

Погребняк В. Г., доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технології захисту навколишнього середовища
та безпеки праці Івано-Франківського національного технічного
університету нафти і газу
ORCID: 0000-0002-7735-3408

Гапоненко С. О., кандидат економічних наук,
доцент кафедри міжнародного туризму та готельно-ресторанного
бізнесу Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-6647-3335

Рудянова Т. М., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного
забезпечення Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-2750-6031

Погребняк А. В., доктор технічних наук, професор,
професор кафедри міжнародного туризму та готельно-
ресторанного бізнесу Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ В СИСТЕМІ БЕЗПЕКИ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Ключовою тезою роботи є необхідність фундаментальної зміни парадигми – переходу до проактивної, ризик-орієнтованої моделі управління, що фокусується на прогнозуванні та нейтралізації загроз до їх реалізації. Теоретичною основою цього підходу виступає, зокрема, модель «швейцарського сиру» Джеймса Різона, яка демонструє, що аварія є наслідком збігу прихованих недоліків на кількох рівнях захисту, а саме технологічному, організаційному, компетентнісному та наглядовому. Метою проактивної системи є постійне виявлення та усунення цих «дірок» для унеможливлення катастрофічного збігу.

Технологічним фундаментом для реалізації проактивного підходу визначено цифрову трансформацію на засадах індустрії 4.0. Запропоновано створення єдиної інтелектуальної екосистеми, де: Інтернет речей IoT виступає системою збору даних у реальному часі через датчики вібрації, корозії на обладнанні, газоаналізатори в робочих зонах та носимі «розумні» каски і біометричні трекери для персоналу; штучний інтелект AI обробляє ці дані для прогнозування відмов обладнання та інтелектуальної відеоаналітики; імерсивні технології VR/AR та цифрові двійники забезпечують відпрацювання навичок в екстремальних ситуаціях без ризику для життя та дозволяють безпечно моделювати найскладніші аварійні сценарії.

Для об'єктивізації управлінських рішень пропонується перехід від якісних оцінок до кількісного аналізу ризиків QRA. Цей підхід базується на формулі Ризик = Імовірність × Наслідки та використовує математичні інструменти, такі як дедуктивний аналіз «дерева відмов» FTA та індуктивний аналіз «дерева подій» ETA для розрахунку ймовірностей складних аварій. Такий аналіз дозволяє проводити економічно обґрунтовану оцінку «витрати-вигоди» для інвестицій у системи безпеки.

Ключовим висновком роботи є те, що в сучасних умовах межа між охороною праці, техногенною безпекою та цивільним захистом повністю стирається. Запропоновано концептуальну модель єдиної, інтегрованої системи управління безпекою, що об'єднує ці три компоненти. Практична реалізація моделі передбачає облаштування укриттів, створення дублюючих систем оповіщення та зв'язку, а також проведення комплексних тренінгів, що поєднують навички надання першої допомоги з елементами тактичної медицини. Створення такої адаптивної системи є безальтернативним шляхом для забезпечення захисту персоналу та стійкості функціонування стратегічних підприємств України.

Ключові слова: охорона праці, техногенна безпека, цивільний захист, нафтогазова галузь, управління ризиками, цифровізація, проактивна безпека.



Pogrebnyak V. G., Haponenko S. O., Rudianova T. M., Pogrebnyak A. V. Modern approaches to risk management in the safety system at industrial enterprises

The article provides an in-depth analysis of the safety management system at Ukrainian oil and gas industry enterprises, which operates under conditions of an unprecedented convergence of risks, making outdated, reactive approaches to labor protection not only ineffective but also unacceptable. It is substantiated that in addition to the traditional production hazards inherent in all stages of the cycle—from geological exploration to hydrocarbon processing—three key aggravating factors of modernity have been added. Firstly, a high degree of physical and moral deterioration of infrastructure, which significantly increases the likelihood of accidents due to equipment failure. Secondly, the intensification of production at depleted fields, which generates new, insufficiently studied professional risks. Thirdly, direct military threats that have turned the industry's facilities into strategic targets for missile strikes and UAV attacks. Under such conditions, safety management is transformed from a narrowly focused function into a fundamental element of national resilience.

The key thesis of the work is the need for a fundamental paradigm shift—a transition to a proactive, risk-oriented management model that focuses on predicting and neutralizing threats before they are realized. The theoretical basis for this approach is, in particular, James Reason's "Swiss cheese model", which demonstrates that an accident is the result of a confluence of hidden deficiencies at several levels of defense, namely technological, organizational, competence, and supervisory. The goal of a proactive system is the constant identification and elimination of these "holes" to prevent a catastrophic coincidence.

The technological foundation for implementing a proactive approach is identified as digital transformation based on Industry 4.0 principles. The creation of a unified intellectual ecosystem is proposed, where: the Internet of Things IoT acts as a real-time data collection system through vibration and corrosion sensors on equipment, gas analyzers in work areas, and wearable "smart" helmets and biometric trackers for personnel; artificial intelligence AI processes this data for predictive equipment failure and intelligent video analytics; immersive VR/AR technologies and digital twins provide skills training in extreme situations without risk to life and allow for the safe modeling of the most complex emergency scenarios.

To objectify management decisions, a transition from qualitative assessments to quantitative risk analysis QRA is proposed. This approach is based on the formula $Risk = Probability \times Consequences$ and uses mathematical tools such as deductive "fault tree analysis" FTA and inductive "event tree analysis" ETA to calculate the probabilities of complex accidents. Such analysis allows for an economically justified "cost-benefit" assessment for investments in safety systems.

The key conclusion of the work is that in modern conditions, the line between labor protection, technological safety, and civil defense is completely blurred. A conceptual model of a unified, integrated safety management system that combines these three components is proposed. The practical implementation of the model involves the arrangement of shelters, the creation of duplicate notification and communication systems, and the conduct of comprehensive training that combines first aid skills with elements of tactical medicine. The creation of such an adaptive system is the only way to ensure the protection of personnel and the resilience of the functioning of strategic enterprises in Ukraine.

Key words: occupational safety, oil and gas industry, risk management, life safety, professional risks, digitalization, Internet of Things, proactive safety.

Постановка проблеми. Нафтогазова галузь традиційно є одним зі стовпів національної економіки та ключовим елементом енергетичної безпеки України, забезпечуючи державу власними енергоресурсами та знижуючи залежність від зовнішніх постачальників. Її стабільне функціонування є запорукою життєдіяльності інших стратегічних секторів, від промисловості до аграрного комплексу, та має прямий вплив на добробут громадян [1–3]. Водночас підприємства цієї галузі за своєю сутністю належать до об'єктів підвищеної небезпеки. Виробничі процеси, що охоплюють розвідку, буріння, видобуток, транспортування та переробку вуглеводнів, нерозривно пов'язані з надзвичайно високою концентрацією ризиків для життя і здоров'я персоналу, а також створюють значні загрози для навколишнього природного середовища [4–6].

