

УДК 331.45:614.8

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-7-33>

РОЗРАХУНОК РИЗИКУ ТРАВМАТИЗМУ ПРАЦІВНИКІВ ВІД ВТОМИ

Столбченко Олена Володимирівна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-2003-4382

Лісовицька Ірина Анатоліївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;
старший науковий співробітник лабораторії з безпеки життєдіяльності,
інженерії та інших технічних досліджень
Дніпропетровського науково-дослідного інституту судових експертиз
ORCID ID: 0000-0002-9599-3492

Надточий Володимир Валентинович,

старший викладач кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0003-3987-5608

Лапко Кирило Андрійович,

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0008-3984-686X

Мета дослідження – виявлення та математичне обґрунтування причинно-наслідкового зв'язку між розвитком втоми у працівників об'єктів критичної інфраструктури та зростанням рівня виробничого травматизму.

Методика: Використано адаптовану модель «швейцарського сиру» для розрахунку ймовірності відмови захисних бар'єрів. Встановлено, що ймовірність відмови бар'єрів зростає в 4–16 разів під впливом військових та психосоціальних чинників.

У статті проведено кількісну оцінку ризику виробничого травматизму працівників критичної інфраструктури, спричиненого хронічною втомою. Для моделювання використано адаптовану модель «швейцарського сиру» у поєднанні з методиками Layer of Protection Analysis (LOPA) та Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART). Визначено ймовірності відмови організаційних, фізіологічних, діагностичних та технічно-наглядних бар'єрів у стресових умовах воєнного стану. Проведено розрахунок коефіцієнтів зростання ймовірності помилок під впливом військових, метеорологічних та психосоціальних чинників. Встановлено, що загальний ризик травматизму сягає 3,6–16,8% на одну критичну операцію, що відповідає критично неприйнятному рівню.

Результати: Загальний ризик травматизму становить 3,6–16,8% на одну критичну операцію, що відповідає критично неприйнятному рівню. Доведено, що чинна організація праці (60-годинний робочий тиждень, відсутність ротації) є основним детермінантом зростання травматизму в енергетичному секторі України у 2025–2026 роках.

Наукова новизна: Адаптація моделі «швейцарського сиру» для оцінки конвергенції військових, метеорологічних та психосоціальних чинників.

Практична цінність: Розроблено рекомендації для збереження кадрового потенціалу, зокрема обов'язкова ротація, медичний скринінг, перегляд Закону № 2136-IX.

Ключові слова: втома, ризик травматизму, модель «швейцарського сиру», працівники, критична інфраструктура, воєнний стан.

Stolbchenko Olena, Lisovytska Irina, Nadtochy Volodymyr, Lapko Kyrylo. Calculation of the risk occupational injury due to fatigue

The purpose of the study is to identify and mathematically substantiate the cause-and-effect relationship between the development of fatigue in workers of critical infrastructure facilities and the increase in the level of occupational injuries.

Methodology: An adapted Swiss cheese model was used to calculate the probability of failure of protective barriers. It was found that the probability of failure of barriers increases by 4–16 times under the influence of military and psychosocial factors.

The article provides a quantitative assessment of the risk of occupational injuries of critical infrastructure workers caused by chronic fatigue. An adapted Swiss cheese model was used for modeling in combination with the Layer of Protection Analysis (LOPA) and Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) methods. The probabilities of failure of organizational, physiological, diagnostic, and technical and supervisory barriers in the stressful conditions of martial law were determined. The coefficients of error probability growth under the influence of military, meteorological, and psychosocial factors were calculated. It was established that the total risk of injury reaches 3.6–16.8% per critical operation, which corresponds to a critically unacceptable level.

Results: The overall risk of injury is 3.6–16.8% per critical operation, which corresponds to a critically unacceptable level. It is proven that the current labor organization (60-hour work week, no rotation) is the main determinant of the increase in injury rates in the energy sector of Ukraine in 2025–2026.

Scientific novelty: Adaptation of the «Swiss Cheese Model» model to assess the convergence of military, meteorological and psychosocial factors.

