

Ймовірнісний метод аналізу небезпеки і розрахунок ступеня ризику

A probabilistic method of hazard analysis and calculation of the degree of risk

Олег Богатов * A

*Corresponding author: кандидат технічних наук, доцент, e-mail: bogatovolegigor@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7342-7556

Микола Павлушко B

кандидат військових наук, e-mail: n.pavlunko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8255-6245

Олег Посмітюх B

кандидат військових наук, доцент, e-mail: olegposmit777@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4467-9532

Євген Обозненко B

e-mail: egoboz@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3617-8604

Oleg Bogatov * A

*Corresponding author: candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: bogatovolegigor@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7342-7556

Mykola Pavlunko B

candidate of military sciences, e-mail: n.pavlunko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8255-6245

Oleg Posmityukh B

candidate of military sciences, associate professor, e-mail: olegposmit777@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4467-9532

Evgeny Oboznenko B

e-mail: egoboz@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3617-8604

^A Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, Україна.

^B Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, м. Київ, Україна

^A Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine

^B National Defence University of Ukraine named Ivan Chernyakhovskiy, Kyiv, Ukraine

Received: March 29, 2023 | Revised: April 19, 2023 | Accepted: April 30, 2023

DOI: 10.33445/sds.2023.13.2.13

Мета роботи: розробки нових методів аналізу та моделювання умовної ймовірності виникнення виробничої травми, прийнятних для практичних інженерних розрахунків на підставі потенціювання при комбінованому впливі професійних та непрофесійних факторів.

Метод: для реалізації мети дослідження проведено оцінку ймовірності виникнення нещасного випадку та розвитку різних варіантів небезпечних ситуацій. Методичним інструментарієм проведеного дослідження стали методи аналізу і синтезу, теорія ігор.

Результати дослідження: удосконалена математична модель для моделювання умовної ймовірності ураження працівника при виконанні технологічних операцій.

Теоретична цінність дослідження: полягає в можливості визначення, реальної оцінки ризику здоров'ю тих контингентів населення, які зазнають впливу факторів ризику за допомогою удосконаленої методики для проведення аналізу та моделювання умовної ймовірності виникнення виробничої травми.

Цінність дослідження: у ході дослідження визначено, що реальна оцінка ризику здоров'ю яка неможлива без достатньої інформаційної бази щодо кількісних та якісних характеристик факторів ризику, даних про стан здоров'я тих контингентів населення, які зазнають впливу цих факторів та інструменту для проведення аналізу та моделювання умовної ймовірності виникнення виробничої травми. Цінність дослідження полягає в удосконаленні теоретичних положень і методичних підходів до оцінювання ризику ймовірності виникнення виробничої травми.

Обмеження дослідження: обмеження дослідження полягає у використанні інформації, що перебуває у вільному доступі.

Тип статті: теоретична.

Purpose: development of new methods of analysis and modeling of the conditional probability of the occurrence of an industrial injury, acceptable for practical engineering calculations based on potentiation under the combined influence of professional and non-professional factors.

Method: to realize the purpose of the study, an assessment of the probability of an accident and the development of various options for dangerous situations was carried out. Methods of analysis and synthesis, game theory became the methodical tools of the conducted research.

The results of the study: an improved mathematical model for simulating the conditional probability of injury to an employee when performing technological operations.

Theoretical implications: consists in the possibility of determining and realistically assessing the health risk of those contingents of the population that are exposed to risk factors with the help of an improved methodology for conducting analysis and modeling of the conditional probability of occurrence of an industrial injury.

Value: in the course of the study, it was determined that a real health risk assessment is impossible without a sufficient information base on the quantitative and qualitative characteristics of risk factors, data on the health status of those contingents of the population that are affected by these factors, and a tool for conducting conditional probability analysis and modeling of the occurrence of an industrial injury. The value of the research lies in the improvement of theoretical provisions and methodological approaches to risk assessment of the probability of occurrence of an industrial injury.

Limitations of the study: the limitation of the study is the use of freely available information.

Papertype: theoretical.

Ключові слова: охорона праці, захворювання, безпека праці.

Key words: labor protection, diseases, occupational safety.

1. Вступ

В останні десятиліття в Україні формується правова база щодо попередження розвитку професійних та виробничо обумовлених захворювань, зниження факторів ризику їх розвитку, а також визначення та лікування ранніх форм професійних захворювань. За даними Міжнародної організації праці [1], щорічно в світі фіксують близько 340 млн нещасних випадків на виробництві та 160 млн жертв професійних захворювань. Щороку з цих же причин гине 2,3 млн людей.