Специфіка галузі обумовлена складністю технологічних циклів, де застосовується потужне та великогабаритне обладнання, а робота ведеться з речовинами, що мають високий ступінь небезпеки. До постійно діючих факторів ризику належать робота з обладнанням під екстремально високим тиском, наявність у пластових флюїдах та технологічних процесах токсичних речовин, зокрема сірководню, а також постійна присутність легкозаймистих і вибухонебезпечних рідин та газів. Ці умови висувають безпрецедентно високі вимоги до надійності систем безпеки праці (ОП) та безпеки життєдіяльності (БЖД), де будь-яке відхилення від норм чи людська помилка можуть призвести до катастрофічних наслідків.

Постановка завдання. Актуальність дослідження та необхідність перегляду існуючих підходів до управління безпекою посилюється дією трьох ключових обтяжуючих факторів сучасності. По-перше, значна частина інфраструктури галузі, включаючи трубопроводи, компресорні станції та переробні установки, характеризується високим ступенем фізичного та морального зносу. Тривала експлуатація без належної модернізації суттєво підвищує ймовірність виникнення аварій через відмову обладнання, розгерметизацію систем та корозійні процеси. По-друге, виснаження старих родовищ змушує видобувні компанії переходити до інтенсифікації видобутку, що вимагає застосування технологічно складніших і потенційно більш ризикованих методів. Це, у свою чергу, генерує нові, ще недостатньо вивчені професійні ризики для персоналу [7]. По-третє, і це є визначальним викликом сьогодення, повномасштабна війна перетворила підприємства нафтогазової галузі на стратегічні цілі для ворожих атак. До традиційних виробничих ризиків додалися прямі воєнні загрози, такі як ракетні удари та атаки безпілотних літальних апаратів, що можуть спричинити

руйнування критичної інфраструктури. Це створює небезпеку не лише для працівників, а й для населення прилеглих територій, та може призвести до масштабних екологічних катастроф [8]. В таких умовах питання управління безпекою виходить за межі охорони праці і перетворюється на фундаментальний елемент національної стійкості та обороноздатності держави. Комплексна дія цих факторів вимагає негайного переходу до нової філософії безпеки – проактивної, інтегрованої та адаптованої до реалій воєнного часу [9, 10].

Виходячи з вищенаведеного **метою статті** є систематизація професійних ризиків у нафтогазовій галузі та розробка концептуальних засад для побудови сучасної, проактивної системи управління безпекою.

Виклад основного матеріалу. Класифікація та аналіз ризиків у нафтогазовій галузі. Ефективне управління безпекою на підприємствах нафтогазового комплексу неможливе без глибокої та всебічної ідентифікації потенційних небезпек. Ризики в цій галузі є багатограничними, взаємопов'язаними і виникають на кожному етапі виробничого ланцюга – від пошуку родовищ до переробки сировини. Простого переліку загроз недостатньо для розробки адекватних заходів контролю; потрібна їх системна класифікація. Найбільш обґрунтованим є підхід, що аналізує ризики за етапами виробничого циклу, доповнюючи його аналізом специфічних загроз, пов'язаних із зовнішніми факторами, такими як воєнний стан, та наскрізними ризиками, зокрема людським фактором [9, 10].

Початковий етап виробничого циклу характеризується високою мобільністю, роботою у віддалених і часто кліматично складних районах, а також інтенсивним використанням важкого механічного обладнання. Безпека на цьому етапі значною мірою залежить від суворого дотримання процедур, справності техніки та фізичної витривалості персоналу. Небезпеки тут мають переважно фізичний, хімічний та психофізіологічний характер [11–17].

Таким чином, на етапі розвідки та буріння домінують ризики, що несуть пряму загрозу життю та здоров'ю персоналу через безпосередній контакт з небезпечним середовищем та обладнанням. Управління безпекою тут має фокусуватися на механічній надійності обладнання, забезпеченні якісними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) та жорсткому контролю за дотриманням правил виконання робіт (див. Таблицю 1).

Таблиця 1

Аналіз ризиків на етапі геологорозвідки та буріння

Категорія ризику	Специфічні ризики	Можливі наслідки
Фізичні	Високий рівень шуму та вібрації від роботи дизельних генераторів, бурових насосів. Ризик падіння з висоти під час роботи на буровій вежі. Ураження рухомими та обертовими частинами механізмів. Вплив екстремальних погодних умов під час польових робіт. Ризик ураження електричним струмом від силового обладнання	Професійні захворювання: втрата слуху, вібраційна хвороба. Важкі травми, інвалідність, летальні випадки. Травми кінцівок, затягування одягу в механізми. Обмороження, теплові удари, загальне погіршення здоров'я. Електротравми та опіки
Хімічні	Контакт шкіри та дихальних шляхів з токсичними компонентами бурових розчинів. Ризик раптових газо-нафтоводопроводжень (ГНВП) з викидами сірководню (H_2S) та інших шкідливих газів	Хімічні опіки, дерматити, алергічні реакції, хронічні отруєння. Гостре отруєння, втрата свідомості, асфіксія, летальні випадки. Займання та вибух
Психофізіологічні	Висока фізична напруга. Вахтовий метод роботи, що веде до порушення біоритмів, накопичення втоми та зниження концентрації уваги. Монотонність праці та психологічний стрес через відрив від сім'ї та роботу в замкнутому колективі	Захворювання опорно-рухового апарату. Зростання ймовірності людської помилки, що може призвести до аварії. Професійне вигорання, зниження працездатності

Після введення свердловини в експлуатацію ризики зміщуються від безпосередніх загроз для бурової бригади до загроз, пов'язаних з процесами, що протікають всередині герметичного обладнання. Основне завдання на цьому етапі – забезпечити цілісність системи «свердловина-трубопровід-сховище» та контролювати параметри флюїду під високим тиском. Ризики тут набувають техногенного, аварійного та екологічного характеру (див. Таблицю 2).

На цих етапах ключовим завданням стає управління цілісністю активів Asset Integrity Management. Пріоритетом є технічна діагностика, антикорозійний захист, моніторинг тиску та впровадження систем раннього виявлення витоків. Наслідки аварій тут мають значно більший масштаб, виходячи за межі виробничого майданчика [18–20].

Нафто- та газопереробні заводи є об'єктами з максимальною концентрацією небезпеки, де в безпосередній близькості відбуваються складні фізико-хімічні процеси. Це створює умови для «ефекту доміно», коли одна аварія може ініціювати ланцюг руйнувань. Ситуація кардинально ускладнюється новими загрозами, що виникли внаслідок воєнних дій, які перетворюють промислові об'єкти на військові цілі [9, 10] (див. Таблицю 3).