Practical value: Recommendations have been developed to preserve personnel potential, including mandatory rotation, medical screening, and revision of Law No. 2136-IX.

Key words: *fatigue, injury risk, Swiss Cheese model, workers, critical infrastructure, martial law.*

Актуальність. У сучасних умовах повномасштабної збройної агресії російської федерації проти України проблема зниження ризику травматизму від втоми працівників набуває виняткової гостроти та стратегічного значення для національної безпеки, стабільності економіки та збереження людського капіталу. Воєнний стан радикально трансформує умови праці, посилюючи традиційні виробничі ризики психоемоційним напруженням, дефіцитом кадрових ресурсів, подовженим робочим часом та постійною загрозою бойових дій. За даними системного аналізу професійного здоров'я населення України, у 2024 році на підприємствах країни травми отримали 3509 працівників, що на 405 осіб більше порівняно з 2023 роком, а кількість випадків зі смертельними наслідками склала 493 (зростання на $30,40 \pm 2,07\%$ від початку війни). За період 2022–2024 років зафіксовано 2157 випадків травмування працівників під час виконання обов'язків у зоні бойових дій, з яких 592 (27,4%) мали летальні наслідки; медіанне значення коефіцієнта смертельних випадків у таких умовах сягнуло 0.30 проти 0.06 у мирний час.

Одним із провідних чинників зростання виробничого травматизму є хронічна втома працівників, спричинена емоційним виснаженням та вигоранням [1;2;3]. Воєнні умови – постійні повітряні тривоги, інформаційне перевантаження, порушення сну, стрес від загрози життю та необхідність працювати в умовах кадрового дефіциту - призводять до когнітивної втоми, зниження концентрації уваги, уповільнення реакції та некритичного сприйняття ризиків. Емоційне виснаження проявляється у швидкій втомлюваності,

дратівливості, порушеннях пам'яті та працездатності, що безпосередньо підвищує ймовірність аварій і нещасних випадків на виробництві [4;5]. Традиційні підходи до управління ризиками, розроблені для мирного часу, не враховують специфіку воєнних факторів, таких як посттравматичний стресовий розлад і хронічне психоемоційне перевантаження, що робить існуючі нормативно-правові механізми охорони праці недостатньо ефективними [6].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю наукового обґрунтування нових методів і технологій зниження ризику травматизму від втоми працівників саме в умовах воєнного стану. Збереження трудових ресурсів у критичних галузях (енергетика, транспорт, оборонна промисловість, агропромисловий комплекс) є запорукою економічної стійкості та обороноздатності держави. Водночас проблема залишається малодослідженою: відсутні комплексні моделі оцінки втоми з урахуванням воєнних стресорів, інтегровані системи моніторингу психофізіологічного стану працівників та адаптовані програми профілактики. Розробка таких заходів дозволить не лише зменшити кількість нещасних випадків, а й мінімізувати соціально-економічні втрати, пов'язані з інвалідизацією та смертністю трудового потенціалу.

Таким чином, дослідження проблеми зниження ризику травматизму від втоми працівників у воєнний час є не лише науково обґрунтованим, а й соціально значущим завданням, що відповідає стратегічним пріоритетам державної політики у сфері охорони праці, охорони здоров'я та національної безпеки України.

Аналіз літературних джерел. У статті [7] автори провели дослідження з визначення ризику втоми у різних галузях (авіація, транспорт, пожежники) на основі проведення тестування респондентів та виявлення їх фізіологічних змін в поведінці. В результаті були розроблені рекомендації для зміни в системі управління безпекою праці через покращення навчання працівників та посилення культури безпеки.

У статті [8] автори визначили, що втома значно погіршує контроль вестибулярного апарату працівника, що призводить до частих падінь на будівництві. На основі моделі DTW-аналізу було встановлено зростання ризику падіння через втому у 3–4 рази, особливо на слизьких поверхнях. Як рекомендації було зазначено необхідність забезпечення індивідуального моніторингу втоми через застосування фітнес-трекерів та впровадження ротації відповідно до важкості роботи.

