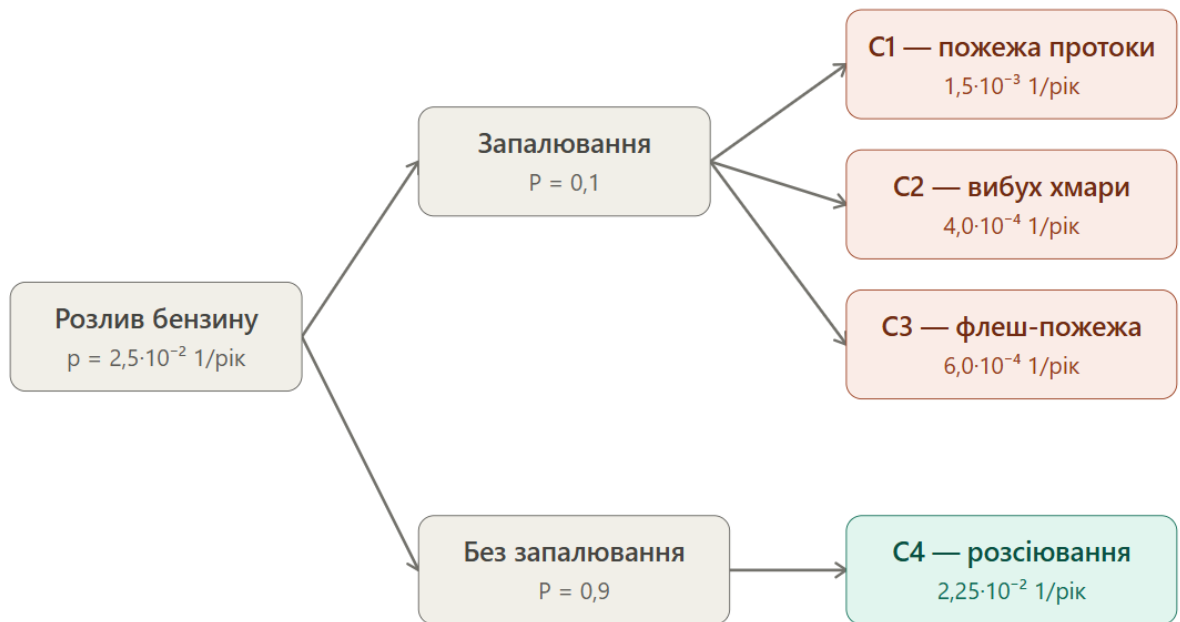


Рис. 4.1. Дерево подій

Залежність надлишкового тиску ударної хвилі від відстані (сценарій C2). Крива показує швидке спадання тиску; горизонтальні рівні порогам руйнувань.

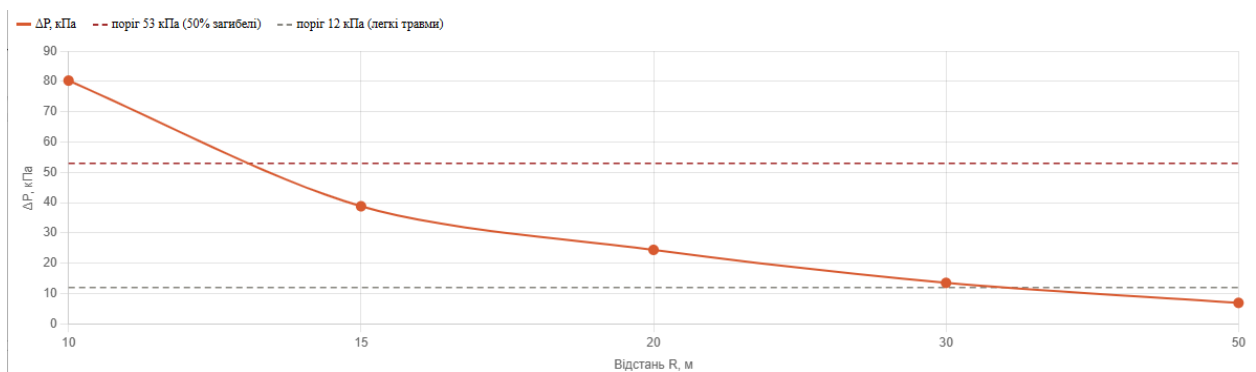


Рис. 4.2 ΔP від відстані

Потенційний територіальний ризик залежно від розташування (логарифмічна шкала). Точка перетину з пунктирною лінією прийнятого рівня  $10^{-6}$  1/рік встановлено мінімально допустиму відстань до забудови.