Аналіз ризиків на етапах видобутку, підготовки та транспортування

Категорія ризику	Специфічні ризики	Можливі наслідки
Техногенні та аварійні	Робота з обладнанням під високим тиском, що створює ризик розгерметизації. Порушення герметичності магістральних трубопроводів та резервуарів через корозію, механічні пошкодження або диверсії. Критична зношеність значної частини інфраструктури, що підвищує ймовірність відмови обладнання	Потужні вибухи та пожежі, руйнування обладнання та споруд. Масштабні розливи нафти та витoki газу, що призводять до екологічних катастроф. Зростання частоти аварійних ситуацій, непланові зупинки виробництва
Пожежо- та вибухонебезпечність	Постійна наявність легкозаймистих рідин та горючих газів у виробничому циклі. Можливість утворення вибухонебезпечних газоповітряних сумішей на компресорних станціях та в резервуарних парках. Наявність джерел запалювання іскри, статична електрика, гарячі поверхні	Пожежі, що важко піддаються гасінню. Об'ємні вибухи з великим радіусом ураження. Загибель та травмування персоналу, значні матеріальні збитки
Екологічні	Забруднення ґрунту, поверхневих і підземних вод під час аварійних розливів. Труднощі з локалізацією та ліквідацією наслідків аварій у важкодоступній місцевості. Хронічний вплив на екосистеми через невеликі, але постійні витoki	Деградація екосистем, загибель флори та фауни. Забруднення джерел питної води. Довгострокові фінансові витрати на рекультивацію земель
Організаційні	Неналежне інформування персоналу про наявні ризики. Недостатній контроль за дотриманням вимог безпеки з боку підрядних організацій	Зростання рівня травматизму через неправильні дії. Аварії, спричинені некомпетентними діями сторонніх працівників

Таблиця 3

Аналіз комплексних ризиків на етапі переробки та під час воєнного стану

Категорія ризику	Специфічні ризики	Можливі наслідки
Комплексні техногенні переробки	Поєднання в одному процесі високих температур, тиску, агресивних хімічних речовин та каталізаторів. Велика кількість взаємопов'язаних технологічних установок. Планові та аварійні викиди шкідливих речовин в атмосферу	Найвищий рівень ризику виникнення великих промислових аварій з каскадним ефектом. Повне руйнування заводу. Хронічні професійні захворювання персоналу, погіршення екологічної ситуації в регіоні
Воєнні загрози	Пряме ураження критичної інфраструктури ракетними ударами чи дронами. Перебої з енергопостачанням, зв'язком та логістикою, що паралізують роботу систем безпеки. Небезпека для життя та здоров'я персоналу під час виконання робіт в зоні бойових дій або під час повітряних тривог	Масштабні пожежі та вибухи, неконтрольовані викиди небезпечних речовин. Втрата контролю над технологічними процесами, неможливість аварійної зупинки виробництва. Загибель та поранення працівників
Кібервразливість	Цілеспрямовані кібератаки на автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП). Зовнішній вплив на системи контролю безпеки через інформаційні атаки з метою приховати реальні дані або ініціювати аварію	Порушення роботи обладнання, створення аварійної ситуації. Втрата управління над об'єктом, неможливість адекватного реагування персоналу через отримання хибних даних

Ця подвійна природа загроз вимагає інтегрованого підходу, де традиційна промислова безпека має бути нерозривно пов'язана із заходами цивільного захисту, фізичної безпеки та кібербезпеки. Управління ризиками в таких умовах – це, по суті, управління стійкістю всього підприємства [10].

Перехід до проактивної моделі управління безпекою. Традиційна або реактивна модель управління охороною праці, яка десятиліттями панувала на пострадянському просторі, здебільшого орієнтована на реагування на інциденти, що вже сталися [11–17]. Її основні інструменти – це розслідування нещасних випадків, покарання винних та виконання мінімально необхідних нормативних приписів. Такий підхід є вкрай неефективним у складних системах, оскільки він завжди «наздоганяє» трагедію, а не запобігає їй. В умовах нафтогазової галузі, де ціна помилки може вимірюватися десятками життів та мільярдними збитками, очікування аварії для вжиття заходів є неприпустимим.

Сьогодення вимагає фундаментальної зміни парадигми – переходу до проактивної, ризик-орієнтованої моделі [9, 10]. Її суть полягає не в розслідуванні минулих подій, а в прогнозуванні та нейтралізації майбутніх загроз ще до того, як вони зможуть завдати шкоди.

Ключові елементи проактивного підходу. Проактивна система – це безперервний цикл, що складається з чотирьох основних етапів:

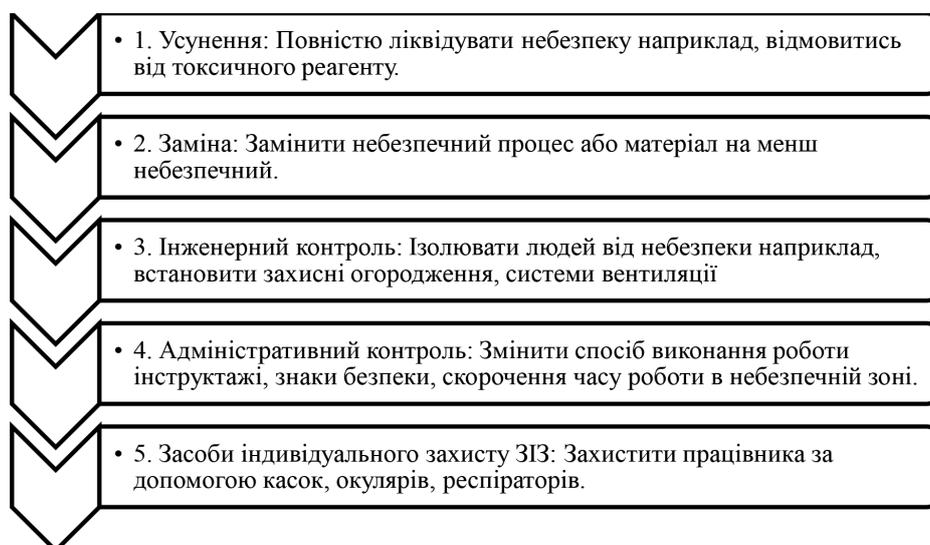
Ідентифікація небезпек: Постійний процес виявлення потенційних джерел шкоди на всіх робочих місцях. Це включає регулярні аудити безпеки, аналіз робочих процедур та, що найважливіше, активне залучення працівників, які найкраще знають небезпеки своєї ділянки.

Оцінка ризиків: Визначення ймовірності виникнення небезпечної події та тяжкості її потенційних наслідків. Це дозволяє пріоритезувати загрози та концентрувати ресурси на найкритичніших напрямках.

Розробка заходів управління: Впровадження захисних бар'єрів для мінімізації ризиків до прийняттого рівня. Найбільш ефективним інструментом тут є ієрархія контролю, яка пріоритезує заходи від найбільш до найменш надійних (див. Схему 1).

Схема 1

Ієрархія контролю ризиків



3. Інженерний контроль: Іzolювати людей від небезпеки наприклад, встановити захисні огороження, системи вентиляції

Моніторинг та перегляд: Постійний контроль за ефективністю впроваджених заходів та їх регулярне коригування відповідно до змін у технологіях, процедурах чи зовнішніх умовах.

Культура безпеки як основа системи. Навіть найдосконаліші технічні системи та процедури не працюватимуть без головного елемента – **культури безпеки**. Це система спільних цінностей та переконань, де кожен працівник, від керівника до робітника, усвідомлює свою відповідальність за безпеку та активно бере участь у запобіганні інцидентам.