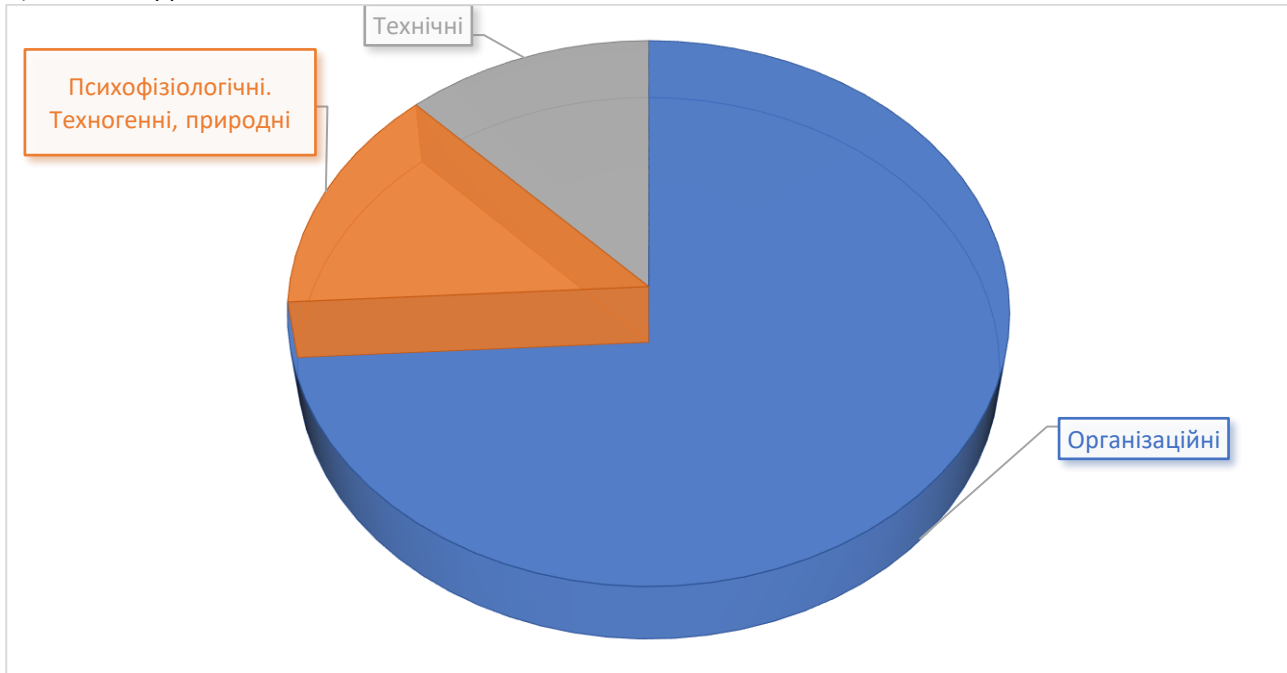


Рисунок 1 – Причини нещасних випадків зі смертельним наслідком, пов'язаних з виробництвом, 11 місяців 2021 року

Також Держпраці наводить дані про стан виробничого травматизму за останні три роки.