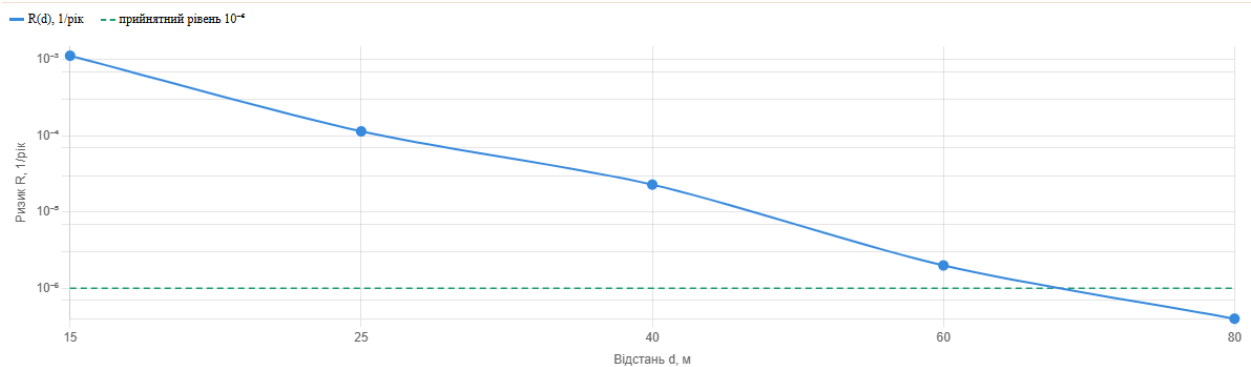


Рис. 4.3. Територіальний ризик від відстані

F–N крива соціального ризику - залежність частоти аварій від кількості загиблих (підвійна логарифмічна шкала). Чим нижче й лівіше крива, тим прийнятним є рівень соціального ризику.

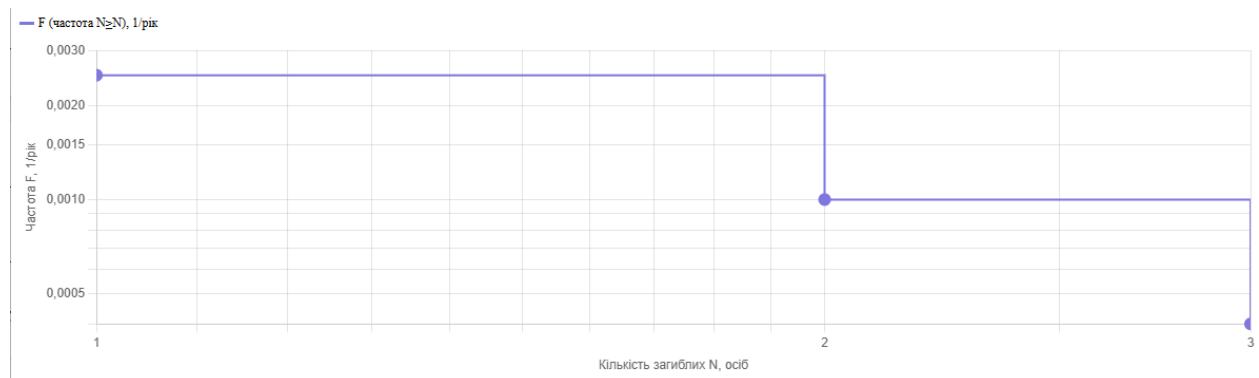


Рис. 4.4. F–N крива

Порівняння показників ризику до та після впровадження захисних заходів (логарифмічна шкала). Заходи знижують територіальний ризик на 5 разів, а індивідуальний ризик оператора - більше ніж на порядок.

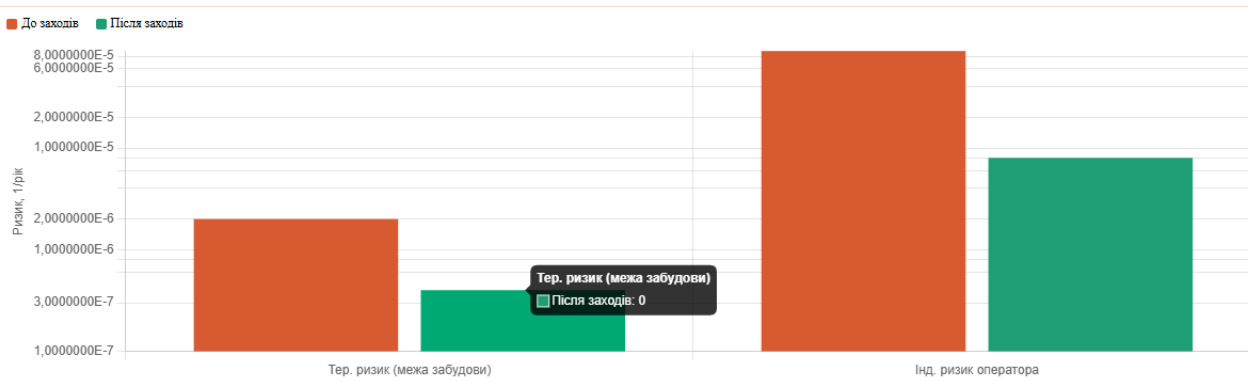


Рис. 4.5. Ризик «до/після»

Схема зон утворення тепловим випромінюванням при пожежі протоки (сценарій С1) з нанесенням відстань до житлової забудови. Видно, що будинок (62 м) розташований поза межами всіх зон теплового утворення.