Відомий дослідник Джеймс Різон у своїй праці «Managing the Risks of Organizational Accidents» [21] запропонував так звану «модель швейцарського сиру» для пояснення причин виникнення аварій. Вона наочно демонструє важливість культури безпеки (див. Таблицю 4).

Висновок моделі: аварія є не результатом однієї помилки, а наслідком збігу прихованих недоліків на кількох рівнях захисту одночасно. Коли «дірки» в усіх шарах на мить збігаються, вони створюють пряму траєкторію для реалізації загрози.

Кожен «шар сиру» це захисний бар'єр: технологія, процедура, навчання. «Дірки» це приховані недоліки або помилки. Аварія стається лише тоді, коли дірки в усіх шарах збігаються, відкриваючи прямий шлях для загрози. Висока культура безпеки спрямована на те, щоб постійно виявляти та «латати» ці дірки на кожному рівні, роблячи такий збіг практично неможливим.

Цифрові технології для підвищення рівня безпеки. Перехід до проактивної, ризик-орієнтованої парадигми управління безпекою нерозривно пов'язаний з концепцією Індустрії 4.0 [22, 23], що передбачає створення інтегрованих кіберфізичних систем на виробництві. Саме цифровізація виступає технологічним фундаментом, що дозволяє змістити фокус з аналізу ретроспективних показників кількість інцидентів на моніторинг та прогнозування на основі проспективних даних у реальному часі.

Рівень збору даних: Інтернет речей IoT. Основою цифрової системи безпеки є рівень збору даних, де технології IoT оцифровують фізичне середовище, перетворюючи стан обладнання, робочої зони та персоналу на безперервний потік об'єктивної інформації [24, 25] (див. Таблицю 5).

Таблиця 4

Модель «швейцарського сиру» для аналізу причин аварій

Захисний бар'єр «Шар сиру»	Призначення бар'єра	Приклад недоліку «Дірка в сиру»	Як недолік сприяє аварії
Технологічний бар'єр	Автоматично запобігати небезпечним відхиленням або сповіщати про них	Несправність датчика, збій у програмному забезпеченні, прихований дефект обладнання	Система не спрацювала, і початкова проблема залишилася непоміченою персоналом
Організаційний бар'єр: процедури та інструкції	Регламентувати правильні та безпечні дії персоналу в стандартних та аварійних ситуаціях	Нечітко прописана інструкція, застарілий регламент, свідоме порушення правил заради економії часу	Працівник діяв неправильно, оскільки інструкція була незрозумілою або він вирішив її проігнорувати
Бар'єр компетентності: навчання та тренування	Забезпечити, щоб персонал знав правила та вмів діяти правильно, особливо в умовах стресу	Формальне проведення навчання, недостатня кількість практичних тренувань наприклад, на VR-тренажерах, відсутність перевірки знань	У критичний момент працівник розгубився або прийняв хибне рішення, бо не мав відпрацьованих навичок
Бар'єр нагляду: контроль та аудит	Перевіряти, чи дотримуються процедури, чи справне обладнання, та чи ефективне навчання	Недостатній контроль з боку керівництва, ігнорування «дрібних» порушень, формальні аудити «для галочки»	Систематичні порушення та недоліки стали нормою, і ніхто не звернув на них увагу до того, як сталася аварія

Таблиця 5

Застосування IoT для моніторингу безпеки

Компонент системи	Технологія	Функція у системі безпеки
Стационарне обладнання	Датчики вібрації, температури, тиску, акустичні сенсори, датчики корозії	Безперервний моніторинг «здоров'я» обладнання, раннє виявлення відхилень та передаварійних станів
Робоча зона	Стационарні та портативні газоаналізатори	Миттєве виявлення витоків небезпечних газів метан, H ₂ S, автоматична активація систем тривоги та вентиляції
Персонал	Носимі пристрої: «розумні» каски, біометричні трекери, персональні газоаналізатори	Контроль місцезнаходження, умов у зоні дихання, фізіологічних показників: втома, стрес та фіксація падінь

Таблиця 6

Використання ШІ для прогнозування та контролю ризиків

Напрямок застосування	Опис технології	Вплив на безпеку
Предиктивне обслуговування	Моделі машинного навчання ML аналізують історичні та поточні дані з датчиків для розрахунку прогнозного часу до відмови обладнання	Перехід від реактивних/планових ремонтів до проактивного обслуговування «за станом», що запобігає аварійним зупинкам
Інтелектуальна відеоаналітика	Системи комп'ютерного зору в реальному часі аналізують відеопотоки з камер для ідентифікації небезпечних ситуацій	Автоматичний контроль за використанням ЗІЗ, дотриманням процедур, виявлення перших ознак задимлення або витоків

Таблиця 7

Імерсивні технології та моделювання в управлінні безпекою

Технологія	Сутність застосування	Ключова перевага для безпеки
Віртуальна реальність VR	Створення високореалістичних імерсивних симуляторів для відпрацювання дій в екстремальних ситуаціях	Формування у персоналу стійких практичних навичок м'язової пам'яті для дій в умовах стресу без ризику для життя
Доповнена реальність AR	Накладання цифрової інформації: схеми, інструкції на реальне обладнання через AR-окуляри	Мінімізація когнітивного навантаження та ймовірності помилки під час складних ремонтних робіт; можливість віддаленої допомоги експерта
Цифрові двійники Digital Twins	Створення точної віртуальної копії об'єкта, що синхронізується з ним у реальному часі	Можливість безпечного моделювання сценаріїв «що, якщо?», тестування планів реагування та оптимізація технологічних процесів з точки зору безпеки

Рівень аналізу: Штучний інтелект AI та предиктивна аналітика. Зібрані масиви даних Big Data обробляються на аналітичному рівні за допомогою алгоритмів штучного інтелекту, які виявляють приховані закономірності та будують прогнози [26] (див. Таблицю 6).

Рівень взаємодії та моделювання: VR/AR та цифрові двійники. На цьому рівні відбувається ефективна взаємодія людини з цифровою системою та використовується комплексне моделювання для всебічного аналізу ризиків (див. Таблицю 7).

Синергетичне поєднання цих технологічних рівнів створює єдину інтелектуальну екосистему, яка трансформує управління безпекою з нормативно-реактивної функції в проактивний, предиктивний та невід’ємний компонент забезпечення стійкості та ефективності виробництва.

Кількісний аналіз інтегрованих ризиків. Після ідентифікації небезпек та впровадження цифрових інструментів для збору даних, наступним логічним кроком є перехід до кількісної оцінки ризиків. Якісних категорій «високий», «середній», «низький» недостатньо для прийняття обґрунтованих управлінських рішень, особливо коли мова йде про інвестиції в дорогі системи безпеки. Математичне моделювання дозволяє об’єктивно розрахувати рівні ризику, порівняти ефективність різних захисних заходів та визначити пріоритети для мінімізації загроз.

