Оцінювання технічної складової ризику отруєння працівників хіміко-технологічних ділянок промислових підприємств методом FTA

Assessment of the Technical Component of Poisoning Risk among Workers at Chemical Processing Units of Industrial Enterprises Using FTA

Олександр Мамонтов
Corresponding author: кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії, e-mail: aleksandr.mamontov@nure.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1464-8644

Інна Хондак
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії, e-mail: inna.hondak@nure.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6644-9968

Ірина Сезонова
кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії, e-mail: iryna.sezonova@nure.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9396-7434

Владислав Євсєєв
доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії, e-mail: vladyslav.yevsieiev@nure.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2590-7085

Світлана Сотник
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, робототехніки та безпекової інженерії, e-mail: svetlana.sotnik@nure.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6035-2388

Oleksandr Mamontov
Corresponding author: PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, e-mail: aleksandr.mamontov@nure.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1464-8644

Inna Khondak
PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, e-mail: inna.hondak@nure.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6644-9968

Iryna Sezonova
PhD in Engineering, Associate Professor, Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, e-mail: iryna.sezonova@nure.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9396-7434

Vladyslav Yevsieiev
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, e-mail: vladyslav.yevsieiev@nure.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2590-7085

Svetlana Sotnik
PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation, Robotics and Safety Engineering, e-mail: svetlana.sotnik@nure.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6035-2388

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Received: July 25, 2026 | Revised: October 11, 2026 | Accepted: October 31, 2026

УДК 614.8:331.45:005.334:697.92

DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.5.45

Мета дослідження. Розроблення моделі оцінювання ймовірності відмови системи захисту персоналу хіміко-технологічного приміщення на основі методу аналізу дерева відмов як технічної складової оцінювання ризику отруєння працівників та визначення пріоритетних напрямів підвищення рівня виробничої безпеки..

Методи дослідження. Метод аналізу дерева відмов – для виявлення критичних елементів системи та визначення логічних зв'язків між відмовами; методи теорії ймовірностей – для розрахунку ймовірності виникнення верхньої події; комп'ютерне моделювання та чисельні розрахунки в середовищі Mathcad – для реалізації математичної моделі.

Результати дослідження. Запропонована модель встановлює структурно-логічний зв'язок між відмовами окремих технічних засобів безпеки та ймовірністю відмови системи захисту в цілому. Також сформульовано напрями подальших досліджень щодо розроблення медичних сценаріїв із визначенням імовірнісних показників, необхідних для комплексного оцінювання індивідуального техногенного ризику.

Purpose. To develop a model for assessing the probability of failure of a personnel protection system in a chemical processing facility using Fault Tree Analysis (FTA) as a technical component of assessing the risk of worker poisoning, and to identify priority areas for improving occupational safety.

Method. Fault Tree Analysis was used to identify critical system components and determine logical relationships between failures; probability theory methods were applied to calculate the probability of occurrence of the top event; computer modeling and numerical calculations in Mathcad were employed to implement the mathematical model.

Findings. The proposed model establishes structural and logical relationships between failures of individual technical safety devices and the probability of failure of the protection system as a whole. Directions for further research were also identified, including the development of medical scenarios and the determination of probabilistic indicators required for a comprehensive assessment of individual technological risk.

Теоретична цінність дослідження. Розвиток науково-методичних засад ризик-орієнтованого оцінювання систем безпеки потенційно небезпечних об'єктів хімічного виробництва шляхом обґрунтування структурно-логічної моделі визначення ймовірності відмови системи захисту на основі методу аналізу дерева відмов.

Практична цінність дослідження. Застосування запропонованої моделі для кількісного оцінювання ймовірності відмови системи захисту на потенційно небезпечних об'єктах хімічного виробництва, ідентифікації її критичних елементів та обґрунтування пріоритетних заходів щодо підвищення надійності технічних засобів безпеки.

Обмеження / напрями подальших досліджень. Дослідження обмежується оцінюванням ймовірності відмови системи захисту як технічної складової комплексної оцінки техногенного ризику та не охоплює моделювання медичних наслідків аварійних ситуацій.

Оригінальність / цінність дослідження. Дослідження демонструє можливість практичного застосування методу аналізу дерева відмов для кількісного оцінювання ймовірності відмови системи захисту потенційно небезпечних об'єктів хімічного виробництва як технічної складової оцінювання ризику отруєння працівників.

Тип дослідження. Дослідницька стаття.

Theoretical implications. The advancement of scientific and methodological foundations for risk-based assessment of safety systems at potentially hazardous chemical production facilities through the substantiation of a structural and logical model for determining the probability of protection system failure using Fault Tree Analysis.

Practical implications. he application of the proposed model for quantitatively assessing the probability of protection system failure at potentially hazardous chemical production facilities, identifying its critical components, and substantiating priority measures to improve the reliability of technical safety equipment.

Research limitations / future research. The study is limited to assessing the probability of protection system failure as a technical component of comprehensive technological risk assessment and does not include modeling the medical consequences of accidents.

Originality / value of the study. The study demonstrates the practical applicability of Fault Tree Analysis for quantitatively assessing the probability of protection system failure at potentially hazardous chemical production facilities as a technical component of assessing the risk of worker poisoning.

Paper type. Research article.

Ключові слова: ризик; отруєння; вентиляція; сигналізація; надійність; моделювання.

Key words. Risk; poisoning; ventilation; alarm; reliability; modeling.

Вступ

Потенційно небезпечні виробничі об’єкти є джерелом підвищеної техногенної небезпеки, оскільки, відмови технічних систем і порушення технологічних процесів можуть призводити до аварій, травмування та загибелі людей, значних матеріальних збитків, забруднення навколишнього природного середовища, а також порушення функціонування критично важливих виробничих і соціальних систем. Сучасний розвиток промисловості характеризується ускладненням технологічних процесів, зростанням рівня автоматизації, збільшенням кількості взаємопов’язаних технічних систем та широким використанням небезпечних речовин, енергонасиченого обладнання і складних технологічних комплексів, що підвищує ймовірність виникнення небезпечних подій різного масштабу.

При цьому небезпеку для працівників становлять не лише великі техногенні аварії з тяжкими наслідками, а й локальні відмови обладнання, несправності окремих технічних елементів, порушення штатних режимів роботи, витоки небезпечних речовин, короткочасні перевищення допустимих рівнів шкідливих виробничих факторів та інші події, які не завжди класифікуються як аварії. Подібні ситуації можуть спричиняти нещасні випадки, гострі та хронічні отруєння, професійні захворювання, погіршення функціонального стану працівників, зниження працездатності, збільшення ймовірності помилок персоналу та, як наслідок, подальше підвищення рівня техногенних ризиків.

У сучасній концепції управління безпекою пріоритетним напрямом є перехід від реагування на наслідки аварій до їх попередження на основі ризик-орієнтованого підходу. Цей підхід передбачено міжнародним стандартом, відповідно до якого оцінювання ризику є невід'ємною складовою процесу забезпечення безпеки [1]. В деяких країнах ризик-орієнтований підхід впроваджений не лише на нормативно-правовому, але й на законодавчому рівні (Велика Британія, Німеччина, Франція, Італія, Нідерланди, Швеція, Канада, Австралія тощо). В Україні на законодавчому рівні встановлено принципи, загальні вимоги та правові засади застосування ризик-орієнтованого підходу. На нормативно-правовому рівні (постанови Кабінету Міністрів України, накази міністерств, державні нормативні документи) визначено механізми його практичної реалізації: критерії ризику, методики оцінювання, періодичність перевірок, порядок віднесення суб’єктів господарювання до певного ступеня ризику тощо. Таким чином, ризик-орієнтований підхід в Україні активно реалізується та розвивається, переважним чином, на рівні нормативно-

правових документів. Основними сферами його застосування є цивільний захист, промислова та пожежна безпека.

У зв’язку з цим забезпечення безпеки потенційно небезпечних виробничих об'єктів потребує оцінювання не лише ризику виникнення масштабних аварій, а й індивідуального техногенного ризику, який характеризує ймовірність негативного впливу небезпечних виробничих факторів на конкретну людину внаслідок реалізації як аварійних, так і менш масштабних небезпечних сценаріїв. Такий підхід відповідає сучасній концепції ризик-орієнтованого управління безпекою та дозволяє своєчасно виявляти найбільш критичні відмови технічних систем і визначати пріоритетні заходи щодо їх попередження.