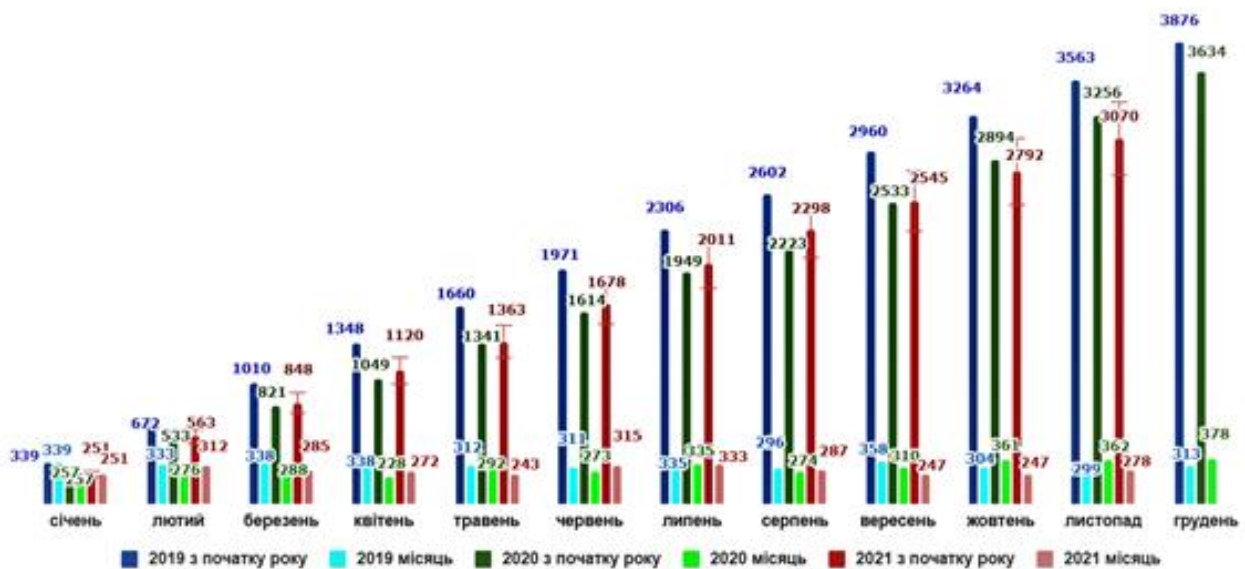


Рисунок 2 – Стан виробничого травматизму в Україні у 2019-2021 роках (кількість осіб)

У 2020 році в Україні було різке збільшення випадків виробничого травматизму – 6 тис. 646, з них 393 – смертельні. Обсяг виплат Фонду соцстрахування склав 9,4 млрд грн. Більшу частину цієї суми склали щомісячні страхові виплати в разі часткової чи повної втрати працездатності – 8 млрд 836,5 млн грн. На щомісячні страхові виплати сім'ям, які втратили годувальників, пішло 334 млн грн, на допомогу з тимчасової непрацездатності через нещасний випадок або професійне захворювання – 138,1 млн грн.

За 11 місяців 2021 року через організаційні причини сталося 255 (понад 74%) смертельних нещасних випадків. На другому місці – 47 випадків через психофізичні, техногенні, природні, екологічні та соціальні причини (13,7%). На третьому – технічні причини (42 випадки, 12,2%) [2].

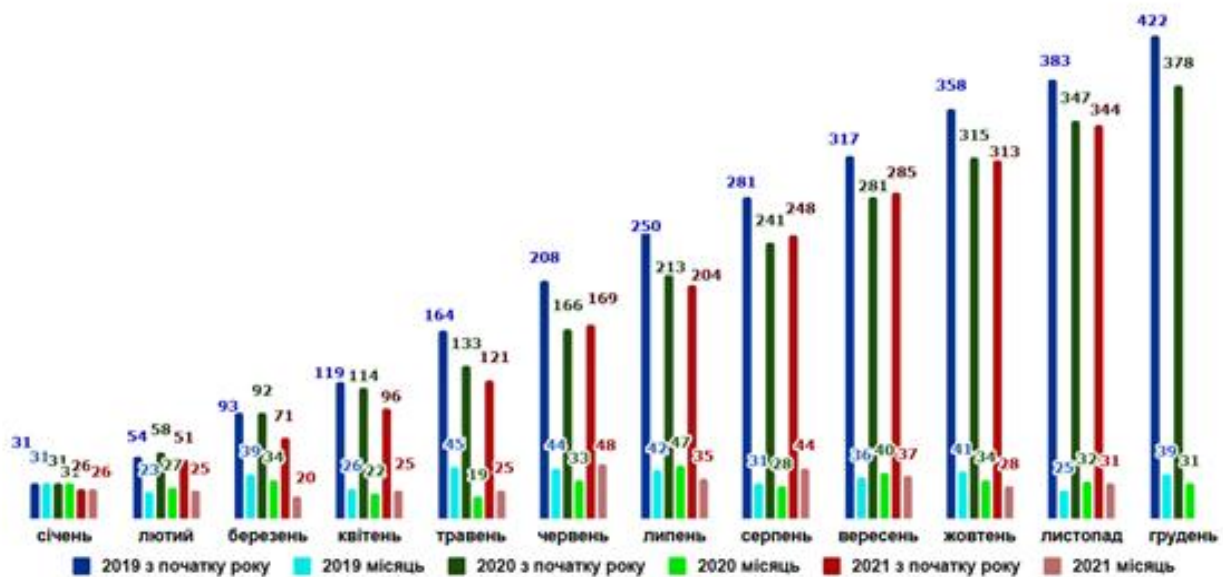


Рисунок 3 – Стан виробничого травматизму зі смертельними наслідками в Україні у 2019-2021 роках (кількість осіб)