Імовірнісна оцінка ризиків Probabilistic Risk Assessment, PRA. Основою кількісного аналізу є імовірнісний підхід, який визначає ризик як функцію двох змінних: імовірності виникнення небажаної події та тяжкості її наслідків. Класична формула ризику має вигляд:

$$R = PC,$$

де R – ризик (кількісна міра, наприклад, очікувані фінансові втрати на рік або індивідуальний ризик загибелі); P – імовірність (частота виникнення ініціюючої події та імовірність відмови захисних систем); C – наслідки (кількісна оцінка шкоди: фінансові збитки, площа забруднення, кількість потенційних жертв).

Для розрахунку цих компонентів використовуються спеціалізовані математичні та логічні методи.

Методи аналізу «Дерево відмов» та «Дерево подій». Для розрахунку ймовірності P складних аварій застосовуються два взаємодоповнюючі методи: аналіз дерева відмов Fault Tree Analysis [27], FTA та аналіз дерева подій Event Tree Analysis, ETA [28] (див. Таблицю 8).

Таблиця 8

Порівняльний аналіз методів FTA та ETA

Характеристика	Аналіз дерева відмов FTA	Аналіз дерева подій ETA
Напрямок аналізу	Дедуктивний «зверху-вниз»	Індуктивний «знизу-вгору»
Початкова точка	Головна подія – аварія, наприклад, вибух резервуара	Ініціююча подія – відмова, наприклад, витік газу
Мета аналізу	Знайти всі можливі комбінації відмов обладнання та помилок персоналу, що призводять до аварії	Проаналізувати всі можливі сценарії розвитку аварії залежно від спрацювання чи відмови систем безпеки
Результат	Ймовірність настання головної події	Ймовірності та наслідки кожного з можливих кінцевих сценаріїв

Моделювання фізичних наслідків аварій. Для кількісної оцінки наслідків C використовуються математичні моделі, що описують фізичні процеси під час аварії. Вони дозволяють спрогнозувати зони ураження.

Моделі розсіювання: Для прогнозування поширення хмари токсичного або горючого газу використовуються моделі, від простих гаусових моделей для відкритих просторів до складних CFD-моделей обчислювальна гідродинаміка, які враховують рельєф місцевості та наявність перешкод.

Моделі пожеж та вибухів: Для оцінки наслідків займання розраховуються параметри ураження, як-от теплове випромінювання від пожеж та надлишковий тиск ударної хвилі під час вибуху наприклад, за допомогою моделі TNT-еквіваленту.

Комплексний приклад кількісної оцінки ризику. Розглянемо гіпотетичний приклад для ілюстрації методології.

Сценарій: Розгерметизація магістрального газопроводу високого тиску через корозію з подальшим вибухом парогазової хмари Vapour Cloud Explosion – VCE поблизу компресорної станції.

Крок 1: Розрахунок імовірності P за допомогою дерева подій ETA

Масштабний витік газу. Зі статистичних даних відомо, що частота такої події для даного типу трубопроводу складає $P_{init} = 1 \cdot 10^{-4}$ подій/рік. Чи відбулося негайне займання? Імовірність НЕ займання дорівнює 0.8. Чи спрацювала система виявлення витіку та аварійної зупинки? Імовірність відмови системи дорівнює 0.1. Чи знайшла хмара віддалене джерело запалювання до розсіювання? Імовірність дорівнює 0.2.

Розрахунок імовірності сценарію VCE: $P_{VCE} = P_{init} \times$ імовірність НЕ негайного займання \times імовірність відмови систем \times імовірність віддаленого займання $P_{VCE} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0.8 \cdot 0.1 \cdot 0.2 = 1.6 \cdot 10^{-6}$ подій/рік.

Крок 2: Розрахунок наслідків C за допомогою моделювання *Моделювання витоків та розсіювання*. За допомогою CFD-моделі розраховується, що в навколишньому середовищі утворилася хмара масою 5,000 кг метану, здатна до вибуху.

Моделювання вибуху. За моделлю TNT-еквіваленту розраховується енергія вибуху та прогноуються зони ураження. Розрахунок показує, що надлишковий тиск ударної хвилі перевищить 0.2 бар в радіусі 120 метрів.

Оцінка збитків. В цю зону потрапляє частина компресорної станції. Прямі збитки від руйнування обладнання та опосередковані збитки від простою оцінюються в $C = 40,000,000$ грн.

Крок 3: Розрахунок кінцевого ризику R

$R = P_{VCE} \cdot C = 1.6 \cdot 10^{-6} \cdot 40,000,000 = 64$ грн/рік. Кількісний ризик, пов'язаний зі сценарієм вибуху, становить 64 грн/рік. Ця цифра сама по собі не є великою, але вона дозволяє об'єктивно порівнювати різні ризики. Наприклад, якщо встановлення нової системи виявлення витоків вартістю 200,000 грн знизить імовірність відмови систем до 0.01 в 10 разів, новий ризик складе 6.4 грн/рік. Це дає змогу провести аналіз «витрати-вигоди» Cost-Benefit Analysis та прийняти економічно обгрунтоване рішення щодо інвестицій у безпеку.

Інтеграція ОП з ТБ та ЦЗ. В умовах сучасних викликів, зокрема воєнного стану, традиційна межа між охороною праці, що фокусується на виробничих ризиках, техногенної безпекою (ТБ) та цивільним захистом, що займаються зовнішніми загрозами, практично стирається. Підприємство нафтогазової галузі перестає бути лише місцем роботи; воно перетворюється на потенційне укриття та осередок стійкості для персоналу та, можливо, для місцевої громади. Ця зміна ролі вимагає фундаментального перегляду підходів до управління безпекою та створення єдиної, інтегрованої системи [9, 10].

Концептуальна модель інтегрованої системи управління безпекою. Запропонована концепція передбачає об'єднання трьох ключових компонентів в одну цілісну, синергетичну систему, де кожен елемент підсилює інші (див. Схему 2).

Схема 2



Синергетичний ефект. В рамках цієї моделі, наприклад, система оповіщення про витік газу Техногенна безпека інтегрується із системою оповіщення про повітряну тривогу, Цивільний захист, а навички надання першої допомоги Охорона праці доповнюються елементами тактичної медицини.

Практичні заходи інтеграції. Перехід до інтегрованої моделі вимагає реалізації комплексу практичних заходів, спрямованих на посилення стійкості підприємства (див. Таблицю 9).

Створення такої єдиної, стійкої та адаптивної системи управління безпекою є запорукою не лише збереження життя та здоров'я працівників, але й забезпечення стабільного функціонування стратегічно важливих підприємств нафтогазової галузі в умовах сучасних викликів.