Особливе значення при цьому має оцінювання індивідуального техногенного ризику, який характеризує ймовірність загибелі або ураження конкретної людини внаслідок реалізації небезпечних подій на потенційно небезпечному об’єкті. Результати кількісного аналізу індивідуального ризику можуть бути використані для ідентифікації найбільш небезпечних сценаріїв розвитку подій, виявлення найбільш уразливих (“слабких”) елементів технічних систем, обґрунтування та вибору пріоритетних превентивних заходів безпеки, а також для встановлення відповідності фактичного рівня ризику нормативним або допустимим значенням. Таким чином, кількісне оцінювання індивідуального техногенного ризику є важливим інструментом підтримки інженерних рішень, спрямованих на підвищення безпеки потенційно небезпечних виробничих об’єктів.

Одним із найбільш поширених методів кількісного аналізу причин та ймовірностей виникнення аварій є метод дерева відмов [2]. Його перевагою є можливість встановлення логічних взаємозв'язків між відмовами окремих елементів системи, визначення мінімальних критичних комбінацій відмов, розрахунку ймовірності реалізації головної небезпечної події та виявлення найбільш значущих факторів ризику. Це дозволяє використовувати FTA (Fault Tree Analysis) як ефективний інструмент кількісного оцінювання ймовірності відмови технічних систем захисту, що є однією зі складових комплексного оцінювання індивідуального техногенного ризику на потенційно небезпечних виробничих об'єктах.

В умовах повоєнного відновлення економіки України та майбутнього розвитку промислового виробництва особливої **актуальності** набуває забезпечення збалансованого поєднання економічного зростання з високим рівнем техногенної та виробничої безпеки. Тому вже сьогодні необхідно створювати науково обґрунтовані підходи, які дозволять мінімізувати ризик зростання виробничого травматизму, професійної захворюваності та аварійності в процесі модернізації й розширення виробництва. У зв’язку з цим актуальним є дослідження застосування методу FTA для кількісного оцінювання ймовірності відмови систем захисту працівників як технічної складової ризику отруєння та обґрунтування ефективних заходів підвищення безпеки потенційно небезпечних виробничих об’єктів.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі **завдання дослідження**:

проаналізувати сучасні підходи до оцінювання техногенних ризиків на потенційно небезпечних виробничих об'єктах та можливості застосування методу дерева відмов для їх кількісного оцінювання;

розробити структурно-логічну модель дерева відмов системи забезпечення безпеки працівників при використанні місцевої витяжної вентиляції в умовах впливу шкідливих хімічних речовин;

побудувати математичну модель для розрахунку ймовірності реалізації головної небезпечної події на основі дерева відмов;

виконати кількісне оцінювання ймовірності відмови системи захисту;

визначити найбільш критичні елементи системи захисту та обґрунтувати напрями вдосконалення системи безпеки з метою зниження індивідуального техногенного ризику;

визначити напрямок подальших досліджень.

Наукова новизна роботи полягає в адаптації методу аналізу дерева відмов до кількісного оцінювання ймовірності відмови систем захисту працівників хіміко-технологічних приміщень з урахуванням структурно-логічних взаємозв'язків між відмовами місцевої витяжної вентиляції та системи сигналізації, що дозволяє визначати критичні комбінації відмов технічних засобів захисту та обґрунтовувати напрями вдосконалення систем безпеки.

Метою дослідження є розроблення моделі оцінювання ймовірності відмови системи захисту персоналу хіміко-технологічного приміщення на основі методу FTA як технічної складової оцінювання ризику отруєння працівників та визначення пріоритетних напрямів підвищення рівня виробничої безпеки.

Огляд літератури

Стаття [3] присвячена аналізу сучасних концепцій охорони праці (Occupational Protection), безпеки та здоров’я на роботі (Occupational Safety and Health, OSH) та благополуччя працівників (Well-Being at Work), а також їх місця у міжнародній практиці управління трудовою діяльністю. Автори порівнюють національні та міжнародні підходи до трактування цих понять, розглядають їхню еволюцію та обґрунтовують необхідність переходу від традиційної охорони праці до комплексної системи управління безпекою, здоров’ям і благополуччям працівників. Особливу увагу приділено гармонізації української термінології та законодавства з європейськими стандартами у сфері охорони праці. У роботі [4] проаналізовано взаємозв’язок між класом об’єкта підвищеної небезпеки, кількістю небезпечних хімічних речовин та рівнем ризику. На основі аналізу нормативної бази та кількісної оцінки небезпечних факторів запропоновано рекомендації щодо вдосконалення підходів до ідентифікації та класифікації об'єктів підвищеної небезпеки, спрямовані на підвищення рівня промислової безпеки. Робота [5] присвячена захисту виробничого персоналу від впливу діоксиду сірки шляхом удосконалення процесів очищення промислових газів. За допомогою математичного моделювання досліджено ефективність різних режимів абсорбційного очищення викидів SO_2. Показано, що оптимізація технологічних параметрів дозволяє зменшити концентрацію шкідливої речовини, підвищити екологічну безпеку виробництва та суттєво знизити ризик негативного впливу на здоров’я працівників. Робота [6] має інженерно-прикладний характер та орієнтована на вдосконалення конструкції та режимів експлуатації вентиляційних систем. Проаналізовано основні причини зниження ефективності роботи, запропоновано інженерні рішення, спрямовані на оптимізацію аеродинамічних характеристик, підвищення ефективності очищення повітря та зниження енергоспоживання. У роботі [7] наведено огляд засобів індивідуального захисту органів дихання від пестицидів. Проведено оглядово-аналітичне дослідження наукових публікацій 2020-2025 років, українських нормативних актів та європейських стандартів щодо захисту органів дихання. Особливу увагу приділено засобам індивідуального захисту. Запропоновано прикладний алгоритм для служб охорони праці на сільськогосподарських підприємствах. Розроблено модель вибору засобів індивідуального захисту органів дихання, яка поєднує токсикологічні, фізико-хімічні, технологічні та стандартизовані критерії та може бути адаптована для карток оцінки професійних ризиків. У роботах [3-7] відсутні детальний ризик-орієнтований підхід і кількісна оцінка ризиків.

У статті [8] наведено детальний огляд сучасних промислових газоаналізаторів. Розглядаються електрохімічні, напівпровідникові, каталітичні та оптичні газові датчики, їхні характеристики, сфери застосування та перспективи розвитку в галузі промислової безпеки. Відсутні кількісні показники надійності датчиків, що дозволяють використовувати їх для кількісної оцінки ризиків. Також не наведено вартості, необхідної для прийняття рішень щодо оцінки та управління ризиками. У роботі [9] проведено огляд сучасних напівпровідникових датчиків горючих газів, призначених для моніторингу та раннього виявлення витоків у нафтохімічній промисловості. Автори проаналізували чутливі матеріали, механізми

газочутливості, основні експлуатаційні характеристики (чутливість, селективність, час відгуку, стабільність) та сучасні способи їх покращення. У роботі [10] статті виконано огляд сучасних досліджень, присвячених гнучким газовим сенсорам на основі напівпровідникових оксидів металів (MOS), що працюють за кімнатної температури. Проаналізовано різні матеріали, механізми газочутливості та способи підвищення чутливості та селективності сенсорів. Дослідження [11] присвячено підвищенню селективності хемірезистивних газових сенсорів. Розглянуто причини недостатньої селективності існуючих датчиків та методи її підвищення, включаючи розробку нових чутливих матеріалів, створення гетероструктур, легування, модифікацію поверхні каталізаторами, управління дефектами кристалічної структури, застосування газових фільтрів, масивів датчиків та алгоритмів обробки сигналів. Крім того, обговорюються механізми взаємодії газів з поверхнею чутливих матеріалів та перспективи подальшого розвитку газочутливих систем. Систематичний огляд сучасних систем виявлення небезпечних газів представлений у [12]. Особливу увагу приділено промисловим газоаналізаторам, проблемам калібрування, деградації сенсорів, хибним тривогам та застосуванню штучного інтелекту для підвищення надійності моніторингу. Однак автори відзначають, що точність цих вимірювань згодом погіршується через старіння сенсорів, дрейфу характеристик та впливу сторонніх газів, тому основна увага в огляді приділена способам автоматичної корекції цих похибок та зниження потреби в ручному калібруванні. У роботах [6-10] не реалізовано ризик-орієнтований підхід та відсутні дані, необхідні для кількісної оцінки ризику.