У статті [9] автори розглянули причини накопичення втоми у працівників транспортної сфери. Зазначено, що втома є ключовим небезпечним чинником інцидентів та травм, а її накопичення підвищує ризик травмування на 50%. Автори наголошують на важливості застосування біоматематичних моделей для прогнозування втоми та обов'язковому обмеженні тривалості робочих змін.

У статті [10] автор розкриває теоретичні основи методу аналізу шарів захисту (LOPA), який дозволяє оцінити ефективність існуючих бар'єрів безпеки та визначити ймовірність виникнення небажаної події. Цей підхід є критично важливим для математичного моделювання ризиків, оскільки дозволяє кількісно оцінити кожну ланку захисної системи.

У статті [11] автори детально аналізують класичну модель «швейцарського сиру» (Swiss Cheese Model) та її застосування для аналізу людського чинника. Модель пояснює, як системні помилки та латентні умови на різних рівнях організації праці, збігаючись у часі, призводять до катастрофічних наслідків та травматизму.

Мета та методи дослідження.

Мета статті полягає у виявленні причинно-наслідкового зв'язку між втомою працівників та зростанням рівня виробничого травматизму в умовах екстремальних навантажень.

Методи дослідження. Для моделювання механізму виникнення травматизму використано модель «швейцарського сиру» (Swiss Cheese Model), яка пояснює виникнення інцидентів як результат проходження небезпеки крізь «отвори» (недоліки) у послідовних бар'єрах

захисту [11]. У дослідженні виокремлено чотири рівні (шари) захисту, що запобігають розвитку синдрому хронічної кумулятивної втоми:

- можливість відпочинку: організаційний бар'єр (планування графіків, ліміти робочого часу, обов'язкова ротація);
- фактичний відпочинок: фізіологічний бар'єр (реальне відновлення організму з урахуванням стресорів: шуму, холоду, переривання сну через обстріли);
- моніторинг втоми: діагностичний бар'єр (система раннього виявлення зниження концентрації та уповільнення реакцій через психофізіологічні тести);
- моніторинг помилок: технічно-наглядний бар'єр (відеоспостереження, системи контролю стану, взаємоконтроль у бригадах).

У контексті воєнного стану ці бар'єри зазнають деградації через дію специфічних чинників: законодавче скасування обмежень робочого часу (Закон № 2136-IX), кадрову кризу та постійний психологічний тиск.

Для кількісної оцінки ризику травматизму від ймовірності відмови зазначених шарів використано методику Layer of Protection Analysis (LOPA) [10], за якою загальний ризик обчислюється як добуток ймовірностей відмов кожного бар'єру:

$$R = \prod_{i=1}^n P_i$$

де R – ризик травматизму; P_i – ймовірність відмови, кожного з чотирьох захисних шарів представлених в моделі швейцарського сиру.

Для визначення ймовірності відмови шарів використовувалася комбінація емпіричних даних та рекомендаціями методу для оцінювання ризиків «Аналіз шарів захисту» (Layer of Protection Analysis - LOPA), що широко використовується оцінювання сценаріїв небезпечних подій. Передбачається, що величина відмови захисного шару знаходиться на рівні 0.05–0.1 (5–10%, за моделлю LOPA для простих дій працівників) при цьому оціночна шкала знаходиться в діапазоні від 0 до 1 [10]. У стресових умовах (втома, холод) ймовірність відмови захисного шару може знизитись до 0.4–0.5 (40–50%) [10].

На об'єктах критичної інфраструктури, де наявні латентні чинники (дефіцит часу) – ймовірність відмови може досягти до позначки 0,6–0,8. В таблиці 1 наведені величини відмов шарів захисту з відповідним обґрунтуванням наявних досліджень.