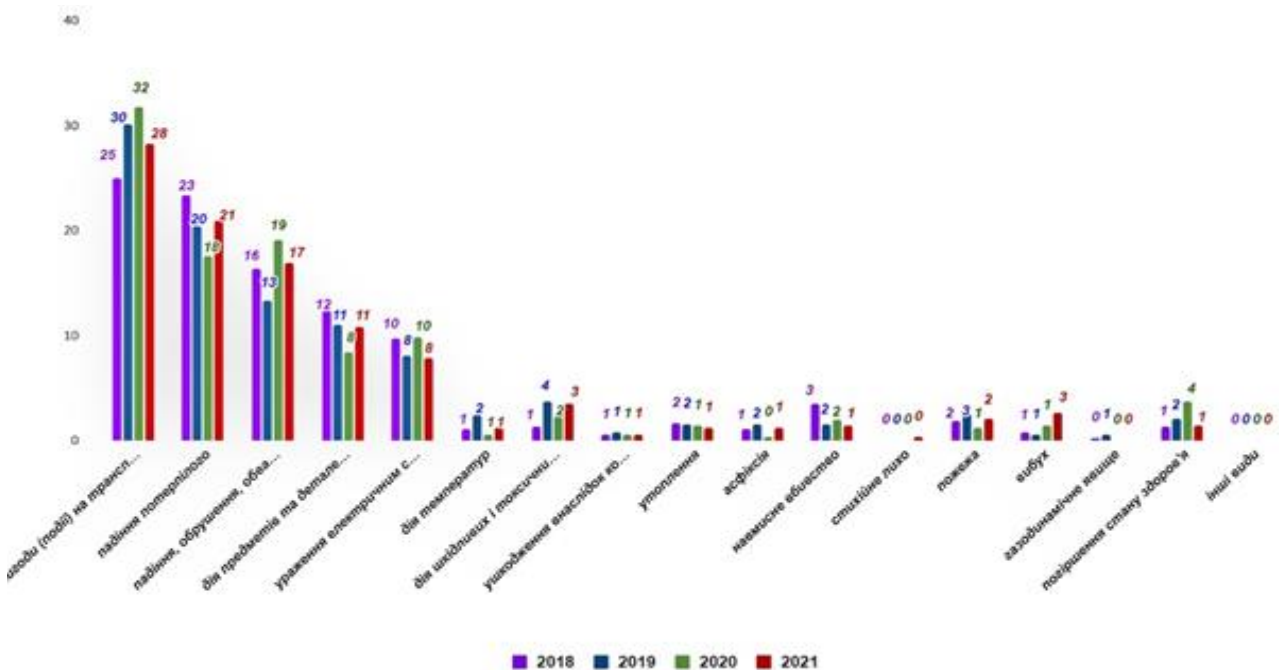


Рисунок 4 – Динаміка подій, що призвели до нещасних випадків зі смертельним наслідком за 11 місяців 2018