У роботі [13] автори пропонують застосування методів машинного навчання підвищення точності ідентифікації газів за сигналами газоаналізаторів. Робота є актуальною для інтелектуальних систем газового моніторингу хімічних виробництв. Стаття [14] є огляд сучасних досліджень, присвячених забруднення повітря в промислових цехах і методів його зниження за допомогою вентиляційних систем. Автори розглядають основні види промислових забруднювачів, порівнюють різні схеми вентиляції та аналізують застосування CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics) з метою оцінки їх ефективності. Особливу увагу приділено перспективам інтелектуального управління вентиляцією з використанням штучного інтелекту та алгоритмів оптимізації для автоматичної підтримки якості повітря. У статті [15] представлено огляд сучасних досліджень, присвячених поширенню шкідливих забруднюючих речовин у промислових цехах та стратегіям управління вентиляцією для захисту працівників. Автори аналізують механізми перенесення газів, аерозолів та твердих частинок, порівнюють ефективність різних схем загальнообмінної та місцевої витяжної вентиляції, а також розглядають перспективи застосування CFD-моделювання та інтелектуальних систем керування повітрообміном. Особливу увагу приділено підвищенню ефективності видалення забруднень та зниженню професійних ризиків на промислових підприємствах. Стаття [16] присвячена виявленню причин виробничих аварій на хімічних підприємствах Китаю на основі аналізу 154 реальних випадків. Автори використовували комбінацію методів Grounded Theory та fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis (fsQCA), що дозволило визначити п'ять ключових груп факторів (культура безпеки, система управління безпекою, компетентність персоналу, безпечна поведінка та умови робочого середовища) та встановити кілька типових сценаріїв, що призводять до аварій різної.

Роботи [13-16] ґрунтуються переважно на якісному підході до оцінки ризику. Приділяється основна увага організаційним та людським факторам. При цьому в них відсутня кількісна оцінка ризику та ймовірні розрахунки, а аналіз проводиться на рівні хімічних виробництв в цілому без можливості визначення ризику для конкретного небезпечного виробничого об'єкта або окремого технологічного процесу.

У статті [17] методом математичного моделювання та CFD досліджується ефективність різних схем припливно-витяжної вентиляції приміщень. Аналізується розподіл температури,

вологості та концентрації CO_2, що дозволяє оцінити ефективність видалення забруднень із робочої зони. Робота [18] присвячена розробці математичної моделі вентиляції, що витісняє, при змінних теплових навантаженнях. Розглядається формування повітряних потоків, температурної стратифікації та якості повітря, що становить інтерес при проектуванні локальних систем подачі та видалення повітря у виробничих приміщеннях. У роботі [19] зазначено, що традиційні системи загальнообмінної та місцевої вентиляції нерідко виявляються малоефективними, коли працівники постійно переміщуються між робочими місцями. Для вирішення цієї проблеми запропоновано систему Direction Air Supply (DAS), яка формує спрямований потік чистого повітря у зоні дихання працівника. [20] присвячене оптимізації та модернізації систем повітроводів HVAC з використанням імітаційного моделювання для зниження енергоспоживання, втрат тиску та вартості реконструкції. Роботи [17-21] спрямовані на підвищення ефективності вентиляційних систем шляхом оптимізації повітрообміну, удосконалення конструктивних рішень та застосування математичного моделювання. Однак у них відсутній ризик-орієнтований підхід і не проводиться кількісна оцінка техногенних ризиків, пов'язаних з відмовими вентиляційних систем.

У статті [22] виконано систематичний огляд сучасних методів оцінки ризиків, які застосовуються для забезпечення технологічної безпеки, захищеності та стійкості хімічних виробництв. Автори порівняли традиційні та сучасні підходи до аналізу ризику, розглянули їх переваги, обмеження та сфери застосування, а також дійшли висновку про необхідність розробки інтегрованих методів, що поєднують оцінку безпеки, захищеності та стійкості хіміко-технологічних систем. У статті [23] виконано систематичний огляд методів інтегрованої оцінки професійних та технологічних ризиків у хімічній промисловості. Автори проаналізували застосування методів HAZOP, FTA, ETA, LOPA, Bow-Tie, FMEA, Bayesian Networks та інших підходів, порівняли їх переваги та обмеження, проте власного кількісного аналізу ризиків не проводили – робота має оглядово-аналітичний характер і спрямована на виявлення перспектив розробки комплексних методів оцінки ризику. Стаття [24] присвячена вдосконаленню методу FTA за рахунок урахування зміни ймовірностей відмов у часі в оцінці ризику аварійного викиду хлору на хімічному підприємстві. Дослідження орієнтоване на надійність технологічної системи, а чи не на оцінку ризику гострого отруєння працівників. Дослідження [25] присвячено оцінці ризику вибуху пилу на підприємствах харчової промисловості та не враховує специфіки хіміко-технологічних приміщень, пов'язаних з впливом токсичних речовин на персонал. Крім того, у дослідженні не розглядається вплив надійності систем газового контролю та місцевої витяжної вентиляції на ймовірність виникнення небезпечної ситуації, а також відсутнє моделювання ризику гострого отруєння працівників. У роботі [26] запропоновано інтегрований підхід до оцінювання ризиків безпеки та захищеності хімічних підприємств, що базується на експертних оцінках та методах нечіткої аналітичної ієрархії (FAHP). Недоліком такого підходу є відсутність структурного аналізу причинно-наслідкових зв'язків виникнення небезпечних подій, що забезпечує метод аналізу дерева відмов.

У статті [27] запропоновано ризик-орієнтовану методику проектування функціональної безпеки роботизованих систем, що працюють в умовах взаємодії людини та робота (Human-Robot Collaboration). Автори розробили новий підхід Function-Centered Hazard Identification Approach (F-CHIA) для виявлення функціональних небезпек на ранній стадії проектування, після чого застосували FTA для аналізу відмов системи, визначення мінімальних перерізів дерева відмов та необхідного рівня функціональної безпеки (Performance Level, PLr). Методику апробовано на прикладі напівавтономного сільськогосподарського трактора. Стаття присвячена розробці методології проектування безпечних роботизованих систем та не спрямована на кількісну оцінку ризику гострого отруєння працівників у хіміко-технологічному приміщенні. У статті [28] запропоновано інтегрований підхід до оцінки пожежного ризику в

університетських лабораторіях, що поєднує метод дерева відмов (FTA) та байєсівські мережі (BN). На основі аналізу причин пожеж побудовано дерево відмов із 21 базової події, яке перетворено на байєсовську мережу для кількісної оцінки ймовірності пожежі, аналізу чутливості та виявлення найбільш значущих факторів ризику. В результаті визначено ключові причини виникнення пожеж та запропоновано заходи щодо їх запобігання.

Стаття [29] присвячена оцінці ризиків у галузі охорони праці на виробничому об'єкті з використанням комбінованого підходу Hazard and Operability (HAZOP) та FTA. Автори спочатку виявляють небезпеки та відхилення технологічного процесу методом HAZOP, а потім за допомогою дерева відмов (FTA) визначають причини виникнення найбільш критичних подій та оцінюють їхню ймовірність для обґрунтування заходів щодо зниження ризику. Основну увагу приділено виявленню небезпек та аналізу причин виникнення небажаних подій, тоді як питання підвищення точності кількісної оцінки ймовірностей відмов та розвитку аварійних сценаріїв практично не розглядаються.

Результати досліджень [22-29] свідчать про широке застосування методів FTA як самостійно, так і у поєднанні з HAZOP, Bayesian Networks, FAHP та іншими підходами для аналізу причин виникнення небезпечних подій та оцінки технологічних ризиків. Водночас більшість робіт орієнтована на забезпечення функціональної, пожежної чи технологічної безпеки та не розглядає кількісну оцінку ризику гострого отруєння працівників у хіміко-технологічних приміщеннях з урахуванням надійності систем місцевої витяжної вентиляції та газового контролю.

Таким чином, на сьогодні накопичено значний досвід у галузі проектування, експлуатації та модернізації систем безпеки хіміко-технологічних виробництв. Разом з тим, недостатньо розвинені питання забезпечення безпеки на основі ризик-орієнтованого підходу, що передбачає кількісну оцінку професійних ризиків та їх подальше управління. У зв'язку з цим доцільним є проведення досліджень, спрямованих на розроблення моделі оцінювання ймовірності відмови системи захисту персоналу хіміко-технологічного приміщення на основі методу FTA як складової кількісного оцінювання індивідуального техногенного ризику та визначення пріоритетних напрямів підвищення рівня виробничої безпеки.