Для визначення величини збільшення ймовірності відмови захисного шару від впливу трьох груп небезпечних чинників скористаємось методом Human Error Assessment and

Reduction Technique (HEART), який дозволив встановити коефіцієнт зростання ймовірності відмови захисних шарів через прояв людської помилки за формулою:

$$\text{КПП} = \text{ЙПр} / \text{ЙПб}$$

де ЙПр – ймовірність реальної кількості помилок від наявних умов середовища; ЙПб - ймовірність базової кількості помилок.

Ймовірність людської помилки розраховуємо за формулою [1]:

$$\text{ЙП} = (\text{ЕПС} - 1) \times \text{АРОА} + 1$$

де ЙП – ймовірність людської помилки; ЕПС – умови за яких відбувається помилка;

АРОА – частка впливу середовища на помилку (оцінюється експертом від 0 до 1).

Для визначення оцінки ризику травматизму була побудована шкала з урахуванням рекомендацій ССРС та вимог до об'єктів критичної інфраструктури (ІЕС 61511, ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013). У мирний час базовий ризик за LOPA становить 0,00005–0,0001 (0,005–0,01%). Підвищення до 1% і вище вважається неприйнятним (табл. 2).

Результати дослідження.

Втома у працівників критичної інфраструктури (передусім енергетиків, ремонтних бригад, комунальників) – це стан стійкого фізичного, психоемоційного та когнітивного виснаження, який розвивається не від разової перевантаженості,



Рис. 1. Модель швейцарського сиру, яка пояснює як синдрому хронічної кумулятивної втоми у працівників призводить до зростанням рівня виробничого травматизму

Таблиця 1

Визначення величини ймовірності відмов захисних шарів

Захисний шар	Опис впливу небезпечних чинників	Метод для визначення ймовірності відмови	Оцінка ймовірності відмови	Джерела
можливість відпочинку	Відсутність планування графіків, ротації, військові атаки, дефіцит кадрів	Модель Layer of Protection Analysis	0.6–0.8	[10]
фактичний відпочинок	Відсутність повноцінних вихідних, скасування норм охорони праці	Біоматематичні моделі для втоми	0.5–0.7	[7]
моніторинг втоми	Соціальний тиск хронічний стрес	Модель Human Error Assessment and Reduction Technique	0.4–0.6	[1]
моніторинг помилок	ручна праця, відсутність моніторингу	Модель Fault Tree Analysis	0.3–0.5	[11]

Таблиця 2

Шкала для визначення рівня ризику травматизму

Рівень ризику	Ймовірність травматизму	Рекомендовані дії
Прийнятний	< 0.001 (< 0.1%)	Стандартний контроль, моніторинг
Прийнятний з перевіркою	0.001–0.01 (0,1–1%)	Додаткові заходи, постійний моніторинг втоми
Неприйнятний	0.01–0.05 (1–5%)	Невідкладне зниження ризику (ротація, обмеження змін)
Критично неприйнятний	> 0.05 (> 5%)	Негайна зупинка робіт / радикальні зміни організації праці

а від багаторічної накопиченої дії стресорів без достатнього відновлення [11]. Виділяють три групи небезпечних чинників воєнні, метрологічні, психосоціальні. Їх дія проявляється на першому етапі у зниженні когнітивних функцій: погіршення концентрації, реакції та прийняття рішень – ключових для безпечної роботи з високовольтним обладнанням чи в умовах холоду. Далі фізичної слабкості, що збільшить помилки у ручній праці, наприклад, вислизання інструментів через знижену моторику. Потім до емоційного вигорання, що знизить мотивацію до дотримання правил безпеки, підвищить ймовірність ризику аварій. Це призведе до підвищення базових значень ймовірності людської помилки від 4 до 16 разів,

що розраховано за моделлю HEART. Результати розрахунку коефіцієнта зростання ймовірності відмови захисних шарів наведені в таблиці 3.

В таблиці 4 наведений розрахунок діапазону ймовірності відмови захисних шарів на основі виявленого причинно-наслідкового зв'язку між етапами розвитку втоми і кількістю помилок.

В таблиці 5 представлені результати розрахунку ризику травматизму працівників критичної інфраструктури з урахуванням зменшення надійності захисних бар'єрів. Для визначення оптимістичного сценарію брали нижній діапазон ймовірності відмови захисного бар'єру, а для песимістичного – верхній, для номінального – значення по середині.