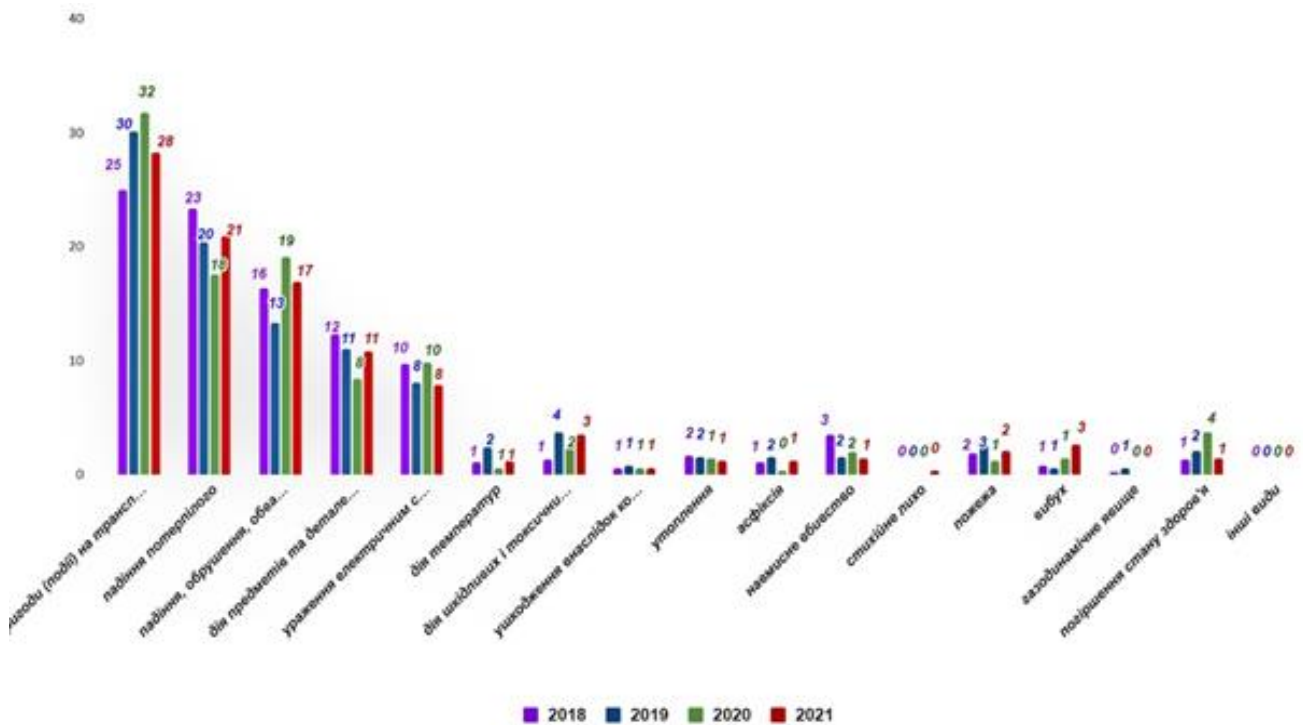


Рисунок 5 – Динаміка подій, що призвели до нещасних випадків зі смертельним наслідком за 11 місяців 2018-2021 року (% від загальної кількості загиблих)

Основними причинами невисокого рівня організації охорони праці в Україні є [3]:

- низький рівень кваліфікації, виробничої культури та технологічної дисципліни;
- спрацьованість засобів виробництва;
- відсутність ефективного галузевого та регіонального управління охороною праці;
- відсутність достатніх інвестицій у виробництво та охорону праці;
- неналежне фінансування роботодавцями заходів з охорони праці;
- відсутність підготовки фахівців з охорони праці, низький рівень підвищення кваліфікації та перепідготовки кадрів з питань охорони праці;
- хронічне недофінансування національних, галузевих, регіональних про-грам поліпшення безпеки, гігієни праці та виробничого середовища;
- відсутність на підприємствах чіткої організації охорони праці;
- відсутність розробленої державної політики в галузі охорони праці і стимулюючої системи щодо безпечної праці;
- неадекватне мислення і ставлення до питань безпеки учасників трудового і виробничо-технологічних процесів по вертикалі управління і виконання.

В умовах сьогодення система управління охороною праці має базуватися не тільки на заходах з боку держави, але й на зацікавленості суб'єктів трудових правовідносин у збереженні належного фізичного стану працівника, що нерозривно пов'язано з економічним і соціальним благополуччям як роботодавця так і найманих працівників.

2. Теоретичні основи дослідження

Теоретичними основами дослідження стали положення Державних санітарних норм та правил "Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу", постанова КМУ від

17.04.2019 № 337 в яких визначено питання щодо створення безпечних і нешкідливих умов праці.

В Україні питання щодо створення безпечних і нешкідливих умов праці, недопущення нещасних випадків, професійних та виробничо обумовлених захворювань розглядали в своїх роботах О.Б. Горностай, О.В. Орехова, О.І. Павленко С.И. Азаров, О.В. Святун, О.А. Трюхан та інші. В роботах розглядається вплив окремих факторів виробничого середовища на розвиток професійним захворюванням та питання керування професійним ризиком. Водночас, зважаючи на наукові праці та рекомендації вітчизняних учених, доцільно продовжити дослідження з цієї проблематики, адже деякі проблеми в цій сфері залишаються невирішеними.

3. Постановка проблеми

Одним із головних питань повсякденної діяльності військових частин, закладів, підприємств Міністерства оборони України є безпека праці. Питання охорони праці є складне і досить відповідальне. Адже за ним життя і здоров'я людей, які своєю працею створюють для держави та нації матеріальні блага. Як показує світовий досвід, безпека праці є основною гарантією стабільності, якості та ефективності будь-якого виробництва. До того ж відсутність нещасних випадків та зменшення професійної захворюваності позначається на професійній активності працюючих, на моральному кліматі в колективі, а отже і на ефективності та продуктивності праці, скорочує витрати на пільги та компенсації за роботу в шкідливих і небезпечних для здоров'я умовах.

Реальна оцінка ризику здоров'ю неможлива без достатньої інформаційної бази щодо кількісних та якісних характеристик факторів ризику та даних про стан здоров'я тих контингентів населення, які зазнають впливу цих факторів [4]. Формування кількісних показників ризику того чи іншого професійного захворювання протягом періоду впливу відповідного шкідливого виробничого фактора визначається не тільки інтенсивністю фактора, а й режимом його впливу, наявністю супутніх шкідливих факторів виробничого середовища, індивідуальних факторів ризику у експонованій особі (шкідливі звички, підвищена чутливість та ін.) [5].