Методологія дослідження

Відповідно до стандарту [1], ризик розглядається як вплив невизначеності на досягнення поставлених цілей. Відповідно до стандарту [2], ризик – це комбінація заподіяння шкоди і тяжкості цієї шкоди (ймовірність заподіяння шкоди з урахуванням її тяжкості). Важливо зазначити, що ці нормативні документи на даний час є діючими і не суперечать один одному, а відображають різні рівні узагальнення цього поняття. У документі [30] розглядається ризик як загальна категорія управління, що застосовується до будь-якої сфери діяльності (промисловість, будівництво, транспорт, фінансова діяльність, державне управління, охорона праці, екологічна безпека, оборона тощо). Водночас документ [30] конкретизує це поняття стосовно сфери охорони праці, пов'язуючи ризик з імовірністю заподіяння шкоди працівникові та тяжкістю її наслідків. Оскільки предметом даного дослідження є оцінка техногенних ризиків, які пов’язані з заподіянням шкоди, далі використовується визначення, відповідно до [29]. Воно найбільш повно відповідає меті та предмету дослідження.

У даній роботі розглядаються потенційно небезпечні об’єкти як технічні поняття (не плутати з юридичним поняттям ПНО). Це виробничі об'єкти, де існує можливість виникнення небезпечних подій. До них відноситься травмування або смерть людини, професійне захворювання, аварія, матеріальні збитки та шкода довкіллю. На рис. 1-4 показані приклади виробничих (хіміко-технологічних) приміщень, які являють собою об’єкти підвищеної небезпеки. На рис. 1 показана хіміко-аналітична лабораторія підприємства, де виконуються аналізи контролю якості гальванічних електролітів, травильних розчинів та стічних вод. Для

здійснення місцевої витяжної вентиляції використовуються витяжні шафи. У роботі застосовуються речовини другого класу небезпеки (високонебезпечні речовини дратівливої дії [30]): концентрована сірчана кислота; азотна кислота; соляна кислота.



Рисунок 1. Хіміко-аналітична лабораторія із застосуванням високонебезпечних речовин

На рис. 2 показана дільниця зварювання чорних металів механоскладального цеху. У повітрі робочої зони утворюється зварювальний аерозоль, який складається з твердої (дим) і газоподібної фази. Основні шкідливі речовини у повітрі робочої зони:

озон (O_3, перший клас небезпеки, подразнювальна дія);

манган та його неорганічні сполуки (у перерахунку на Mn, другий клас небезпеки, загальнотоксична, нейротоксична, подразнювальна дія);

оксиди азоту (NO, NO_2, у перерахунку на NO_2; другий клас небезпеки; подразнювальна дія);

оксид заліза (Fe_2O_3; третій клас небезпеки; фіброгенна, подразнювальна дія);

фтористі сполуки (у перерахунку на фтор; другий клас небезпеки; подразнювальна, загальнотоксична дія);

оксид вуглецю (CO; четвертий клас небезпеки; загальнотоксична дія).



Рисунок 2. Зварювальна дільниця механоскладального цеху

На рис. 3 показана дільниця приготування матеріалів для цеху лакофарбових покриттів машинобудівного підприємства. На рис. 4 показана дільниця нанесення лакофарбових

покриттів столярного цеху меблевої фабрики. На робочих місцях застосовуються речовини третього класу небезпеки:

толуол (третій клас небезпеки, подразнювальна дія);
бутилацетат (четвертий клас небезпеки, подразнювальна дія);
ізопропанол (четвертий клас небезпеки, подразнювальна дія);
ацетон (четвертий клас небезпеки, подразнювальна дія).



Рисунок 3. Дільниця приготування лакофарбових матеріалів машинобудівного підприємства



Рисунок 4. Дільниця нанесення лакофарбових покриттів столярного цеху

Усі розглянуті приклади виробничих приміщень є потенційно-небезпечними об’єктами, оскільки можливе отруєння працівників. У залежності від класу небезпеки речовини, часу дії та концентрації, отруєння може бути гострим та хронічним. За ступенем тяжкості вони можуть бути важкими, середніми та легкими. Конкретна постановка завдання передбачає конкретні виробничі умови та прогноз конкретного сценарію отруєння. Це

вимагає долучення професійних медичних фахівців з набором відповідних статистичних даних. На даному етапі дослідження обмежимось узагальненою постановку завдання. Треба оцінити індивідуальний техногенний ризик гострого отруєння працівника протягом однієї робочої зміни в межах річного періоду спостереження. Узагальнена постановка завдання передбачає наступні умови.

У виробничому приміщенні (рис. 5) розташовано *n* робочих місць, на яких випаровуються шкідливі речовини. Система захисту працівників складається з пристроїв місцевої витяжної вентиляції, системи сигналізації загазованості та засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

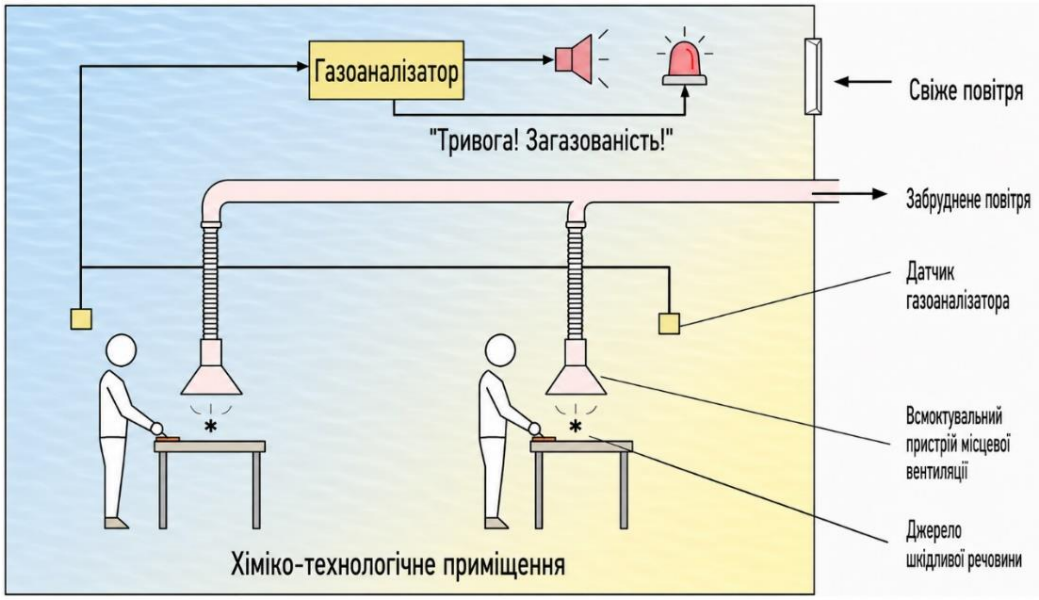


Рисунок 5. Схема розміщення робочих місць та обладнання у робочому приміщенні

Система місцевої вентиляції видаляє забруднене повітря в місцях утворення на кожному робочому місці. Система сигналізації включає датчики шкідливих хімічних речовин, газоаналізатор, а також засоби звукової та світлової сигналізації. Кожен датчик у загальному вигляді являє собою комбінований пристрій, який розрахований на різні хімічні речовини, що застосовуються у даному приміщенні, враховуючи особливості технологічного процесу. Це необхідно для того, щоб враховувати ефект сумації речовин, який може утворитися у повітрі.

Якщо через якісь причини концентрація шкідливої хімічної речовини (або декілька речовин) перевищує гранично допустиму концентрацію робочої зони (ГДКрз), або іншу встановлену межу, спрацьовує система сигналізації і вмикає сигнал тривоги. Працівники повинні припинити роботу і покинути приміщення (евакуюватися) до моменту усунення причини та нормалізації повітря робочих зон. Протягом робочої зміни люди знаходяться в приміщенні постійно.

Очевидно, що ризик отруєння людини нерозривно пов’язаний з відмовою системи безпеки. Для кількісної оцінки ймовірності відмови системи захисту можна скористатися методом FTA, який передбачає побудову логічної схему дерева відмови [31]. Для демонстрації можливостей запропонованої моделі приймемо умовне граничне значення ймовірності відмови системи захисту на рівні 10^{-6} протягом року. Зазначене значення використовується як розрахунковий критерій для порівняння результатів моделювання та не розглядається як нормативно встановлений допустимий рівень індивідуального ризику отруєння працівників.

Для виконання розрахунків необхідні дані про ймовірності відмов окремих елементів (підсистем) протягом року з урахуванням прийнятих умов їх експлуатації.