Таблиця 3

Результати розрахунків коефіцієнту зростання ймовірності відмови захисного бар'єру від впливу умов, які збільшують помилки при виконанні виробничих завдань

Умови, які призводять до збільшення помилок	Коефіцієнт зростання ймовірності відмови захисних шарів	Обґрунтування
Дефіцит часу для виявлення та виправлення помилки	12	60-годинний тиждень, відсутність ротації
Втома / фізичний стрес	6	хронічна втома, холод, важка ручна праця
Високий емоційний стрес	4	обстріли, соціальний тиск
Екстремальні умови середовища (холод, темрява)	4	мороз, робота вночі
Низький моральний дух колективу	4	постійний тиск суспільства

Таблиця 4

Опис причинно-наслідкового зв'язку між етапами розвитку синдрому втоми і кількістю помилок

Етап розвитку синдрому	Механізм впливу на працівника	Безпосередній наслідок для безпеки	Діапазон ймовірності відмови захисного шару	Обґрунтування ймовірності відмови
Компенсаторна фаза	Збільшення помилок через переоцінку сил; робота в холоді/ темряві без перерв.	Зниження уваги: неадекватна оцінка ризиків (наприклад, робота на висоті без фіксації).	0.65–0.80	Відмова перших двох шарів захисту («можливість відпочинку» 0,6–0,8 та «фактичний відпочинок» 0,5–0,7). 60-годинний тиждень, відсутність ротації та військові атаки роблять планування та відновлення неможливими (модель LOPA + дані про воєнний стан).
Фаза виснаження	Гормональний дисбаланс, зниження моторики та імунітету; відсутність відновлення після 24/7 змін.	Фізичні помилки: вислизання інструментів, падіння; когнітивні, ігнорування сигналів небезпеки.	0.50–0.70	Основна відмова шару «моніторинг втоми» (0,4–0,6). Відсутність тестів на концентрацію (PVT), медичного контролю та соціальний тиск сильно підвищують ймовірність (модель HEART).
Кумулятивний ефект	Синергія чинників (війна + холод + тиск) блокує відновлення.	Системні аварії: каскадні збої, де втома бригади призводить до масових інцидентів.	0.60–0.82	Комплексна відмова шару «моніторинг помилок» (0,3–0,5) на фоні відмови попередніх шарів. При хронічній втомі навіть наявні перевірки стають неефективними (модель Fault Tree Analysis + модель «швейцарського сиру»).

Таблиця 5

Сценарій	Величина ймовірності відмов захисних бар'єрів				Загальний ризик	Оцінка ризику	Коментар
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄			
Оптимістичний	0,6	0,5	0,4	0,3	0,036	Неприйнятний	Ризик у 360 разів вищий за ризик у мирний час; потребує негайного усунення
Номінальний	0,7	0,6	0,5	0,4	0,084	Категорично неприйнятний	Ризик понад 800 разів вищий за ризик у мирний час; хронічна втома блокує всі бар'єри
Песимістичний	0,8	0,7	0,6	0,5	0,168	Категорично неприйнятний	Ризик 1600 разів вищий за ризик у мирний час; реальна загроза масових інцидентів

Таблиця 6

Результати розрахунку ризику травматизму працівників критичної інфраструктури

Сценарій	Величина ймовірності відмов захисних бар'єрів				Загальний ризик	Оцінка ризику	Коментар
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄			
Оптимістичний	0,6	0,5	0,4	0,3	0,036	Неприйнятний	Ризик у 360 разів вищий за ризик у мирний час; потребує негайного усунення
Номінальний	0,7	0,6	0,5	0,4	0,084	Категорично неприйнятний	Ризик понад 800 разів вищий за ризик у мирний час; хронічна втома блокує всі бар'єри
Песимістичний	0,8	0,7	0,6	0,5	0,168	Категорично неприйнятний	Ризик 1600 разів вищий за ризик у мирний час; реальна загроза масових інцидентів

Отримані результати підтверджують існування прямого причинно-наслідкового зв'язку між розвитком синдрому хронічної кумулятивної втоми та зростанням рівня виробничого травматизму. У всіх трьох сценаріях загальний ризик травматизму (0.036–0.168) потрапляє в зону неприйнятної та категорично неприйнятної рівня, що показує його зростання в 360–1680 разів по відношенню до базового ризику травматизму мирного часу (0.00005–0.0001 за LOPA).