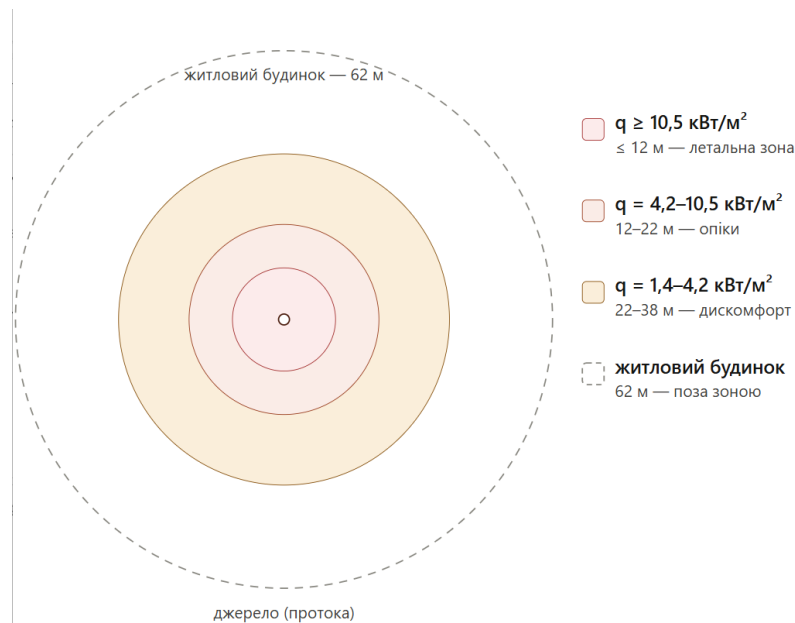


Рис. 4.6. Схема зон уражень

Екологічний ризик визначається як міра очікуваних несприятливих наслідків для довкілля та обчислюється як добуток імовірності реалізації аварійного сценарію на масштаб (тяжкість) його екологічних наслідків:

$$R_{\text{екол}} = p \cdot Y \quad (4.13)$$

де  $p$  - імовірність (частота) реалізації сценарію, 1/рік;  $Y$  - очікувані екологічні збитки, грн (або умовні одиниці тяжкості).

Оцінку виконано у два етапи: якісне ранжування ризику за матрицею «ймовірність - тяжкість наслідків» та кількісний розрахунок математичного сподівання екологічних збитків (практична частина).

Вихідні дані наведено в таблиці 4.11

Таблиця 4.11. Вихідні дані для розрахунку

| Параметр                      | Позначення         | Значення             | Одиниця |
|-------------------------------|--------------------|----------------------|---------|
| Об'єм розливу                 | V_прол             | 5                    | м³      |
| Густина бензину               | $\rho$             | 750                  | кг/м³   |
| Площа плями забруднення       | S                  | 100                  | м²      |
| Нафтоємність ґрунту (супісок) | k                  | 12                   | л/м³    |
| Густина ґрунту                | $\rho_{\text{гр}}$ | 1600                 | кг/м³   |
| Рівень ґрунтових вод          | H_гв               | 3,5                  | м       |
| Імовірність сценарію розливу  | p                  | $2,25 \cdot 10^{-2}$ | 1/рік   |
| Питомі збитки (ґрунт)         | C_гр               | 60                   | грн/кг  |
| Частка міграції у воду        | $\alpha$           | 0,05                 | -       |
| Питомі збитки (вода)          | C_в                | 1000                 | грн/кг  |
| ГДК нафтопродуктів у воді     | ГДК_в              | 0,3                  | мг/дм³  |

*Крок 1. Маса розлитого палива:*

$$m = \rho \cdot V_{\text{прол}} = 750 \cdot 5 = 3750 \text{ кг}$$

*Крок 2. Об'єм та глибина забрудненого ґрунту:*

$$V_{\text{гр}} = V_{\text{прол}} / k \cdot 10^3 = 5000 / 12 \approx 417 \text{ м}^3$$

$$h = V_{\text{гр}} / S = 417 / 100 \approx 4,2 \text{ м}$$

Оскільки  $h = 4,2 \text{ м} > H_{\text{гв}} = 3,5 \text{ м}$ , забруднення досягає водоносного горизонту - тяжкість наслідків оцінюється як значна.

*Крок 3. Маса забрудненого ґрунту:*

$$M_{\text{гр}} = V_{\text{гр}} \cdot \rho_{\text{гр}} = 417 \cdot 1600 \approx 667\,200 \text{ кг} \approx 667 \text{ т}$$

*Крок 4. Збитки від забруднення ґрунту:*

$$З_{\text{гр}} = m \cdot C_{\text{гр}} = 3750 \cdot 60 = 225\,000 \text{ грн}$$

Крок 5. Збитки від забруднення підземних вод. Маса нафтопродуктів, що мігрує у води:

$$m_{\text{в}} = \alpha \cdot m = 0,05 \cdot 3750 = 187,5 \text{ кг}$$

Обсяг води, забрудненої понад ГДК:

$$V_{\text{в}} = m_{\text{в}} / \text{ГДК}_{\text{в}} = 187,5 \cdot 10^6 \text{ мг} / 0,3 \text{ мг/дм}^3 \approx 6,25 \cdot 10^8 \text{ дм}^3 = 625 \text{ 000 м}^3$$

Збитки від забруднення вод:

$$З_{\text{в}} = m_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} = 187,5 \cdot 1000 = 187 \text{ 500 грн}$$

Крок 6. Сумарні екологічні збитки та екологічний ризик:

$$Y = З_{\text{гр}} + З_{\text{в}} = 225 \text{ 000} + 187 \text{ 500} = 412 \text{ 500 грн}$$

$$R_{\text{екол}} = p \cdot Y = 2,25 \cdot 10^{-2} \cdot 412 \text{ 500} \approx 9281 \text{ грн/рік} \approx 9,3 \text{ тис. грн/рік}$$

Крок 7. Якісна оцінка та класифікація ризику. За матрицею екологічного ризику (таблиця 4.4б) поєднання високої ймовірності ( $p > 10^{-2}$ ) зі значною тяжкістю наслідків (досягнення ґрунтових вод, забруднення 625 тис. м<sup>3</sup> води понад ГДК) відповідає високому (неприйнятному) рівню екологічного ризику.