На рис. 6 показано дерево відмов системи захисту персоналу у хіміко-технологічному приміщенні. Головною подією є відмова системи захисту працівників, яка в межах прийнятої моделі виникає за одночасної відмови місцевої витяжної вентиляції та системи сигналізації хоча б на одному робочому місці. Така подія створює передумови для підвищення ризику отруєння працівників, однак не означає обов'язкового виникнення отруєння, оскільки його ймовірність залежить також від концентрації шкідливих речовин, тривалості їх впливу та інших умов виробничого середовища. У межах дослідження всі робочі місця вважаються ідентичними за умовами експлуатації та характеристиками технічних засобів захисту.



Рисунок 6. Дерево відмов системи захисту працівників від отруєння парами шкідливих хімічних речовин у виробничому приміщенні

На обох схемах (рис. 5, рис. 6) система сигналізації складається з датчика, газоаналізатора, акустичної колонки (гучномовця) та сигнальної лампи. Можливі різні підходи до складання схем. В одному у випадку можна об'єднати усі ці елементи, в один функціональний модуль, враховуючи їх загальне призначення. Для такого випадка ймовірність відмови системи сигналізації треба розрахувати як єдину величину. У даному випадку, на думку авторів, доцільно поділення цих елементів, як показано на попередніх схемах. Це пояснюється наступними причинами.

По перше, під час експлуатації вони можуть зазнати механічного або корозійного пошкодження. По-друге, через технологічні потреби їхній склад може змінюватися (можуть додаватися або усуватися нові елементи). По третє, на практиці їх розміщують у різних частинах приміщення. Так, наприклад, датчики щкідливих речовини треба розмістити як можна ближче до органів дихання людей на робочих місцях, а елементи світлової та звукової сигналізації треба розмістити у місцях загального доступу. Тому на практиці ці елементи виконують у вигляді окремих конструктивно-фукнціональних модулів. Це накладає додаткові умови контролю над ними та врахування ймовірностей відмови як окремих величин.

Для кількісного оцінювання ймовірності відмови системи захисту приймається припущення про статистичну незалежність відмов окремих технічних елементів і відповідних подій на робочих місцях. При цьому можливі відмови, зумовлені спільними причинами, у межах запропонованої моделі окремо не розглядаються. Зазначені припущення визначають

межі застосування отриманих результатів і мають враховуватися під час використання моделі для конкретних виробничих об'єктів.

Ймовірність головної події (відмови системи захисту) у даному випадку розраховується за формулою (умова “АБО”):

$$P_{\text{АБО}}=1-\prod_{i=1}^{n}(1-q_i), \quad (1)$$

де q_i – ймовірність одночасної відмови місцевої витяжної вентиляції та системи сигналізації на *i*-му робочому місці протягом розрахункового періоду;

i – номер робочого місця;

n – кількість робочих місць.

Формула (1) застосовується за умови статистичної незалежності подій відмови системи захисту на окремих робочих місцях. У разі наявності спільних технічних елементів або загальних причин відмов використання цієї формули потребує додаткового обґрунтування з урахуванням залежності відповідних подій.

Ймовірність вихідної події для логічного знаку “ТА” дорівнює

$$P_{\text{ТА}} = \prod_{j=1}^{m} q_j, \quad (2)$$

де q_j – ймовірності вхідної події для логічного знаку “ТА”;

j – номер події.

Застосування формули (2) передбачає статистичну незалежність відповідних подій та їх визначення в межах єдиного розрахункового періоду.

Як приклад, розрахуємо ймовірність головної події для умов, наведених у табл. 1. Розрахунок виконаний у середовищі Mathcad.

Таблиця 1. Вхідні дані для розрахунку ймовірності головної події

Кількість робочих місць	Ймовірність відмови протягом року (з урахуванням календарного плану робіт)				
	пристрою місцевої вентиляції (q_1)	датчика газоаналізатора (q_2)	газоаналізатора (q_3)	акустичної колонки (q_4)	сигнального світильника (q_5)
4	$2\cdot10^{-4}$	$1{,}5\cdot10^{-4}$	$8\cdot10^{-4}$	$2{,}5\cdot10^{-4}$	$3{,}5\cdot10^{-4}$

Джерело: складено авторами. Значення ймовірностей відмов технічних елементів прийнято умовно для демонстраційного розрахунку методом FTA. Методологічним орієнтиром для визначення показників надійності промислового обладнання є довідник SINTEF PDS Data Handbook [32]. Наведені значення не є підтвердженими експлуатаційними характеристиками конкретного обладнання.

Примітка. Наведені значення ймовірностей відмов технічних елементів системи захисту використано як вихідні параметри демонстраційного розрахунку. Вони мають ілюстративний характер і не характеризують фактичну надійність обладнання конкретного промислового підприємства. Для практичного застосування моделі необхідно використовувати експлуатаційні, статистичні або інші належним чином обґрунтовані дані щодо надійності відповідних технічних засобів.

Імовірність відмови сигналізації на робочому місці № 1

$$q_2 = 1{,}5\cdot10^{-4} \quad q_3 = 8\cdot10^{-4} \quad q_4 = 2{,}5\cdot10^{-4} \quad q_5 = 3{,}5\cdot10^{-4}$$

$$P_1 = 1-(1-q_2)\cdot(1-q_3)\cdot(1-q_4)\cdot(1-q_5)$$

$$P_1 = 1{,}549\cdot10^{-3}$$

Імовірність одночасної відмови вентиляції та сигналізації на робочому місці № 1

$$q_1 = 2\cdot10^{-4} \quad P_2 = q_1\cdot P_1 \quad P_2 = 3{,}098\cdot10^{-7}$$

Імовірність головної події

$$P_3 = 1-(1-3{,}098\cdot10^{-7})\cdot(1-3{,}098\cdot10^{-7})\cdot(1-3{,}098\cdot10^{-7})\cdot(1-3{,}098\cdot10^{-7})$$

$$P_3 = 1{,}239\cdot10^{-6}$$

Результат розрахунку ймовірності головної події (Mathcad):

q_1…q_5 – відповідні ймовірності відмови елементів системи; P_1 – ймовірність відмови сигналізації на робочому місці №1; P_2 – ймовірність одночасної відмови вентиляції та сигналізації на робочому місці №1; P_3 – ймовірність відмови системи захисту хоча б на одному робочому місці (головної події).

Як видно з результатів розрахунку, ймовірність головної події становить приблизно $1{,}2 \cdot 10^{-6}$ протягом року, що перевищує прийняте для демонстраційного розрахунку умовне граничне значення 10^{-6}. Отриманий результат свідчить про доцільність розгляду превентивних заходів, спрямованих на підвищення надійності системи захисту. Запропонована логічна схема та методика розрахунку дозволяють аналізувати як загальну ймовірність відмови системи, так і внесок окремих її елементів. На рис. 8 показано графік залежності ймовірності головної події від ймовірності відмови пристрою місцевої вентиляції.

Дана логічна схема та методика розрахунку ймовірності дозволяють аналізувати результат як у цілому, так і його складові. На рис. 7 показаний графік залежності ймовірності головної події від ймовірності відмови пристрою місцевої вентиляції.



Рисунок 7. Графік залежності ймовірності головної події від ймовірності відмови пристрою місцевої вентиляції (Mathcad)

У загальному випадку ймовірність відмови системи захисту є функцією від кількох змінних — ймовірностей відмови її окремих елементів:

$$P(x_c) = \mathrm{f}(x_1; \mathrm{x}_2 \ldots \mathrm{x}_c), \tag{3}$$

де x_c – ймовірність відмови елементу під номером c.

Отримані коефіцієнти впливу характеризують чутливість імовірності головної події до зміни ймовірностей відмов окремих елементів системи за прийнятих вихідних умов. Їх використання дозволяє визначати пріоритетні напрями подальшого аналізу надійності системи захисту. Водночас остаточний вибір заходів щодо підвищення надійності потребує врахування технічних можливостей модернізації, вартості відповідних заходів та умов експлуатації обладнання.

Для виявлення, порівняння та ранжування найбільш критичних (“слабких”) ланок системи, а також оптимізації рішень щодо управління ризиками доцільно визначати коефіцієнти локальної чутливості ймовірності відмови системи до ймовірностей відмов окремих елементів. Коефіцієнти впливу за своєю суттю є частинними похідними функції

надійності системи за параметрами окремих елементів. У загальному випадку коефіцієнти впливу розраховуються за формулою:

$$K_{\text{c}} = \frac{\partial P(x_{\text{c}})}{\partial x_{\text{c}}}. \quad (4)$$

На рис. 8 наведено графік залежності коефіцієнта впливу K_3 від імовірності відмови пристрою місцевої вентиляції, розрахований за формулою (4) з використанням вихідних даних, наведених у табл. 1.