Обговорення. Отримані результати адаптованої моделі «швейцарського сиру» чітко підтверджують існування прямого причинно-наслідкового зв'язку між розвитком синдрому хронічної кумулятивної втоми та катастрофічним зростанням ризику виробничого травматизму в умовах воєнного стану. Зокрема, ймовірність відмови захисних бар'єрів збільшується в 4–16 разів залежно від поєднання воєнних, метеорологічних та психосоціальних чинників (див. табл. 3), а загальний ризик травматизму на одну критичну операцію досягає 3.6–16.8% (табл. 6), що повністю потрапляє в зону категорично неприйнятної рівня ризику за шкалою CCPS та IEC 61511. Це перевищення базового ризику мирного часу (0.00005–0.0001 за LOPA) у 360–1680 разів свідчить про системну неспроможність чинної організації праці (60-годинний

робочий тиждень, відсутність ротації та моніторингу втоми) забезпечувати прийнятний рівень безпеки на об'єктах критичної інфраструктури України у 2025–2026 рр.

Такі висновки повністю узгоджуються з міжнародними дослідженнями впливу втоми на безпеку праці. Sprajcer et al. (2022) у систематичному огляді ефективності систем управління ризиками втоми (FRMS) в авіації, транспорті та пожежній охороні встановили, що відсутність обов'язкової ротації та моніторингу сну підвищує ймовірність інцидентів і травм на 50–300 %, причому найбільший ефект спостерігається саме за умови поєднання хронічного дефіциту відпочинку з високим психоемоційним навантаженням. У нашому дослідженні коефіцієнти зростання (до 12 разів при дефіциті часу) перевищують наведені значення через додаткові воєнні стресори (обстріли, скасування норм охорони праці Законом № 2136-IX), що не були присутні в мирних умовах, розглянутих попередніми авторами.

Аналогічні результати демонструє Jo and Kim [8], які за допомогою DTW-аналізу довели, що втома працівників будівництва підвищує ризик падінь у 3–4 рази, особливо на слизьких поверхнях та в екстремальних погодних умовах. Наші розрахунки за моделлю HEART показують

ще вищий мультиплікативний ефект (коефіцієнт 4–6 за холод та фізичний стрес), оскільки в енергетичному секторі України поєднуються одночасно холод, темрява, висотні роботи та постійна загроза ракетних ударів – чинники, які суттєво посилюють відмову перших двох захисних шарів («можливість відпочинку» та «фактичний відпочинок»).

Sieber et al. (2022), досліджуючи транспортну та комунальну сфери, зазначили, що накопичення втоми підвищує ризик травм і near-misses на 50 % і наголосили на необхідності біоматематичних моделей прогнозування та обмеження тривалості змін. Наші результати за LOPA та моделлю «швейцарського сиру» доводять, що в умовах воєнного стану цей ризик зростає не на 50%, а в десятки разів, оскільки чинна нормативна база (зокрема скасування обмежень робочого часу) повністю блокує третій і четвертий шари захисту (моніторинг втоми та моніторинг помилок). Таким чином, дослідження підтверджує, що традиційні рекомендації міжнародних FRMS потребують суттєвої адаптації до реалій повномасштабної війни.

Практична значущість отриманих результатів полягає в науковому обґрунтуванні негайних організаційних змін: обов'язкової ротації персоналу, впровадження медичного скринінгу (тест PVT) та перегляду Закону № 2136-IX. Впровадження цих заходів дозволить знизити ризик до

прийняттого рівня (< 0,1%) і зберегти кваліфікований персонал критичної інфраструктури – найцінніший ресурс обороноздатності держави.