Висновки:

1. Система управління безпекою в нафтогазовій галузі України функціонує в умовах безпрецедентної конвергенції ризиків, традиційних виробничих небезпек, посилених критичним зносом успадкованої інфраструктури, та прямих воєнних загроз, що перетворюють об'єкти на стратегічні цілі. Ця комплексна матриця загроз робить застарілі, реактивні підходи до охорони праці не просто неефективними, а й неприпустимими. Проведене дослідження обгрунтовує, що адекватною відповіддю на ці виклики є фундаментальний перехід до проактивної, ризик-орієнтованої моделі управління. Однак, цей перехід вимагає не лише зміни філософії, а й впровадження науково-обгрунтованих інструментів аналізу. Важливим висновком є необхідність

Ключові напрямки та заходи інтегрованої безпеки

Напрямок	Ключові заходи	Мета та очікуваний результат
Інфраструктура захисту	Проведення аудиту наявних споруд цивільного захисту. Облаштування укриттів відповідно до сучасних вимог: вентиляція, запаси води, медикаменти, автономні джерела живлення та зв'язку	Забезпечення фізичного захисту максимальної кількості персоналу під час повітряних тривог та інших надзвичайних ситуацій
Системи оповіщення та зв'язку	Створення дублюючих, автономних систем оповіщення про повітряну тривогу, хімічну та радіаційну небезпеку. Забезпечення стійкого резервного зв'язку (спутниковий, радіо)	Гарантоване та своєчасне доведення інформації про загрози до всього персоналу, навіть в умовах блекауту чи пошкодження основних мереж
Підготовка персоналу	Проведення регулярних комплексних тренінгів зі сценаріями евакуації, пожежогасіння, надання першої домедичної допомоги з елементами тактичної медицини	Формування у працівників стійких практичних навичок для правильних та скоординованих дій у стресових умовах, мінімізація паніки
Планування та реагування	Розробка та регулярне оновлення чітких, зрозумілих алгоритмів дій, планів, реагування для різних сценаріїв: від ракетного удару до тривалого знеструмлення або кібератаки	Наявність у кожного керівника та працівника чіткого розуміння своєї ролі та послідовності дій, що забезпечує керованість ситуації та мінімізацію наслідків

доповнення якісних оцінок методами кількісного аналізу ризиків QRA, зокрема імовірнісної оцінки, що базується на математичному моделюванні з використанням таких інструментів, як аналіз «дерева відмов» FTA та «дерева подій» ETA. Це дозволяє об'єктивізувати управлінські рішення та оптимізувати розподіл ресурсів на заходи безпеки.

2. Практична реалізація запропонованої сучасної інтегрованої системи безпеки нафтогазової галузі неможлива без глибокої цифрової трансформації. Синергетичне поєднання технологій Індустрії 4.0 створює єдину інтелектуальну екосистему безпеки. Мережа Інтернету речей IoT виступає як система збору первинних даних, що в реальному часі передаються аналітичному ядру на базі штучного інтелекту, яке забезпечує предикативне прогнозування відмов обладнання та моніторинг дотримання процедур. Імерсивні технології VR/AR кардинально підвищують ефективність навчання персоналу та знижують імовірність помилки під час виконання робіт. Апогеєм цієї інтеграції є концепція цифрового двійника, що слугує віртуальним полігоном для всебічного моделювання та аналізу найскладніших аварійних сценаріїв.

3. Ключовим висновком роботи є те, що в сучасних умовах межа між охороною праці, техногенною безпекою та цивільним захистом повністю стирається. Ефективне управління безпекою нафтогазової галузі можливе лише в рамках єдиної інтегрованої системи, яка об'єднує ці три компоненти. Створення такої адаптивної та стійкої моделі, що включає як інженерні засоби контролю виробничих ризиків, так і заходи цивільного захисту від зовнішніх загроз, є безальтернативним шляхом для забезпечення не лише захисту життя та здоров'я працівників, але й гарантування стійкості функціонування стратегічних підприємств, що є критично важливим для енергетичної та національної безпеки України.

Перспективи подальших досліджень. Проведений аналіз сучасних підходів до управління безпекою в нафтогазовій галузі відкриває низку перспективних напрямків для подальших наукових досліджень, спрямованих на поглиблення та практичну імплементацію запропонованих концепцій:

Розробка методології кількісної оцінки інтегрованих ризиків потребує подальшого розроблення комплексних математичних моделей, які б дозволяли кількісно оцінювати не просто окремі ризики, а їхню взаємодію та каскадні ефекти. Особливо актуальним є моделювання сценаріїв, де кібератака або фізичне ураження об'єкта (воєнний ризик) призводить до розвитку великої промислової аварії (техногенний ризик).

Економічне обґрунтування інвестицій у цифрові системи безпеки потребує розроблення чітких моделей розрахунку повернення інвестицій Return on Investment, ROI для комплексних цифрових екосистем IoT + AI + Digital Twins. Такі моделі мають враховувати не лише прямий ефект від запобігання аваріям, але й опосередковані вигоди, як-от підвищення операційної ефективності та зростання стійкості бізнесу.

Формування культури безпеки в умовах тривалого стресу потребує досліджень психологічної стійкості та когнітивних процесів персоналу, що працює в умовах постійної воєнної загрози. Необхідно розробити та валідувати програми психосоціальної підтримки та тренінгів, спрямованих на збереження високого рівня концентрації та адекватного сприйняття ризиків в екстремальних умовах.

Адаптація нормативно-правової бази існуючого законодавства України у сферах охорони праці та цивільного захисту потребує оновлення для адекватної відповіді на нові виклики. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку пропозицій щодо регулювання використання штучного інтелекту в системах безпеки, стандартів для цифрових двійників та формалізації протоколів безпеки для підприємств критичної інфраструктури в умовах воєнного стану.

Список використаних джерел:

1. Річний звіт 2024 / Центр Разумкова. Київ, 2025. URL: <https://razumkov.org.ua/images/2025/06/16/2025-ZVIT-2024-UKR-10-3.pdf>
2. Возняк О. Г. Нафтогазова галузь як чинник енергетичної безпеки та економічного зростання України. *Науковий вісник Львівського державного університету внутрішніх справ*. Серія економічна. 2020. № 2. С. 45–53.
3. Карп І. М., Забіяка І. В. Стратегічні напрями розвитку нафтогазової галузі України в контексті забезпечення енергетичної незалежності. *Економіка та держава*. 2021. № 5. С. 25–30.
4. Завгородній Р., Шмиголь Н. Сучасний стан та проблеми розвитку нафтогазового сектору України. *Підприємництво та інновації*. 2019. № 9. С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.37320/2415-3583/9.3>
5. Енергетична безпека України: методологія системного аналізу та стратегічного планування : аналіт. доп. / О. М. Суходоля та ін. ; за заг. ред. О. М. Суходолі. Київ : НІСД, 2020. 178 с.
6. Погребняк В. Г., Волошин В. С. Екологічна технологія створення водозахисних екранів. Донецьк : Ноулідж, 2010. 482 с.
7. Ахірєй М. М. Підвищення ефективності управління безпекою праці у нафтогазовій промисловості на основі поведінкової безпеки : дис. ... д-ра філософії : 263 / Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро, 2023. 166 с. URL: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/165577>
8. Звіт за результатами вивчення потреб та очікувань заінтересованих сторін щодо імплементації ППВГ в Україні / ППВГ в Україні. 2023. URL: <https://eiti.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/Report-as-result-of-needs-and-expectations-identification.pdf>
9. Pogrebnyak V. G., Kondrat O. R., Perkun I. V., Pogrebnyak A. V. Трансформація підходів до безпеки праці та цивільного захисту: виклики та рішення в період дії воєнного стану. *Галузеве машинобудування, будівництво*. 2025. № 1(65). 13 с.
10. Погребняк В. Г., Кондрат О. Р., Перкун І. В., Погребняк А. В. Моделювання професійних і воєнних ризиків в системі безпеки праці та цивільного захисту на об'єктах нафтогазової галузі. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2025. № 20(77). 9 с.
11. Polukarov O. I., Prakhovnik N. A., Polukarov Yu. O., Mitiuk L. O., Demchuk H. V. Assessment of occupational risks: New approaches, improvement, and methodology. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2021. Vol. 8, no. 11. P. 79–86. DOI: <https://doi.org/10.21833/ijaas.2021.11.011>
12. Шикеринець В. В., Базіняк І. І., Маланюк Т. З. Безпека життєдіяльності : навч.-метод. посіб. Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2022. 30 с.
13. Радецький І. І., Горобинський С. В., Костянян В. Р. та ін. Удосконалення системи управління безпеки виробництва підприємств нафтогазового комплексу. *Нафтова і газова промисловість*. 2012. № 6. С. 16–20.
14. Охорона праці та цивільний захист : підручник / О. Г. Левченко та ін. ; за ред. О. Г. Левченка. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 420 с.
15. Пащенко О. В., Перкун І. В., Погребняк В. Г. Підвищення безпеки праці при проведенні гідро-струминної водополімерної перфорації свердловин. *Системи та технології*. 2025. Vol. 69, no. 1. P. 176–186. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.21>
16. Погребняк В. Г., Чудик І. І., Кондрат О. Р., Перкун І. В., Шиманський В. Я. Реофізика водополімерної перфорації нафтогазових свердловин. Івано-Франківськ : Фоліант, 2025. 308 с.
17. Pogrebnyak A. V., Perkun I. V., Pogrebnyak V. G., Shymanskyi V. Ya. Improvement of labour safety and safety of life activities by increasing the efficiency of water fire extinguishing systems. *Системи та технології*. 2025. Vol. 69, no. 1. P. 187–193. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.22>
18. Ратушняк Г. С., Ободянська О. І. Управління змістом проєктів із забезпечення надійності зовнішніх газорозподільних мереж : монографія. Вінниця, 2014. 130 с.
19. Рибицький І. В. Підвищення ефективності експлуатації газопроводів шляхом удосконалення методів і засобів діагностування їх технічного стану : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.13 / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2021. URL: https://nung.edu.ua/sites/default/files/2021-02/Dis_doc_Rybitsky.pdf
20. Ниркова Л. І., Лісовий П. Є., Гончаренко Л. В., Осадчук С. О., Костін В. А. Закономірності корозійного розтріскування трубної сталі 09Г2С за катодної поляризації в модельному ґрунтовому середовищі. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2021. Т. 22, № 4. С. 828–836. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.22.4.828-836>
21. Reason J. Managing the Risks of Organizational Accidents. Aldershot : Ashgate, 1997. 252 p. URL: <https://archive.org/details/managingrisksof0000reas>
22. Ярмоленко Ю. О. Теоретичні засади створення платформи агроцифрової кооперації аграрного виробництва. *Ефективна економіка*. 2019. № 2. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.2.64>
23. Вітрик І. В. Цифрова трансформація підприємств нафтогазової промисловості для підвищення ефективності їх діяльності. *Економіка і регіон*. 2024. № 4(95). С. 207–212. DOI: [https://doi.org/10.26906/EiR.2024.4\(95\).3627](https://doi.org/10.26906/EiR.2024.4(95).3627)

24. Луценко В. Р., Пікуля Т. О. Правове забезпечення цифрової трансформації в Україні. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. Серія: Право. 2024. Вип. 81, ч. 1. С. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.81.1.9>

25. Колодяжний М. Г. Стратегія Vision Zero: уроки для України : монографія. Харків : Право, 2022. 300 с.

26. Довбешко С. В., Тольопа С. В., Шестак Я. В. Застосування методів інтелектуального аналізу даних для побудови систем виявлення атак. *Сучасний захист інформації*. 2019. № 1. С. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2019.010615>

27. Про затвердження Методики оцінювання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру та пожеж : наказ М-ва внутрішніх справ України від 13.10.2023 р. № 836 : зареєстр. в М-ві юстиції України 02.11.2023 р. за № 1905/40961. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1905-23>

28. Караєва Н. В., Варава І. В. Методи і засоби оцінки ризику здоров'ю населення від забруднення атмосферного повітря : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 56 с. URL: https://apeps.kpi.ua/downloads/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%94%D0%B2%D0%B0_%D0%92%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B0_%D0%BE%D1%86%D1%96%D0%BD_%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D1%83.pdf

References:

1. Razumkov Centre. (2025). *Richnyi zvit 2024* [Annual report 2024]. Retrieved from: <https://razumkov.org.ua/images/2025/06/16/2025-ZVIT-2024-UKR-10-3.pdf>

2. Vozniak, O. H. (2020). Naftohazova haluz yak chynnyk enerhetychnoi bezpeky ta ekonomichnoho zrostantia Ukrainy [Oil and gas industry as a factor of energy security and economic growth of Ukraine]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu vnutrishnikh sprav. Serii ekonomichna*, (2), 45–53.

3. Karp, I. M., & Zabiika, I. V. (2021). Stratehichni napriamy rozvytku naftohazovoi haluzi Ukrainy v konteksti zabezpechennia enerhetychnoi nezalezhnosti [Strategic directions of development of the oil and gas industry of Ukraine in the context of ensuring energy independence]. *Ekonomika ta derzhava*, (5), 25–30.

4. Zavorodnii, R., & Shmyhol, N. (2019). Suchasnyi stan ta problemy rozvytku naftohazovoho sektoru Ukrainy [Current state and problems of development of the oil and gas sector of Ukraine]. *Pidpriemnytstvo ta innovatsii*, (9), 24–30. <https://doi.org/10.37320/2415-3583/9.3>

5. Sukhodolia, O. M., Kharazishvili, Yu. M., Bobro, D. H., Smenkovskiy, A. Yu., Riabtsev, H. L., & Zavorodnia, S. P. (2020). Enerhetychna bezpeka Ukrainy: metodolohiia systemnoho analizu ta stratehichnoho planuvannia [Energy security of Ukraine: methodology of system analysis and strategic planning] (O. M. Sukhodolia, Ed.). NISD.

6. Pogrebnyak, V. G., & Voloshyn, V. S. (2010). Ekolohichna tekhnolohiia stvorennia vodozakhysnykh ekraniv [Ecological technology for creating water-protective screens]. Noulidzh.