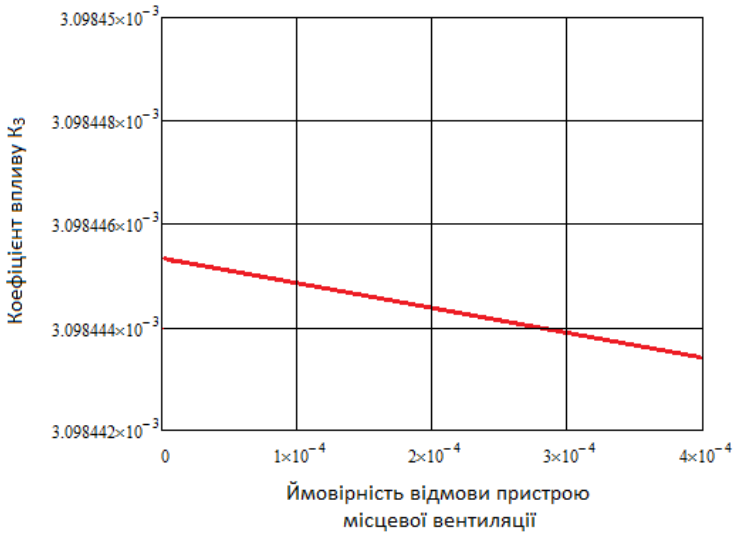


Рисунок 8. Графік залежності коефіцієнту впливу K_3 від ймовірності відмови пристрою місцевої вентиляції (Mathcad)

На рис. 9 наведено діаграму значень коефіцієнта впливу (K) для окремих елементів системи, побудовану на основі розрахункових даних, наведених у табл. 1. Отримані результати дають змогу виконати порівняльний аналіз значущості окремих елементів щодо забезпечення загальної надійності системи та визначити найбільш пріоритетні напрями її вдосконалення. За прийнятих вихідних даних найбільший вплив на ймовірність головної події мають пристрої місцевої витяжної вентиляції, що дає змогу розглядати їх як пріоритетні елементи для подальшого аналізу та обґрунтування заходів із підвищення надійності системи захисту. Залежно від отриманих значень коефіцієнтів впливу можливе застосування різних підходів до підвищення ефективності системи, які можуть базуватися як на параметричній оптимізації окремих елементів, так і на структурній оптимізації системи в цілому.

Водночас слід зазначити, що результати, наведені на рис. 8–10, є справедливими лише для тих значень імовірностей подій, які прийнято під час розрахунків і наведено в табл. 1. Зміна ймовірності окремого елемента призводить до необхідності повторного визначення коефіцієнтів впливу, оскільки вони є функціями відповідних імовірностей. Унаслідок цього аналіз впливу окремих елементів набуває ітераційного характеру та потребує багаторазового виконання розрахунків при зміні параметрів системи. Розгляд такого процесу виходить за межі цієї статті, оскільки належить до задач управління техногенним ризиком і потребує окремого дослідження.



Рисунок 9. Діаграма значень коефіцієнту впливу K_c для різних елементів:
1 – пристрій місцевої вентиляції; 2 – датчик газоаналізатора; 3 – газоаналізатор;
4 – акустична колонка; 5 – сигнальний світильник.

Проведений аналіз свідчить про можливість досягнення високого рівня надійності технічних систем захисту (заміна елементів, вчасна профілактика, резервування тощо). Наступним етапом визначення ризику отруєння людини є врахування тривалості та токсичної дії речовин. Це потребує подальшої розробки медичних сценаріїв з визначенням ймовірнісних показників.

Результати дослідження

У результаті дослідження розроблено структурно-логічну модель оцінювання ймовірності відмови системи захисту персоналу хіміко-технологічного приміщення на основі методу аналізу дерева відмов. Побудована модель відображає логічні взаємозв'язки між відмовами окремих технічних засобів безпеки та дозволяє визначати ймовірність відмови системи захисту в цілому залежно від структури функціональних зв'язків її елементів.

Розрахунки, виконані для модельного прикладу, показали, що за прийнятих вихідних даних імовірність головної події становить приблизно $1{,}2 \cdot 10^{-6}$ протягом року, що перевищує прийняте умовне граничне значення 10^{-6} та свідчить про доцільність розгляду заходів щодо підвищення надійності системи захисту. Отриманий результат підтверджує можливість використання запропонованої моделі для кількісного оцінювання надійності технічних систем безпеки та прийняття обґрунтованих інженерних рішень щодо зниження техногенних ризиків.

Аналіз чутливості моделі дав змогу встановити відносний вплив окремих елементів системи на ймовірність її відмови. Отримані коефіцієнти впливу дають змогу ранжувати технічні засоби безпеки за ступенем чутливості ймовірності відмови системи до зміни параметрів їх надійності та визначати пріоритетні напрями подальшого аналізу й удосконалення системи захисту. Для розглянутого модельного прикладу найбільший вплив на ймовірність відмови системи мають пристрої місцевої витяжної вентиляції, що дає змогу розглядати їх як пріоритетні елементи для подальшого аналізу та обґрунтування заходів із підвищення надійності системи захисту.

Отримані результати підтверджують можливість застосування запропонованої моделі як інструменту ризик-орієнтованого аналізу систем захисту потенційно небезпечних об'єктів хімічного виробництва. Водночас комплексне оцінювання індивідуального техногенного ризику потребує подальшого врахування медичних наслідків впливу небезпечних хімічних речовин та відповідних ймовірнісних характеристик.

Обговорення

Зокрема, у роботах [24, 27] метод FTA використано для аналізу причин виникнення небезпечних подій, оцінювання надійності технічних систем та визначення критичних комбінацій відмов, тоді як у дослідженнях [22, 23] розглянуто можливості інтеграції цього методу з іншими підходами до оцінювання технологічних ризиків.

Особливістю запропонованого підходу є використання методу FTA для оцінювання ймовірності відмови системи захисту працівників як окремої технічної складової комплексного оцінювання ризику отруєння, що визначає прикладну спрямованість дослідження. Результати узгоджуються із сучасною концепцією ризик-орієнтованого управління безпекою технічних систем [5, 8, 20–27]. Водночас розвиток технічних засобів безпеки, систем автоматичного контролю, газового моніторингу та діагностування створює передумови для підвищення надійності систем захисту й зниження ймовірності їх відмов. Однак комплексне оцінювання індивідуального техногенного ризику потребує врахування не лише технічної надійності, а й можливих наслідків впливу небезпечних хімічних речовин на здоров'я працівників. Тому перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення медичних сценаріїв розвитку наслідків впливу небезпечних хімічних речовин із визначенням їх ймовірнісних характеристик та інтеграція цих результатів із технічною моделлю оцінювання ризику.

Висновки

У результаті проведеного дослідження розроблено структурно-логічну модель оцінювання ймовірності відмови системи захисту персоналу хіміко-технологічного приміщення на основі методу аналізу дерева відмов. Запропонована модель дає змогу встановлювати логічні взаємозв'язки між відмовами окремих технічних засобів безпеки, визначати ймовірність відмови системи захисту та ідентифікувати її критичні елементи, що найбільше впливають на рівень техногенної небезпеки.

Показано, що використання методу аналізу дерева відмов забезпечує можливість кількісного оцінювання технічної надійності систем захисту потенційно небезпечних об'єктів хімічного виробництва та обґрунтування пріоритетних заходів щодо підвищення надійності технічних засобів безпеки. Розроблена модель може бути використана як допоміжний інструмент під час проєктування, модернізації та експлуатації систем промислової безпеки, а також для обґрунтування рішень у межах ризик-орієнтованого управління охороною праці та цивільним захистом з урахуванням прийнятих припущень і характеристик конкретного виробничого об'єкта.

У запропонованому підході ймовірність відмови системи захисту розглядається не як кінцевий показник індивідуального техногенного ризику, а як його технічна складова, що потребує подальшого врахування умов виникнення небезпечної ситуації та можливих наслідків для здоров'я працівників. Це створює методичні передумови для інтеграції результатів аналізу технічної надійності з оцінюванням медичних наслідків аварійних ситуацій.

Пропонується подальше дослідження у розробленні медичних сценаріїв розвитку наслідків впливу небезпечних хімічних речовин із визначенням їх ймовірнісних характеристик та інтеграція цих результатів із запропонованою моделлю для забезпечення комплексного оцінювання індивідуального техногенного ризику. Реалізація цієї пропозиції потребує залучення фахівців у галузі наукової медицини, токсикології, медицини праці та громадського здоров'я для розроблення медичних сценаріїв розвитку наслідків впливу небезпечних хімічних речовин і визначення їх імовірнісних характеристик. Інтеграція розроблених медичних сценаріїв із запропонованою моделлю створить передумови для комплексного кількісного оцінювання індивідуального техногенного ризику з урахуванням імовірності

виникнення небезпечної події, умов впливу шкідливих речовин та тяжкості можливих наслідків для здоров'я людини.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів.