Обмеження дослідження пов'язані з використанням експертних оцінок ймовірностей відмов бар'єрів (LOPA, HEART); для підвищення точності необхідна емпірична валідація на реальних об'єктах з застосуванням фітнес-трекерів та психофізіологічного моніторингу. Перспективи подальших досліджень включають розробку інтегрованої цифрової системи моніторингу втоми з урахуванням воєнних стресорів та оцінку ефективності запропонованих запобіжних заходів у польових умовах.

Висновки. Встановлено ймовірність відмови захисних бар'єрів, які зменшують ризик травматизму від втоми зростає в 4–16 разів. Загальний ризик травматизму становить 3.6–16.8 % на одну критичну операцію і перебуває в зоні категорично неприйняттого рівня ризику травматизму. Показано, що чинна організація праці (60-годинний робочий тиждень, відсутність ротації та моніторингу втоми) є основною причиною зростання травматизму в енергетичному секторі України у 2025–2026 рр. Запропоновані запобіжні заходи (обов'язкова ротація, медичний скринінг, перегляд Закону № 2136-IX) дозволять суттєво знизити ризик і зберегти найцінніший ресурс – кваліфікований персонал критичної інфраструктури.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Alexander T. M. Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) and Human Factor Analysis and Classification System (HFACS). NASA Technical Reports Server, 2017. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170010256>
2. Basner M., Mollicone D., Dinges D. F. Validity and sensitivity of a brief psychomotor vigilance test (PVT-B) to total and partial sleep deprivation. *Acta Astronautica*. 2011. Vol. 69, № 11–12. P. 949–959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.07.015>
3. Civil Aviation Safety Authority. Fatigue Risk Management System Handbook. Canberra, 2013. URL: <https://www.casa.gov.au/sites/default/files/2021-12/fatigue-risk-management-systems-handbook.pdf>
4. Civil Aviation Safety Authority. Fatigue risk management system (FRMS) handbook. Canberra, 2021. URL: <https://www.casa.gov.au/resources-and-education/publications/manuals-handbooks-and-templates/fatigue-risk-management-system-frms-handbook>
5. Federal Aviation Administration. AC 120-103A - Fatigue Risk Management Systems for Aviation Safety. U.S. Department of Transportation, 2013. URL: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_120-103a.pdf
6. Hasibuan R. P. S., Fadillah S. Human Reliability Assessment Analysis with Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) Method on Sterilizer Station at XYZ Company. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 847. P. 012042. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012042>
7. Sprajcer M., Thomas M. J. W., Sargent C., Crowther M. E., Boivin D. B., Wong I. S., Smiley A., Dawson D. How effective are Fatigue Risk Management Systems (FRMS)? A review. *Accident Analysis and Prevention*. 2022. Vol. 165. P. 106398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106398> (doi.org in Bing)
8. Jo D., Kim H. The Influence of Fatigue, Recovery, and Environmental Factors on the Body Stability of Construction Workers. *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 11. P. 3469. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24113469>

9. Sieber W. K., Chen G. X., Krueger G. P., Lincoln J. E., Menéndez C. C., O'Connor M. B. Research gaps and needs for preventing worker fatigue in the transportation and utilities industries. *American Journal of Industrial Medicine*. 2022. Vol. 65, № 11. P. 857–866. DOI: <https://doi.org/10.1002/ajim.23346>
10. Summers A. E. Introduction to layers of protection analysis. *Journal of Hazardous Materials*. 2003. Vol. 104, № 1–3. P. 163–180. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00278-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00278-2)
11. Wiegmann D. A., Wood L. J., Cohen T. N., Shappell S. A. Understanding the “Swiss Cheese Model” and its application to patient safety. *Journal of Patient Safety*. 2022. Vol. 18, № 2. P. 119–123. DOI: <https://doi.org/10.1097/PTS.0000000000000900>

REFERENCES:

1. Alexander, T. M. (2017). Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) and Human Factor Analysis and Classification System (HFACS) [Otsinka ta znyzhennia liudskykh pomylk (HEART) i systema analizu ta klasyfikatsii liudskykh faktoriv (HFACS)]. *NASA Technical Reports Server*. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170010256>
2. Basner, M., Mollicone, D., & Dinges, D. F. (2011). Validity and sensitivity of a brief psychomotor vigilance test (PVT-B) to total and partial sleep deprivation [Validnist ta chutlyvist korotkoho testu psykhotomoi plynosti (PVT-B) do povnoi ta chastkovo deprivatsii snu]. *Acta Astronautica – Akta Astronavtyka*, 69(11–12), 949–959. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.07.015>
3. Civil Aviation Safety Authority. (2013). Fatigue Risk Management System Handbook [Posibnyk z upravlinnia ryzykom vtomy]. <https://www.casa.gov.au/sites/default/files/2021-12/fatigue-risk-management-systems-handbook.pdf>
4. Civil Aviation Safety Authority. (2021). Fatigue risk management system (FRMS) handbook [Posibnyk z systemy upravlinnia ryzykom vtomy (FRMS)]. <https://www.casa.gov.au/resources-and-education/publications/manuals-handbooks-and-templates/fatigue-risk-management-system-frms-handbook>
5. Federal Aviation Administration. (2013). AC 120-103A - Fatigue Risk Management Systems for Aviation Safety [Systemy upravlinnia ryzykom vtomy dlia aviatsiinoi bezpeky]. *U.S. Department of Transportation*. https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_120-103a.pdf
6. Hasibuan, R. P. S., & Fadillah, S. (2020). Human Reliability Assessment Analysis with Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART) Method on Sterilizer Station at XYZ Company [Analiz nadiinosti liudyny metodom HEART na sterylizatsiini stantsii kompanii XYZ]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – Serii konferentsii IOP: Materialoznavstvo ta inzheneriia*, 847, 012042. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012042>
7. Sprajcer, M., Thomas, M. J. W., Sargent, C., Crowther, M. E., Boivin, D. B., Wong, I. S., Smiley, A., & Dawson, D. (2022). How effective are Fatigue Risk Management Systems (FRMS)? A review [Naskilky efektyvni systemy upravlinnia ryzykom vtomy (FRMS)? Ohliad]. *Accident Analysis and Prevention – Analiz ta poperedzhennia avarii*, 165, 106398. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106398>
8. Jo, D., & Kim, H. (2024). The Influence of Fatigue, Recovery, and Environmental Factors on the Body Stability of Construction Workers [Vplyv vtomy, vidnovlennia ta faktoriv seredovyshcha na stabilnist tila budivelnykiv]. *Sensors – Datchyky*, 24(11), 3469. <https://doi.org/10.3390/s24113469>
9. Sieber, W. K., Chen, G. X., Krueger, G. P., Lincoln, J. E., Menéndez, C. C., & O'Connor, M. B. (2022). Research gaps and needs for preventing worker fatigue in the transportation and utilities industries [Prohalyny ta potreby doslidzhen dlia zapobihannia vtomi pratsivnykiv u transportnii ta komunalnii sferakh]. *American Journal of Industrial Medicine – Amerykanskiy zhurnal promyslovoi medytsyny*, 65(11), 857–866. <https://doi.org/10.1002/ajim.23346>
10. Summers, A. E. (2003). Introduction to layers of protection analysis [Vstup do analizu shariv zakhystu]. *Journal of Hazardous Materials – Zhurnal nebezpechnykh materialiv*, 104(1–3), 163–180. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00278-2](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00278-2)
11. Wiegmann, D. A., Wood, L. J., Cohen, T. N., & Shappell, S. A. (2022). Understanding the “Swiss Cheese Model” and its application to patient safety [Rozuminnia “Modeli syroho syru” ta yii zastosuvannia do bezpeky patsientiv]. DOI: <https://doi.org/10.1097/PTS.0000000000000900>



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 15.04.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 08.05.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026