Таблиця 4.12 Матриця екологічного ризику

| Ймовірність, 1/рік \ Тяжкість     | Незначна | Помірна  | Значна   | Катастрофічна |
|-----------------------------------|----------|----------|----------|---------------|
| Висока ( $> 10^{-2}$ )            | середній | високий  | високий  | критичний     |
| Середня ( $10^{-4}$ – $10^{-2}$ ) | низький  | середній | високий  | критичний     |
| Низька ( $< 10^{-4}$ )            | низький  | низький  | середній | високий       |

Розрахунком установлено, що розлив 5 м<sup>3</sup> бензину спричиняє забруднення близько 667 т ґрунту з проникненням нафтопродуктів до водоносного горизонту та потенційним забрудненням до  $6,25 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup> підземних вод понад ГДК. Сумарні екологічні збитки сягають 412,5 тис. грн, а екологічний ризик (математичне сподівання збитків) - близько 9,3 тис. грн/рік. Рівень ризику класифіковано як високий (неприйнятний), що обґрунтовує необхідність впровадження природоохоронних заходів - влаштування герметичного покриття зливного майданчика з нафтовловлювачем та системи перехоплення

забруднених стоків, які виключають інфільтрацію палива у ґрунт і знижують екологічний ризик до прийнятного рівня.

Виконано кількісну оцінку ризику техногенної аварії на типовій АЗС за чинною методикою декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. Як найбільш небезпечну ідентифіковано аварію з проливом бензину при зливних операціях із розвитком за трьома сценаріями: пожежа протоки, вибух паро-повітряної хмари та флеш-пожежа.

Розраховано уражувальні чинники: висота полум'я пожежі протоки становить 18,2 м, летальна зона теплового ураження сягає 12 м; при вибуху паро-повітряної хмари ( $m_{\text{прив}} \approx 38,6$  кг ТНТ) зона смертельного ураження ударною хвилею ( $\Delta P \geq 53$  кПа) сягає 13 м, а зона легких ушкоджень - до 60 м. Встановлено, що потенційний територіальний ризик знижується до прийнятного для населення рівня  $10^{-6}$  1/рік на відстані 70–80 м; індивідуальний ризик оператора ( $9,0 \cdot 10^{-5}$  1/рік) близький до гранично допустимого, а соціальний ризик перебуває в перехідній (ALARP) області. Запропоновано комплекс технічних, організаційних та планувальних заходів, реалізація яких дозволяє знизити ризик до практично досяжного мінімуму та забезпечити прийнятний рівень техногенно-екологічної безпеки об'єкта.

## **РОЗДІЛ 5. ЗАХОДИ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ**

### **5.1. Організаційні заходи**

Організаційні заходи щодо зниження ризиків техногенних аварій є важливою складовою системи управління безпекою на підприємстві. Їх основне призначення полягає у забезпеченні належної підготовки персоналу, своєчасному виявленні потенційно небезпечних ситуацій, підтриманні обладнання у справному технічному стані та формуванні чіткого порядку дій у разі виникнення аварійної або надзвичайної ситуації. Саме організаційний рівень управління безпекою значною мірою визначає ефективність запобігання аваріям, оскільки навіть за наявності сучасного обладнання людський фактор, недостатній контроль або відсутність належної координації можуть стати причиною техногенних порушень.

Одним із першочергових напрямів організаційної роботи є проведення інструктажів і навчань персоналу. Працівники повинні бути ознайомлені з правилами безпечного виконання робіт, особливостями експлуатації обладнання, можливими небезпечними факторами виробничого середовища, а також із порядком дій у разі виникнення аварійної ситуації. Регулярне навчання сприяє підвищенню рівня професійної відповідальності працівників, зменшенню ймовірності помилкових дій та формуванню навичок безпечної поведінки. Особливу увагу доцільно приділяти повторним і позаплановим інструктажам, які проводяться у разі зміни технологічного процесу, впровадження нового обладнання, виявлення порушень вимог безпеки або після виникнення аварійних ситуацій.

Важливе значення має розроблення планів реагування на аварії. Такі плани повинні визначати порядок оповіщення персоналу, евакуації працівників, зупинки технологічного процесу, локалізації небезпечного чинника та взаємодії з аварійно-рятувальними службами. Наявність чітко розробленого плану дозволяє уникнути хаотичних дій у критичній ситуації та забезпечує оперативне прийняття рішень. План реагування має періодично

переглядатися й уточнюватися з урахуванням змін у структурі підприємства, технологічному обладнанні, кількості персоналу та характері потенційних небезпек.