У суспільстві зростає потенційна небезпека здоров'я чинників біологічно-го, генетичного, соціального і поведінкового характеру. Встановлено ефект потенціювання при комбінованому впливі професійних та непрофесійних факторів. Тому є необхідність розробки нових методів аналізу та моделювання умовної ймовірності виникнення виробничої травми, прийнятних для практичних інженерних розрахунків.

4. Методологія

Методичний підхід до оцінювання ймовірності виникнення нещасного випадку та розвитку різних варіантів небезпечних ситуацій на основі сформульованого принципу відповідності показника травмування та нещасних випадків від оцінки обставин та умов, що сприяють виникненню та розвитку подібних травмонезбезпечних ситуацій на виробництві, удосконалено так:

1) удосконалено методичний підхід до оцінювання ймовірність запобігання впливу небезпечних факторів виробничого середовища та трудового процесу.

5. Результати

Показником оцінки є ймовірність запобігання впливу (F_B) небезпечних факторів (НФ) виробничого середовища (ВС) та трудового процесу (ТП), яка може бути визначена за виразом

$$F_B = 1 - P_B, \quad (1)$$

де P_B – розрахункова ймовірність впливу ВФ на окрему людину на рік (розрахунковий індивідуальний ризик).

Рівень забезпечення безпеки людей відповідає необхідному, якщо

$$P_B \leq P_B^H, \quad (2)$$

де P_B^H – допустима ймовірність впливу ВФ на окрему людину на рік, яка приймається відповідно до чинних нормативних документів (нормоване значення індивідуального ризику $P_B^H = 10^{-6} \text{рік}^{-1}$).

Ймовірність впливу ВФ виробничого середовища та трудового процесу на людину визначається

$$P_B = P[\cup_{n=1}^N \cup_{m=1}^M (BC_n \cap TP_m)], \quad (3)$$

де N, M – кількість НФ виробничого середовища та трудового процесу, BC, TP – подія виникнення n -го НФ ПС та виникнення m -го НФ ТП;
 \cup, \cap – символи об'єднання (суми) та перетину (твору) випадкових подій.

У разі коли розглянуті події незалежні, то ймовірність настання нещасного випадку:

$$P_B = 1 - \prod_{n=1}^N \prod_{m=1}^M [1 - P(BC_n) \cdot P(TP_m)] \quad (4)$$

де $P(BC_n), P(TP_m)$ – ймовірності появи n -го НФ ВС и m -го НФ ТП.

Ймовірність впливу n -го НФ ПС може бути визначена за формулою:

$$P(TP_n) = P_n^b \cdot P_n^p \cdot P_n^{nc} \quad (5)$$

де P_n^b, P_n^p – ймовірності наявності у робочій зоні n -го НФ (речовини) та знаходження людини в зоні дії n -го НФ, P_n^{nc} – вражаюча здатність n -го НФ (речовини).

Ймовірність наявності в робочій зоні n -го НФ (шкідливої речовини) та знаходження людини в зоні дії n -го НФ визначаються за формулами:

$$P_n^b = \frac{t_n^b}{T_c} \quad \text{и} \quad P_n^p = \frac{t_n^p}{T_c}, \quad (6)$$

де t_n^b, t_n^p – час дії (експозиція) n -го НФ та час знаходження людини в зоні дії НФ протягом робочої зміни T_c .

Вражаюча здатність n -го НФ:

$$P_n^{nc} = \frac{d_n}{D_n} \quad (7)$$

де d_n – фактичний вміст n -ого шкідливої речовини, D_n – граничний вміст шкідливої речовини (такої кількості, при якому працюючі підлягають негайній евакуації з небезпечної зони).

Підставивши у формулу (5) значення P_n^b, P_n^p, P_n^{nc} отримаємо:

$$P_{bn} = \frac{t_n^b \cdot t_n^p \cdot d_n}{D_n \cdot N_c} \quad (8)$$

Ймовірність шкідливого впливу N НФ визначається за формулою:

$$P_b(N) = 1 - \prod_{n=1}^N (1 - P_{bn}) \quad (9)$$

Знаючи ймовірність дії НФ на працюючих, можна визначити шкідливість ПС у цілому:

$$P_N^b = \frac{K_1 P_b(1) + K_2 P_b(2) + \dots + K_m P_b(N)}{K} \quad (10)$$

де K_1, K_2, \dots, K_N – кількість працюючих у зоні дії 1, 2, ..., N НФ, K – загальна чисельність працюючих:

$$K = K_b + K_1 + K_2 + \dots + K_N, \quad (11)$$

де K_b – кількість працюючих, які не піддаються дії НФ.