Використання штучного інтелекту

Автори заявляють, що використовували ШІ для перевірки правопису та пошуку ресурсів.

Список використаних джерел

1. ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT).
2. ДСТУ 2293:2014 Охорона праці. Терміни та визначення основних понять.
3. Цопа В., Чеберячко С., Шароватова О., Дерюгін О., Лапко К. (2025). Концепції охорони праці, безпеки праці та здоров'я і благополуччя працівників на роботі. *Social Development and Security, 15*(4), 116–125. https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.4.11.
4. Ключка, Ю. (2025). Кореляція класу об'єкта підвищеної небезпеки, маси небезпечних речовин та його ризику. *Social Development and Security*, *15*(3), 149-162. https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.3.15.
5. Петрищев, А., Семірягін, С., Смірнов, О., Смірнов, Ю., & Цимбал, Б. (2023). Запобігання професійних ризиків шкідливого впливу діоксиду сірки на здоров'я працівників та розвиток екологічної безпеки при очищенні промислових газів. *Social Development and Security*, *13*(2), 161-170. https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.2.14.
6. Коколенко А.О., Турик В. М. (2025). Фільтраційне обладнання систем аспірації, вентиляції та пневмотранспорту в промисловості: особливості експлуатації, проблеми аеродинаміки та шляхи їх вирішення. *Mechanics and Advanced Technologies*. Том. 9, № 2(105). С. 144–156. https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.2(105).327118.
7. Чемикос С. (2026). Особливості вибору засобів індивідуального захисту органів дихання при роботі з пестицидами. *Проблеми охорони праці в Україні, 42*(1), 100–106. https://doi.org/10.36804/nndipbop.42-1.2026.100-106.
8. Hunter, G. W., Akbar, S., Bhansali, S., Daniele, M., Erb, P. D., Johnson, K., Liu, C.-C., Miller, D., Oralkan, O., Hesketh, P. J., Manickam, P., & Vander Wal, R. L. (2020). Editors' Choice—Critical review—A critical review of solid state gas sensors. *Journal of The Electrochemical Society, 167*(3), Article 037570. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab729c.
9. Ding, Y., Meng, F., An, F., Zhu, L., Wang, L., & Wu, E. (2026). Semiconductor-based combustible gas sensors for the petrochemical industry: A review. *Nanoscale, 18*(24), 12742–12774. https://doi.org/10.1039/D6NR00751A.
10. Ou, L. X., Liu, M. Y., Zhu, L. Y., Zhang, D. W., & Lu, H. L. (2022). Recent progress on flexible room-temperature gas sensors based on metal oxide semiconductor. *Nano-Micro Letters, 14*(1), Article 4. https://doi.org/10.1007/s40820-022-00956-9.
11. Bulemo, P. M., Kim, D. H., Shin, H., Cho, H. J., Koo, W. T., Choi, S. J., Park, C., Ahn, J., Güntner, A. T., Penner, R. M., & Kim, I. D. (2025). Selectivity in chemiresistive gas sensors: Strategies and challenges. *Chemical Reviews, 125*(8), 4111–4183. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00592.
12. Chew, B.-K., Mahmud, A., & Singh, H. (2025). *Autonomous Hazardous Gas Detection Systems: A Systematic Review*. *Sensors, 25*(21), 6618. https://doi.org/10.3390/s25216618.

13. Kim, Y., Lim, C., Lee, J., Kim, S., Kim, S., & Seo, D.-H. (2023). *Chemistry-informed machine learning: Using chemical property features to improve gas classification performance*. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 237*, 104808. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2023.104808.
14. Zhao, X., & Yin, Y. (2024). Hazards of pollutants and ventilation control strategy in industrial workshops: Current state and future trend. *Building and Environment, 251*, 111229. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111229.
15. Cao, Z., He, J., Bai, Y., Wang, Y., Xiao, Z., Zhou, Y., & Cao, Y. (2024). A dynamic ventilation strategy for industrial buildings based on weight factors. *Building and Environment, 258*, 111578. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111578.
16. Wang, Y., Zheng, C., & Wang, L. (2026). Causal factors and configuration paths for chemical occupational accidents: Grounded theory and fsQCA analysis of 154 cases in China. *Frontiers in Public Health, 13*, Article 1713532. https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1713532.
17. Song, Y., Chen, X., Zhang, Z., Cao, S., Du, T., & Guo, H. (2022). Research on a push-pull industrial trough-side exhaust hood based on CFD simulation and experiment. *Science of the Total Environment, 827*, 154265. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154265.
18. Бурда, Ю. (2026). Редуковане моделювання формування мікроклімату в системах витискної вентиляції. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання, 57*, 23–39. https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.23-39.
19. Xu, Y., Cao, C., Ma, M., Jiao, Z., Cheng, L., Xie, W., Gao, J., & Zeng, L. (2022). Direction air supply design and optimization in industrial settings to reduce gaseous contaminant exposure. *Building and Environment, 216*, Article 109003. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109003.
20. Кіосак В., Ісаєв В., Федоренко В., Грідасов А., Банківський М. (2024). Моделювання повітрообміну “подача повітря зверху – видалення зверху”. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. №50, С.64-88. https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.50.64-88.
21. Kabbara, Z., Jorens, S., Seuntjens, O., & Verhaert, I. (2024). *Simulation-based optimization method for retrofitting HVAC ductwork design*. *Energy and Buildings, 307*, Article 113991. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113991.
22. Bin Ab Rahim, M. S., Reniers, G., Yang, M., & Bajpai, S. (2024). Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 88*, 105274. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274.
23. Taherzadeh Chenani, K., Zarei, E., Yazdi, M., Klockner, K., Alimohammadlou, M., & Kamalinia, M. (2024). A systematic review of the integration between occupational and process safety risk analysis methodologies. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 91*, 105387. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105387.
24. Ahammed, E., Soman, A. R., Gopakumar, B., Pramod, V. R., & Madhu, G. (2022). Covariate model-based fault tree analysis for risk assessment in chemical process industries: A case study of a chlorine manufacturing facility. *Journal of the Indian Chemical Society, 99*(6), 100463. https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100463.
25. Usahanunth, N., Imman, S., & Suwannahong, K. (2022). Dust explosion risk assessment of extruded food production process by fault tree analysis. *ACS Chemical Health & Safety, 29*(1), 91–97. https://doi.org/10.1021/acs.chas.1c00036.
26. Soltanzadeh, A., Zarei, E., Mahdinia, M., & Sadeghi-Yarandi, M. (2024). An integrated approach to assess safety and security risks in chemical process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 90*, 105344. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105344.

27. Wu, J., Ren, J., Ravn, O., & Nalpantidis, L. (2025). A risk-informed design framework for functional safety system design of human–robot collaboration applications. *Safety, 11*(1), Article 24. https://doi.org/10.3390/safety11010024.
28. Zhao, Y., Liu, H., Tong, B., He, C., & Zhu, J. (2025). Integrated fault tree analysis and Bayesian network for fire risk assessment in university laboratories. *ACS Chemical Health & Safety, 32*(6), 780–790. https://doi.org/10.1021/acs.chas.5c00134.
29. Maharani, C., Amri, & Sayuti, M. (2025). Analysis of occupational health and safety hazard risk using hazard and operability and fault tree analysis methods. *International Journal of Engineering, Science and Information Technology, 5*(1), 117–127. https://doi.org/10.52088/ijesty.v5i1.676.
30. ДСТУ EN IEC 31010:2022. Керування ризиками. Методи оцінки ризиків (EN IEC 31010:2019, IDT; IEC 31010:2019, IDT).
31. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 09.07.2024 № 1192. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 24.07.2024 за № 1107/42452. База даних "Законодавство України" / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24 (дата звернення: 10.07.2026).
32. Ottermo, M. V., Hauge, S., & Håbrekke, S. (2021). *Reliability data for safety equipment: PDS data handbook – 2021 edition*. SINTEF Digital. https://www.sintef.no/en/publications/publication/0198cc96b219-a6550074-ccb4-478f-b7a2-f7386cca694d/ (дата звернення: 10.07.2026).