Не менш важливим організаційним заходом є регулярний контроль технічного стану обладнання. Систематичні огляди машин, механізмів, трубопроводів, резервуарів, електрообладнання, вентиляційних систем, систем сигналізації та автоматичного захисту дають змогу своєчасно виявляти несправності, зношення деталей, витіки, корозійні пошкодження або інші порушення, які можуть призвести до аварії. Своєчасне технічне обслуговування та ремонт обладнання знижують імовірність його раптової відмови, забезпечують стабільність виробничого процесу та підвищують загальний рівень техногенної безпеки.

Для забезпечення належного контролю за станом безпеки на підприємстві необхідним є ведення журналів огляду та моніторингу. У таких документах фіксуються результати перевірок, проведені інструктажі, виявлені несправності, виконані ремонтні роботи, результати моніторингу параметрів виробничого середовища та заходи, вжиті для усунення порушень. Документування дозволяє простежити динаміку технічного стану обладнання, оцінити ефективність профілактичних заходів і забезпечити відповідальність посадових осіб за дотримання вимог безпеки.

Окрему увагу слід приділяти підготовці персоналу до дій у надзвичайних ситуаціях. Працівники повинні чітко знати порядок дій у разі пожежі, вибуху, витіку небезпечних речовин, аварійної зупинки обладнання або загрози забруднення навколишнього природного середовища. Для цього доцільно проводити практичні тренування, навчальні евакуації, перевірку систем оповіщення та моделювання можливих аварійних ситуацій. Такі заходи сприяють формуванню злагоджених дій персоналу, скорочують час реагування та дозволяють мінімізувати негативні наслідки аварій для людей, довкілля й виробничої інфраструктури.

Отже, організаційні заходи є необхідною умовою ефективного зниження ризиків техногенних аварій. Вони забезпечують системний підхід до управління безпекою, підвищують готовність персоналу до дій у небезпечних ситуаціях, сприяють своєчасному виявленню технічних несправностей і створюють передумови для стабільної та безпечної роботи підприємства.

## **5.2. Природоохоронні заходи**

Природоохоронні заходи щодо зниження ризиків техногенних аварій спрямовані на запобігання забрудненню навколишнього природного середовища, обмеження поширення небезпечних речовин та відновлення порушених компонентів довкілля. У разі виникнення аварійної ситуації першочергового значення набуває локалізація розливів небезпечних речовин, зокрема паливно-мастильних матеріалів, хімічних реагентів або інших забруднювачів. Для цього можуть застосовуватися захисні бар'єри, обвалування, сорбувальні матеріали, тимчасові ємності для збору забруднених рідин та інші технічні засоби, які перешкоджають подальшому поширенню забруднення на прилеглі території, у водні об'єкти або ґрунтове середовище.

Важливим напрямом природоохоронної діяльності є очищення забруднених вод, які можуть утворюватися внаслідок аварійних витоків, потрапляння хімічних речовин у поверхневий стік або порушення роботи очисних споруд. Очищення таких вод повинно здійснюватися із застосуванням механічних, фізико-хімічних, хімічних або біологічних методів залежно від характеру забруднення. Особливу увагу необхідно приділяти недопущенню скидання неочищених або недостатньо очищених стічних вод у поверхневі водойми, оскільки це може спричинити погіршення якості води, негативний вплив на водні екосистеми та створити ризики для здоров'я населення.

У разі забруднення ґрунтового покриву необхідним заходом є рекультивація забруднених ґрунтів. Вона може передбачати вилучення найбільш забрудненого шару ґрунту, його подальше знешкодження або

утилізацію, внесення сорбентів, застосування біопрепаратів, фіторе mediaційних технологій та інших методів відновлення природних властивостей ґрунту. Рекультиваційні заходи мають бути спрямовані не лише на зменшення концентрації забруднювальних речовин, а й на відновлення родючості, структури ґрунту та його біологічної активності.

Одним із важливих профілактичних заходів є створення санітарно-захисних зон навколо потенційно небезпечних об'єктів. Такі зони виконують бар'єрну функцію між джерелом можливого забруднення та житловою забудовою, громадськими територіями, сільськогосподарськими угіддями або природоохоронними об'єктами. Наявність санітарно-захисної зони дозволяє зменшити вплив шкідливих факторів на населення та довкілля, а також забезпечити можливість оперативного реагування у разі виникнення аварійної ситуації.

Необхідною умовою ефективного управління екологічною безпекою є постійний моніторинг атмосферного повітря, поверхневих і підземних вод, а також ґрунтів. Систематичне спостереження за станом основних компонентів довкілля дає змогу своєчасно виявляти перевищення допустимих концентрацій забруднювальних речовин, оцінювати масштаби впливу аварійної ситуації та приймати обґрунтовані управлінські рішення. Для ліквідації наслідків забруднення доцільно використовувати сорбенти та біопрепарати, які дозволяють зменшити концентрацію небезпечних речовин у воді й ґрунті, прискорити процеси природного самоочищення та знизити рівень екологічного ризику.

### **5.3. Система екологічного моніторингу**

Система екологічного моніторингу є важливим елементом забезпечення екологічної безпеки об'єкта, оскільки вона дозволяє здійснювати регулярне спостереження за станом навколишнього природного середовища, виявляти негативні зміни та своєчасно реагувати на потенційні загрози. Основною

метою екологічного моніторингу є отримання достовірної інформації про рівень забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів, ґрунтів і біологічних компонентів довкілля.