7. Akhirei, M. M. (2023). Pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia bezpekoiu pratsi u naftohazovii promyslovosti na osnovi povedinkovoi bezpeky [Increasing the efficiency of occupational safety management in the oil and gas industry based on behavioral safety] [Doctor of Philosophy dissertation, Dnipro University of Technology]. Retrieved from: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/165577>

8. EITI Ukraine. (2023). Zvit za rezultatamy vyvchennia potreb ta ochikuvan zainteresovanykh storin shchodo implementatsii IPVH v Ukraini [Report on the results of the study of the needs and expectations of stakeholders regarding the implementation of EITI in Ukraine]. Retrieved from: <https://eiti.org.ua/wp-content/uploads/2023/01/Report-as-result-of-needs-and-expectations-identification.pdf>

9. Pogrebnyak, V. G., Kondrat, O. R., Perkun, I. V., & Pogrebnyak, A. V. (2025). Transformatsiia pidkhodiv do bezpeky pratsi ta tsyvilnoho zakhystu: vyklyky ta rishennia v period dii voiennoho stanu [Transformation of approaches to occupational safety and civil protection: challenges and solutions during the martial law]. *Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 1(65), 13.

10. Pogrebnyak, V. G., Kondrat, O. R., Perkun, I. V., & Pogrebnyak, A. V. (2025). Modeliuvannia profesiinykh i voiennykh ryzykiv v systemi bezpeky pratsi ta tsyvilnoho zakhystu na ob'ektakh naftohazovoi haluzi [Modeling of occupational and military risks in the system of occupational safety and civil protection at oil and gas industry facilities]. *Prykarpatskyi visnyk NTSH*, (20/77), 9.

11. Polukarov, O. I., Prakhovnik, N. A., Polukarov, Yu. O., Mitiuk, L. O., & Demchuk, H. V. (2021). Assessment of occupational risks: New approaches, improvement, and methodology. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 8(11), 79–86. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2021.11.011>

12. Shykerynets, V. V., Baziniak, I. I., & Malaniuk, T. Z. (2022). *Bezpeka zhyttiediialnosti* [Life safety]. Vasyl Stefanyk Precarpathian National University.

13. Radetskyi, I. I., Horobynskyi, S. V., & Kostanian, V. R. (2012). Udoshkonalennia systemy upravlinnia bezpeky vyrobnytstva pidpriemstv naftohazovoho kompleksu [Improvement of the production safety management system of oil and gas complex enterprises]. *Naftova i hazova promyslovist*, (6), 16–20.

-
14. Levchenko, O. H., Polukarov, O. I., Zatsarnyi, V. V., Polukarov, Yu. O., & Zemlianska, O. V. (2019). Okhorona pratsi ta tsyvilnyi zakhyst [Occupational safety and civil protection] (O. H. Levchenko, Ed.). Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
15. Pashchenko, O. V., Perkun, I. V., & Pogrebnyak, V. G. (2025). Pidvyshchennia bezpeky pratsi pry provedenni hidrostrumynnoi vodopolimernoї perforatsii sverdlovyn [Increasing labor safety during hydro-jet water-polymer perforation of wells]. *Systemy ta tekhnologii*, 69(1), 176–186. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.21>
16. Pogrebnyak, V. G., Chudyk, I. I., Kondrat, O. R., Perkun, I. V., & Shymanskyi, V. Ya. (2025). *Reofizyka vodopolimernoї perforatsii naftohazovykh sverdlovyn* [Rheophysics of water-polymer perforation of oil and gas wells]. Foliant.
17. Pogrebnyak, A. V., Perkun, I. V., Pogrebnyak, V. G., & Shymanskyi, V. Ya. (2025). Improvement of labour safety and safety of life activities by increasing the efficiency of water fire extinguishing systems. *Systemy ta tekhnologii*, 69(1), 187–193. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.22>
18. Ratushniak, H. S., & Obodianska, O. I. (2014). *Upravlinnia zmistom proektiv iz zabezpechennia nadiinosti zovnishnikh hazorozpodilnykh merezh* [Content management of projects to ensure the reliability of external gas distribution networks]. Vinnitsia.
19. Rybitskyi, I. V. (2021). *Pidvyshchennia efektyvnosti ekspluatatsii hazoprovodiv shliakhom udoskonalennia metodiv i zasobiv diahnostuvannia yikh tekhnichnoho stanu* [Improving the efficiency of gas pipeline operation by improving methods and means of diagnosing their technical condition] [Doctoral dissertation, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas]. Retrieved from: https://nung.edu.ua/sites/default/files/2021-02/Dis_doc_Rybitsky.pdf
20. Nyrkova, L. I., Lisovyi, P. E., Goncharenko, L. V., Osadchuk, S. O., & Kostin, V. A. (2021). Regularities of stress-corrosion cracking of pipe steel 09G2S at cathodic polarization in a model soil environment. *Physics and Chemistry of Solid State*, 22(4), 828–836. <https://doi.org/10.15330/pcss.22.4.828-836>
21. Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Ashgate. Retrieved from: <https://archive.org/details/managingrisksofo0000reas>
22. Yarmolenko, Yu. O. (2019). Teoretychni zasady stvorennia platformy ahrotsyfrovoi kooperatsii ahrarynoho vyrobnytstva [Theoretical principles of creating a platform for agro-digital cooperation of agricultural production]. *Efektivna ekonomika*, (2). <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2019.2.64>
23. Vitryk, I. V. (2024). Tsyfrova transformatsiia pidpriemstv naftohazovoi promyslovosti dlia pidvyshchennia efektyvnosti yikh diialnosti [Digital transformation of oil and gas companies to improve their performance]. *Ekonomika i rehion*, (4/95), 207–212. [https://doi.org/10.26906/EiR.2024.4\(95\).3627](https://doi.org/10.26906/EiR.2024.4(95).3627)
24. Lutsenko, V. R., & Pikulia, T. O. (2024). Pravove zabezpechennia tsyfrovoi transformatsii v Ukraini [Legal support for digital transformation in Ukraine]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. Seriya Pravo*, 81(1), 61–67. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.81.1.9>
25. Kolodiazhnyi, M. H. (2022). Stratehiia Vision Zero: uroky dlia Ukrainy [Strategy Vision Zero: lessons for Ukraine]. Pravo.
26. Dovbeshko, S. V., Toliupa, S. V., & Shestak, Ya. V. (2019). Zastosuvannia metodiv intelektualnoho analizu danykh dlia pobudovy system vyivlennia atak [Application of data mining methods for building attack detection systems]. *Suchasnyi zakhyst informatsii*, (1), 6–15. <https://doi.org/10.31673/2409-7292.2019.010615>
27. Ministry of Internal Affairs of Ukraine. (2023). *Pro zatverdzhennia Metodyky otsiniuvannia ryzykiv vynyknennia nadzvychnykh sytuatsii tekhnohennoho kharakteru ta pozhezh* [On approval of the Methodology for assessing risks of man-made emergencies and fires] (Order No. 836). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1905-23>
28. Karaieva, N. V., & Varava, I. V. (2018). Metody i zasoby otsinky ryzyku zdoroviu naselennia vid zabrudnennia atmosfernoho povitria [Methods and means of assessing the risk to public health from air pollution]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Retrieved from: https://apeps.kpi.ua/downloads/%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%94%D0%B2%D0%B0_%D0%92%D0%B0%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B0_%D0%BE%D1%86%D1%96%D0%BD_%D1%80%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D0%BA%D1%83.pdf

Дата першого надходження статті до видання: 02.12.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.12.2025

Дата публікації (оприлюднення) статті 27.01.2026