References

1. State Enterprise "Ukrainian Scientific Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality." (2018). Risk management: Guidelines (DSTU ISO 31000:2018) [National standard of Ukraine; identical to ISO 31000:2018].
2. State Enterprise "Ukrainian Scientific Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality." (2014). Occupational safety and health: Terms and definitions of basic concepts (DSTU 2293:2014) [National standard of Ukraine].
3. Tsopa, V., Cheberyachko, S., Sharovatova, O., Deryugin, O., & Lapko, K. (2025). Concepts of occupational safety, workplace safety, and employee health and well-being at work [Original article in Ukrainian]. Social Development and Security, 15(4), 116–125. https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.4.11
4. Klyuchka, Y. (2025). Correlation between the hazard class of a high-risk facility, the mass of hazardous substances, and its risk [Original article in Ukrainian]. Social Development and Security, 15(3), 149–162. https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.3.15
5. Petryshchev, A., Semyriahyn, S., Smirnov, O., Smirnov, Y., & Tsymbal, B. (2023). Prevention of occupational risks associated with the harmful effects of sulfur dioxide on workers' health and improvement of environmental safety during industrial gas purification [Original article in Ukrainian]. Social Development and Security, 13(2), 161–170. https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.2.14
6. Kokolenko, A. O., & Turyk, V. M. (2025). Filtration equipment for aspiration, ventilation, and pneumatic transport systems in industry: Operational features, aerodynamic problems, and solutions [Original article in Ukrainian]. Mechanics and Advanced Technologies, 9(2(105)), 144–156. https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.2(105).327118
7. Chemykos, S. (2026). Features of selecting respiratory protective equipment when working with pesticides [Original article in Ukrainian]. Labour Protection Problems in Ukraine, 42(1), 100–106. https://doi.org/10.36804/nndipbop.42-1.2026.100-106
8. Hunter, G. W., Akbar, S., Bhansali, S., Daniele, M., Erb, P. D., Johnson, K., Liu, C.-C., Miller, D., Oralkan, O., Hesketh, P. J., Manickam, P., & Vander Wal, R. L. (2020). Editors' Choice—Critical

review—A critical review of solid state gas sensors. Journal of The Electrochemical Society, 167(3), Article 037570. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab729c

9. Ding, Y., Meng, F., An, F., Zhu, L., Wang, L., & Wu, E. (2026). Semiconductor-based combustible gas sensors for the petrochemical industry: A review. Nanoscale, 18(24), 12742–12774. https://doi.org/10.1039/D6NR00751A
10. Ou, L. X., Liu, M. Y., Zhu, L. Y., Zhang, D. W., & Lu, H. L. (2022). Recent progress on flexible room-temperature gas sensors based on metal oxide semiconductor. Nano-Micro Letters, 14(1), Article 4. https://doi.org/10.1007/s40820-022-00956-9
11. Bulemo, P. M., Kim, D. H., Shin, H., Cho, H. J., Koo, W. T., Choi, S. J., Park, C., Ahn, J., Güntner, A. T., Penner, R. M., & Kim, I. D. (2025). Selectivity in chemiresistive gas sensors: Strategies and challenges. Chemical Reviews, 125(8), 4111–4183. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.4c00592
12. Chew, B.-K., Mahmud, A., & Singh, H. (2025). Autonomous hazardous gas detection systems: A systematic review. Sensors, 25(21), Article 6618. https://doi.org/10.3390/s25216618
13. Kim, Y., Lim, C., Lee, J., Kim, S., Kim, S., & Seo, D.-H. (2023). Chemistry-informed machine learning: Using chemical property features to improve gas classification performance. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 237, Article 104808. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2023.104808
14. Zhao, X., & Yin, Y. (2024). Hazards of pollutants and ventilation control strategy in industrial workshops: Current state and future trend. Building and Environment, 251, Article 111229. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111229
15. Cao, Z., He, J., Bai, Y., Wang, Y., Xiao, Z., Zhou, Y., & Cao, Y. (2024). A dynamic ventilation strategy for industrial buildings based on weight factors. Building and Environment, 258, Article 111578. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111578
16. Wang, Y., Zheng, C., & Wang, L. (2026). Causal factors and configuration paths for chemical occupational accidents: Grounded theory and fsQCA analysis of 154 cases in China. Frontiers in Public Health, 13, Article 1713532. https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1713532
17. Song, Y., Chen, X., Zhang, Z., Cao, S., Du, T., & Guo, H. (2022). Research on a push-pull industrial trough-side exhaust hood based on CFD simulation and experiment. Science of the Total Environment, 827, Article 154265. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154265
18. Burda, Y. (2026). Redukovane modeliuvannia formuvannia mikroklimatu v systemakh vytysknoi ventyliatsii [Reduced-order modeling of microclimate formation in displacement ventilation systems]. Ventyliatsiia, Osvitlennia ta Teplohazopostachannia, 57, 23–39. https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.23-39
19. Xu, Y., Cao, C., Ma, M., Jiao, Z., Cheng, L., Xie, W., Gao, J., & Zeng, L. (2022). Direction air supply design and optimization in industrial settings to reduce gaseous contaminant exposure. Building and Environment, 216, Article 109003. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109003
20. Kiosak, V., Isaiev, V., Fedorenko, V., Hridasov, A., & Bankivskyi, M. (2024). Modeliuvannia povitroobminu “podacha povitria zverkhu – vydalennia zverkhu” [Modeling air exchange with overhead air supply and overhead exhaust]. Ventyliatsiia, Osvitlennia ta Teplohazopostachannia, 50, 64–88. https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.50.64-88
21. Kabbara, Z., Jorens, S., Seuntjens, O., & Verhaert, I. (2024). Simulation-based optimization method for retrofitting HVAC ductwork design. Energy and Buildings, 307, Article 113991. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113991
22. Bin Ab Rahim, M. S., Reniers, G., Yang, M., & Bajpai, S. (2024). Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 88, Article 105274. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274
23. Taherzadeh Chenani, K., Zarei, E., Yazdi, M., Klockner, K., Alimohammadlou, M., & Kamalinia, M. (2024). A systematic review of the integration between occupational and process safety risk

analysis methodologies. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 91, Article 105387. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105387

24. Ahammed, E., Soman, A. R., Gopakumar, B., Pramod, V. R., & Madhu, G. (2022). Covariate model-based fault tree analysis for risk assessment in chemical process industries: A case study of a chlorine manufacturing facility. Journal of the Indian Chemical Society, 99(6), Article 100463. https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100463
25. Usahanunth, N., Imman, S., & Suwannahong, K. (2022). Dust explosion risk assessment of extruded food production process by fault tree analysis. ACS Chemical Health & Safety, 29(1), 91–97. https://doi.org/10.1021/acs.chas.1c00036
26. Soltanzadeh, A., Zarei, E., Mahdinia, M., & Sadeghi-Yarandi, M. (2024). An integrated approach to assess safety and security risks in chemical process industries. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 90, Article 105344. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105344
27. Wu, J., Ren, J., Ravn, O., & Nalpantidis, L. (2025). A risk-informed design framework for functional safety system design of human–robot collaboration applications. Safety, 11(1), Article 24. https://doi.org/10.3390/safety11010024
28. Zhao, Y., Liu, H., Tong, B., He, C., & Zhu, J. (2025). Integrated fault tree analysis and Bayesian network for fire risk assessment in university laboratories. ACS Chemical Health & Safety, 32(6), 780–790. https://doi.org/10.1021/acs.chas.5c00134
29. Maharani, C., Amri, & Sayuti, M. (2025). Analysis of occupational health and safety hazard risk using hazard and operability and fault tree analysis methods. International Journal of Engineering, Science and Information Technology, 5(1), 117–127. https://doi.org/10.52088/ijesty.v5i1.676
30. State Enterprise "Ukrainian Scientific Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality." (2022). Risk management: Risk assessment techniques (DSTU EN IEC 31010:2022) [National standard of Ukraine; identical to EN IEC 31010:2019 and IEC 31010:2019].
31. Ministry of Health of Ukraine. (2024, July 9). Pro zatverdzhennia derzhavnykh medyko-sanitarnykh normatyviv dopustymoho vmistu khimichnykh i biolohichnykh rechovyn u povitri robochoi zony [On approval of state medical and sanitary standards for permissible concentrations of chemical and biological substances in workplace air] (Order No. 1192). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24
32. Ottermo, M. V., Hauge, S., & Håbrekke, S. (2021). *Reliability data for safety equipment: PDS data handbook – 2021 edition*. SINTEF Digital. https://www.sintef.no/en/publications/publication/0198cc96b219-a6550074-ccb4-478f-b7a2-f7386cca694d/

This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.