Одним із ключових напрямів моніторингу є контроль якості атмосферного повітря. Він передбачає визначення вмісту забруднювальних речовин, які можуть надходити в повітря внаслідок виробничої діяльності або аварійних ситуацій. До таких речовин можуть належати пил, оксиди азоту, оксиди сірки, леткі органічні сполуки, продукти згоряння та інші шкідливі домішки. Регулярний контроль якості повітря дозволяє оцінити рівень впливу об'єкта на повітряне середовище та визначити необхідність упровадження додаткових природоохоронних заходів.

Важливою складовою екологічного моніторингу є контроль стану поверхневих і підземних вод. Такий контроль дає змогу виявити можливе потрапляння забруднювальних речовин у водні об'єкти, оцінити якість води та визначити потенційні ризики для водних екосистем і населення. Особливу увагу слід приділяти показникам хімічного складу води, наявності нафтопродуктів, важких металів, завислих речовин, органічних забруднювачів та зміні фізико-хімічних параметрів.

Відбір проб ґрунтів є необхідним для оцінювання рівня забруднення території об'єкта та прилеглих земель. Аналіз ґрунтових проб дозволяє визначити вміст важких металів, нафтопродуктів, залишків хімічних речовин та інших потенційно небезпечних сполук. Результати такого моніторингу можуть бути використані для планування рекультиваційних робіт, визначення зон підвищеного екологічного ризику та контролю ефективності вже впроваджених природоохоронних заходів.

Окрім фізико-хімічних показників, доцільно здійснювати моніторинг біологічних показників стану довкілля. Біологічні індикатори дають можливість оцінити вплив забруднення на живі організми, стан рослинності, ґрунтової біоти, водних екосистем та загальну екологічну стійкість території. Зміни у видовому складі, чисельності або стані біологічних об'єктів можуть

свідчити про наявність екологічного навантаження навіть у тих випадках, коли окремі хімічні показники не перевищують допустимих нормативів.

Сучасним інструментом підвищення ефективності екологічного моніторингу є використання геоінформаційних систем. ГІС-технології дозволяють здійснювати картування зон ризику, візуалізувати просторове поширення забруднення, аналізувати дані спостережень та прогнозувати можливі наслідки аварійних ситуацій. Застосування таких технологій сприяє більш точному визначенню небезпечних ділянок, оптимізації природоохоронних заходів і підвищенню якості управлінських рішень у сфері екологічної безпеки.

#### **5.4. Рекомендації щодо підвищення екологічної безпеки об'єкта**

Підвищення екологічної безпеки об'єкта потребує комплексного підходу, який поєднує організаційні, технічні, природоохоронні та управлінські заходи. Одним із головних напрямів є впровадження системи управління екологічними ризиками. Така система повинна передбачати ідентифікацію потенційних джерел небезпеки, оцінювання ймовірності виникнення аварійних ситуацій, аналіз можливих наслідків для довкілля та розроблення заходів щодо їх попередження або мінімізації. Наявність системного підходу до управління ризиками дозволяє підвищити рівень екологічної відповідальності підприємства та забезпечити більш ефективний контроль за його впливом на навколишнє природне середовище.

Важливою рекомендацією є проведення регулярної оцінки небезпек, пов'язаних із функціонуванням об'єкта. Така оцінка повинна охоплювати аналіз технічного стану обладнання, особливостей технологічних процесів, умов зберігання небезпечних речовин, стану інженерних мереж, а також можливого впливу зовнішніх факторів. Регулярне оновлення інформації про небезпеки дозволяє своєчасно виявляти слабкі місця у системі безпеки та впроваджувати профілактичні заходи до виникнення аварійної ситуації.

Необхідною умовою підвищення рівня екологічної безпеки є своєчасне оновлення аварійних планів. Такі плани повинні відповідати реальному стану об'єкта, враховувати зміни в технологічних процесах, структурі персоналу, розміщенні обладнання та характері потенційних екологічних загроз. Регулярний перегляд і практичне відпрацювання аварійних планів забезпечують готовність персоналу до швидкого реагування, зменшують імовірність помилкових дій та сприяють мінімізації негативних наслідків аварій.

Особливу роль у забезпеченні екологічної безпеки відіграє підвищення рівня екологічної відповідальності персоналу. Працівники повинні усвідомлювати можливі наслідки порушення вимог безпеки, недбалого поводження з небезпечними речовинами або невиконання інструкцій. Для цього доцільно проводити навчання, тематичні інструктажі, інформаційні заходи та практичні тренування. Формування екологічної культури на підприємстві сприяє більш відповідальному ставленню до виробничої діяльності та зменшує ризик виникнення техногенних аварій.

Важливим напрямом є також налагодження співпраці з органами місцевого самоврядування та службами цивільного захисту. Така взаємодія дозволяє забезпечити узгодженість дій у разі виникнення надзвичайної ситуації, своєчасне інформування населення, залучення необхідних ресурсів і координацію аварійно-рятувальних заходів. Співпраця з відповідними службами підвищує ефективність реагування на аварії та сприяє зменшенню їхнього впливу на населення, довкілля та інфраструктуру.