Ймовірність наявності m -го НФ ТП може бути визначена за формулою:

$$P_{vm} = P_m^v \cdot P_m^p, \quad (12)$$

де P_m^v, P_m^p – ймовірності впливу m -го НФ та знаходження працюючого в зоні дії m -го НФ.

Ймовірність дії НФ та ймовірність знаходження працюючого в зоні його дії можуть бути визначені за формулами:

$$P_m^v = \frac{t_m^v}{T_c} \quad \text{и} \quad P_m^p = \frac{t_m^p}{T_c}, \quad (13)$$

де t_m^v, t_m^p – час дії m -го НФ та час знаходження працюючого в зоні дії m -го НФ за час робочої зміни T_c .

Підставивши формули (13) у формулу (12) отримаємо ймовірність впливу на працюючих m -го НФ:

$$P_{vm} = P_m^v \cdot P_m^p = \frac{t_m^v}{T_c} \cdot \frac{t_m^p}{T_c} = \frac{t_m^v \cdot t_m^p}{T_c^2} \quad (14)$$

За наявності 2, 3, ... M НФ ймовірність їхньої дії визначається за формулами:

$$\begin{aligned}
 P_v(2) &= P_{v2} + P_{v1} - P_{v2} \cdot P_{v1} \\
 P_v(3) &= P_{v3} + P_{v2} - P_{v3} \cdot P_{v2} \\
 &\dots \\
 P_v(M) &= P_{vM} + P_{v(M-1)} - P_{vM} \cdot P_{v(M-1)}
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Знаючи ймовірність впливу НФ на працюючих, можна визначити небезпеку ТП в цілому:

$$P_{nM}^0 = \frac{K_1 P_0(1) + K_2 P_0(2) + \dots + K_n P_0(M)}{K} \tag{16}$$

де K_1, K_2, \dots, K_n – кількість працюючих, які піддаються впливу 1, 2, ..., M факторів;
 $P_0(1), P_0(2), \dots, P_0(M)$ – ймовірність впливу на працюючих 1, 2, ..., M факторів;
 K – загальна чисельність працюючих:

$$K = K_v + K_1 + K_2 + \dots + K_M, \tag{17}$$

де K_v – загальна чисельність працюючих НФ.

Для визначення ймовірності виникнення НФ застосовують пробіт-функцію у вигляді [6]:

$$F(H\Phi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr(t)-5} \exp\left[-\frac{F(r,t)^2}{2}\right] dF(r,t) dt \tag{18}$$

де $F(r,t)$ – параметр НФ, що виник на відстані r від джерела небезпеки на момент часу t .

Залежність причин виникнення НФ описують розподілом Пуассона [6]:

$$F(r,t) = \exp(\lambda \Delta t) \sum_{k=1}^K \frac{(\lambda \Delta t)^k}{L} \tag{19}$$

де λ – інтенсивність виникнення НФ;
 Δt – інтервал часу, за якою виникає l -та небезпечна обстановка.

Величину пробіт-функції, загалом, описують виразом:

$$Pr(t) = A + B \ln \int_0^t D(t) dt, \tag{20}$$

де A, B – константи, які залежать від ступеня поразки працюючого;
 $D(t)$ – величина вражаючого фактора, що впливає на працюючого.

Якщо L конкуруючі незалежні причини появи події нещасного випадку, тоді легко визначити справедливість наступного співвідношення

$$R(t) = \sum_{l=1}^L R(t)_l = \sum_{l=1}^L \int_0^t h(t)_l \prod_{j \neq l}^J F[HC(\tau)] dt \tag{21}$$

де $R(t)$ – повний ризик нещасного випадку;
 $R(t)_l$ – ризик виробничого травматизму від l -ої причини;
 $h(t)_l$ – середня щільність розподілу нещасного випадку в часі τ з l -ої причини.

З формули (21) випливає, що ризик нещасного випадку характеризує внесок певної причини у формування травмонебезпечної ситуації та є безрозмірною величиною.

6. Обговорення

Наукову новизну результатів дослідження та їх практичне значення підтримано у ході дискусії науково-педагогічного складу кафедри оперативного та бойового забезпечення Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського, зокрема Тимуром Куртсеїтовим – доктором технічних наук, професором.