Отже, підвищення екологічної безпеки об'єкта можливе за умови системного впровадження заходів з управління екологічними ризиками, регулярного контролю небезпек, оновлення аварійної документації, навчання персоналу та ефективної взаємодії з місцевими органами влади й службами цивільного захисту. Реалізація цих рекомендацій дозволить зменшити ймовірність виникнення техногенних аварій, обмежити їхні наслідки та забезпечити більш безпечне функціонування об'єкта.

## ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі виконано оцінку ризиків техногенних аварій та їх впливу на довкілля й обґрунтовано комплекс заходів зі зниження техногенно-екологічної небезпеки об'єкта підвищеної небезпеки. За результатами дослідження зроблено такі висновки.

Проаналізовано теоретичні основи техногенних аварій та екологічних ризиків. Установлено, що техногенна аварія є складним небезпечним явищем, яке поєднує технічні, соціальні, економічні та екологічні аспекти, а її основними ознаками є раптовість виникнення, порушення роботи технічних систем, загроза життю і здоров'ю людей, матеріальні руйнування та негативний вплив на довкілля. Систематизовано класифікацію техногенних аварій за джерелом виникнення й характером небезпечного чинника та розкрито сутність техногенного й екологічного ризику, розмежовано індивідуальний і соціальний ризик, а також прийнятний, допустимий і неприйнятний рівні ризику.

Систематизовано методи оцінювання ризиків техногенних аварій (якісні, кількісні, експертні, статистичні та матричні) з аналізом їхніх переваг і обмежень. Обґрунтовано, що найбільш достовірні результати забезпечує комплексне поєднання кількох методів. Визначено послідовність оцінювання ризику, яка охоплює ідентифікацію небезпек, оцінювання ймовірності виникнення аварій з урахуванням технічних, природних, технологічних та організаційних чинників і оцінювання наслідків аварій для довкілля.

Досліджено вплив техногенних аварій на компоненти навколишнього природного середовища. Показано, що аварійні викиди спричиняють забруднення атмосферного повітря з утворенням газових і димових хмар, поширення яких залежить від метеорологічних умов і температурної інверсії; розливи нафтопродуктів та аварійні скиди забруднюють поверхневі й підземні води та створюють загрозу питному водопостачанню; ґрунтовий покрив накопичує важкі метали й нафтопродукти, що зумовлює зниження родючості

та ризик вторинного забруднення. Установлено, що техногенні аварії порушують функціонування екосистем, зменшують біорізноманіття та створюють ризики для здоров'я й життєдіяльності населення.

Виконано практичну кількісну оцінку ризику техногенної аварії на прикладі типової стаціонарної автозаправної станції. Методом «що-якщо» та аналізом дерева подій ідентифіковано як найбільш небезпечну аварію з проливом бензину при зливних операціях і сформовано сценарії її розвитку: пожежа протоки, вибухова дефлаграція паро-повітряної хмари та флеш-пожежа. Розрахунками встановлено, що висота полум'я пожежі протоки сягає 18,2 м, а летальна зона теплового ураження — до 12 м; за вибуху паро-повітряної хмари (приведена маса  $\approx 38,6$  кг ТНТ) зона смертельного ураження ударною хвилею ( $\Delta P \geq 53$  кПа) сягає 13 м, а зона легких ушкоджень — до 60 м.

Визначено показники територіального, індивідуального та соціального ризику. Установлено, що потенційний територіальний ризик знижується до прийнятного для населення рівня  $10^{-6}$  1/рік на відстані 70–80 м від зливного майданчика; індивідуальний ризик оператора ( $\approx 9,0 \cdot 10^{-5}$  1/рік) близький до гранично допустимого рівня й перевищує прийнятний, а соціальний ризик перебуває в перехідній (ALARP) області, де він визнається прийнятним лише за умови зниження до практично досяжного мінімуму.

Виконано оцінку екологічного ризику аварійного розливу. Розрахунком установлено, що розлив  $5 \text{ м}^3$  бензину спричиняє забруднення близько 667 т ґрунту з досягненням водоносного горизонту та потенційним забрудненням до  $6,25 \cdot 10^5 \text{ м}^3$  підземних вод понад ГДК; сумарні екологічні збитки сягають  $\approx 412,5$  тис. грн, а екологічний ризик становить близько 9,3 тис. грн/рік, що відповідає високому (неприйнятному) рівню й обґрунтовує необхідність впровадження природоохоронних заходів.

Обґрунтовано комплекс організаційних, технічних, природоохоронних та управлінських заходів зі зниження ризиків, а також систему екологічного моніторингу об'єкта. Установлено, що влаштування герметичного покриття

зливного майданчика з нафтовловлювачем, застосування швидкороз'ємних муфт із системою відсікання, газосигналізації та автоматичного пожежогасіння, дотримання нормативних протипожежних розривів (не менше 70–80 м), регламентація зливних операцій і навчання персоналу дають змогу знизити територіальний ризик у кілька разів, а індивідуальний ризик оператора — більш ніж на порядок.

Оцінено ризики техногенних аварій та їх вплив на довкілля й обґрунтовано заходи, реалізація яких забезпечує зниження ризику до практично досяжного мінімуму та прийнятний рівень техногенно-екологічної безпеки об'єкта. Отримані результати та запропонована послідовність поетапного оцінювання ризику можуть бути використані під час розроблення декларацій безпеки, планів локалізації та ліквідації аварій, обґрунтування протипожежних і санітарно-захисних розривів, а також у навчальному процесі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. *Відомості Верховної Ради України*. 2013. № 34–35. Ст. 458. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17> (дата звернення: 05.06.2026).
2. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (дата звернення: 05.06.2026).
3. Про об'єкти підвищеної небезпеки : Закон України від 18.01.2001 № 2245-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14> (дата звернення: 05.06.2026).
4. Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення : Закон України від 24.02.1994 № 4004-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4004-12> (дата звернення: 05.06.2026).
5. Про ідентифікацію та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки : постанова Кабінету Міністрів України від 11.07.2002 № 956. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/956-2002-п> (дата звернення: 05.06.2026).
6. Про затвердження Порядку класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями : постанова Кабінету Міністрів України від 24.03.2004 № 368. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/368-2004-п> (дата звернення: 05.06.2026).
7. ДК 019:2010. Класифікатор надзвичайних ситуацій. [Чинний від 2011-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 19 с.
8. Про затвердження Методики визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки : наказ Міністерства праці та соціальної політики України від 04.12.2002 № 637. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0637203-02> (дата звернення: 05.06.2026).
9. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій : наказ Міністерства внутрішніх справ України від 13.10.2023 № 836. Київ, 2023.

- 10.ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT). [Чинний від 2019-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 18 с.
- 11.ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT). [Чинний від 2014-07-01]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 80 с.
- 12.ДСТУ 3891:2013. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2014-01-01]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 25 с.
- 13.Правила охорони праці під час зварювання металів, затверджені наказом МНС України від 14.12.2012 № 1425. У документі є окремий розділ “Вимоги безпеки до процесів контактного зварювання”, тому це найкраща заміна для розділу з охорони праці.
- 14.ДСТУ EN ISO 18278-1:2022 “Контактне зварювання. Зварюваність. Частина 1. Загальні вимоги до оцінювання зварюваності контактного точкового, шовного та виступного зварювання металевих матеріалів”ВБН В.2.2-58.1-94. Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Київ : Держкомнафтогаз, 1994.
- 15.Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів : ДСП 173-96. Затв. наказом МОЗ України від 19.06.1996 № 173. Київ, 1996.
- 16.ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. [Чинний від 2016-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 17 с.
- 17.Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Хміль Г. А. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління : монографія. Київ : Наукова думка, 2008. 542 с.
- 18.Качинський А. Б. Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращення. Київ : НІСД, 2001. 312 с.
- 19.Стеблюк М. І. Цивільна оборона та цивільний захист : підручник. 3-тє вид. Київ : Знання, 2013. 487 с.

- 20.Джигирей В. С. Екологія та охорона навколишнього природного середовища : навч. посіб. 5-те вид. Київ : Знання, 2007. 422 с.
- 21.Запольський А. К., Салюк А. І. Основи екології : підручник. Київ : Вища школа, 2005. 382 с.
- 22.Желібо Є. П., Заверуха Н. М., Зацарний В. В. Безпека життєдіяльності : навч. посіб. Київ : Каравела, 2011. 448 с.
- 23.Шмандій В. М., Некос В. Ю. Екологічна безпека : підручник. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2008. 436 с.
- 24.Адаменко О. М., Міщенко Л. В. Екологічний аудит територій : підручник. Івано-Франківськ : Факел, 2000. 342 с.
- 25.Бедрій Я. І. Безпека життєдіяльності : навч. посіб. Київ : Кондор, 2009. 286 с.
- 26.Управління техногенно-екологічною безпекою : навч. посіб. / за ред. В. М. Шмандія. Кременчук : КрНУ, 2016. 264 с.
- 27.ISO 31000:2018. Risk management — Guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2018. 16 p.
- 28.IEC 31010:2019. Risk management — Risk assessment techniques. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2019. 264 p.
- 29.Lees' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control / ed. by S. Mannan. 4th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012. 3776 p.
- 30.Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. 2nd ed. New York : Center for Chemical Process Safety, AIChE, 2000. 754 p.
- 31.Methods for the Calculation of Physical Effects (Yellow Book) : CPR 14E. 3rd ed. The Hague : TNO, 2005.
- 32.Methods for the Determination of Possible Damage (Green Book) : CPR 16E. The Hague : TNO, 1992.
- 33.Guidelines for Quantitative Risk Assessment (Purple Book) : CPR 18E / ed. by P. A. M. Uijt de Haag, B. J. M. Ale. The Hague : TNO, 1999.

34. Crowl D. A., Louvar J. F. Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications. 3rd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2011. 720 p.
35. Casal J. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2018. 466 p.
36. Assael M. J., Kakosimos K. E. Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions: Effects Calculation and Risk Analysis. Boca Raton : CRC Press, 2010. 350 p.
37. Thomas P. H. The size of flames from natural fires. *Symposium (International) on Combustion*. 1963. Vol. 9, Iss. 1. P. 844–859.
38. Khan F. I., Abbasi S. A. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1998. Vol. 11, Iss. 4. P. 261–277.
39. Vílchez J. A., Sevilla S., Montiel H., Casal J. Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 1995. Vol. 8, Iss. 2. P. 87–96.
40. Directive 2012/18/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances (Seveso III). *Official Journal of the European Union*. 2012. L 197. P. 1–37.