7. Висновки

Мети дослідження досягнуто, на основі застосування ймовірнісного методу для моделювання умовної ймовірності ураження працівника при виконанні технологічних операцій проведено оцінку ймовірності виникнення нещасного випадку та розвитку різних варіантів небезпечних ситуацій. При цьому виявлено причини, що впливають на ймовірнісний показник травмування та нещасних випадків, виконано оцінку обставин та умов, що сприяють виникненню та розвитку подібних травмонебезпечних ситуацій на виробництві.

8. Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

9. Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. Травматизм на виробництві: скільки було випадків і де найнебезпечніше працювати в Україні. URL : <https://www.slovoidilo.ua/2021/04/28/infografika/suspilstvo/travmatyzm-vyrobnyctvi-silkyy-bulo-vypadkiv-najnebezpechnishe-pracyuvaty-ukrayini> (дата звернення 17.01.2023)
2. Стан виробничого травматизму. Державна служба України з питань праці. URL : <https://dsp.gov.ua/stan-vyrobnychoho-travmatyzmu/> (дата звернення 20.01.2023)
3. Охорона праці в Україні – проблеми, досвід, перспективи. URL : <https://nov-rada.gov.ua/2021/12/10/okhorona-pratsi-v-ukraini-problemy-dosvid-perspektyvy/>

References

1. Travmatizm na virobniectvi: silkyy bulo vipadkiv i de najnebezpechnishe pracuvati v Ukraini. [Occupational injuries: how many cases were there and where is the most dangerous place to work in Ukraine]: Available from : <https://www.slovoidilo.ua/2021/04/28/infografika/suspilstvo/travmatyzm-vyrobnyctvi-silkyy-bulo-vypadkiv-najnebezpechnishe-pracyuvaty-ukrayini> (access date 17.01.2023).
2. Do Stan virobничого травматизму. Derzhavna sluzhba Ukraini z pitan' praci. [The state of industrial injuries. State Service of Ukraine on Labor Issues]. Available from : <https://dsp.gov.ua/stan-vyrobnychoho-travmatyzmu/> (access date 20.01.2023).
3. Ohorona praci v Ukraini – problemy, dosvid, perspektivi. [Labor protection in Ukraine - problems, experience, prospects]: Available from : <https://nov-rada.gov.ua/2021/12/10/okhorona-pratsi->

- (дата звернення 17.01.2023).
4. Про затвердження Державних санітарних норм та правил "Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу". К.: МОЗ України. 2014. URL : https://ips.ligazakon.net/document/RE25249?an=1&ed=2014_04_08 (дата звернення 17.01.2023).
5. Порядок розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві, затверджений постановою КМУ від 17.04.2019 № 337. URL : <https://pro-op.com.ua/article/882-santarno-ggnchna-harakteristika-umov-prats> (дата звернення 18.01.2023).
6. Азаров С. И., Святун О. В. Анализ условной вероятности возникновения производственной травмы при аварии // Гигиена труда, 2004 – вып. 35.
- [v-ukraini-problemy-dosvid-perspektyvy/](https://ips.ligazakon.net/document/RE25249?an=1&ed=2014_04_08) (access date 17.01.2023).
4. Pro zatverdzhennya Derzhavnih sanitarnih norm ta pravil "Gigiyenichna klasifikaciya praci za pokaznikami shkidlivosti ta nebezpechnosti faktoriv virobnichogo seredovisha, vazhkosti ta napruzhnosti trudovogo procesu". [On the approval of the State Sanitary Norms and Rules "Hygienic classification of work according to indicators of harmfulness and dangerous factors of the production environment, difficulty and tension of the labor process"]. Kyiv.: Ministry of Health of Ukraine. 2014. Available from : https://ips.ligazakon.net/document/RE25249?an=1&ed=2014_04_08 (access date 17.01.2023)
5. Poryadok rozsliduvannya ta obliku neshasnih vipadkiv, profesijnih zahvoryuvan ta avarij na virobnictvi [The procedure for investigating and recording accidents, occupational diseases and accidents at work]: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated April 17, 2019 No. 337 Available from : <https://pro-op.com.ua/article/882-santarno-ggnchna-harakteristika-umov-prats> (access date 18.01.2023).
6. Azarov S. I., Svyatun O. V. Analiz uslovnoj veroyatnosti vozniknoveniya proizvodstvennoj travmy pri avarii [Azarov S.Y., Sviatun O.V. Analysis of the conditional probability of occurrence of an industrial injury in the event of an accident]: Occupational hygiene, 2004 – release. 35.