

УДК 331.452

І. О. Ткаченко

*Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,
Харків*

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ АНАЛІЗУ РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ НЕЩАСНИХ ВИПАДКІВ НА ВИРОБНИЦТВІ

Рівень виробничого травматизму в Україні перевищує в 3-4 рази показники промислово розвинутих країн Європи, тому виникає необхідність наукового опрацювання методів дослідження і прогнозування травматизму та пошук таких рішень, які забезпечили б достовірну прогнозну оцінку та зниження ризиків виробничого травматизму.

Ключові слова: математичне моделювання, модель, аналіз, ризик, нещасний випадок, травматизм.

Постановка проблеми

Суть всіх вже існуючих методів дослідження виробничого травматизму спрямована на вивчення проблеми виникнення цих явищ з метою зниження їх кількості.

Недоліком практично усіх методів і методик є відсутність можливості їх практичного застосування, складність впровадження на виробництві: не враховується тривалість існування небезпечних факторів, що сприяють виникненню випадків виробничого травматизму, а також імовірний характер процесів, що досліджуються.

Все це не дозволяє розробляти ефективні організаційні та технічні заходи щодо попередження виникнення виробничого травматизму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вивчивши і проаналізувавши значний обсяг теоретичних та експериментальних досліджень в даному напрямку, викладений в роботах українських та закордонних науковців можна зробити висновок, що успішно вирішити цю задачу можливо при комплексному підході, який включає в себе теоретичні та експериментальні дослідження з вдосконалення методів оцінки ризику виробничого травматизму [1-4]. Так при аналізі та оцінці ризику травмування працівника при виконанні їм своїх посадових обов'язків не враховується випадкова природа виникнення аварійних ситуацій, складність їх прогнозування в умовах невизначеності та присутність фактора раптовості [5]. Відсутність об'єктивної інформації щодо помилок людини, які призводять до аварій; оцінки існуючих засобів та заходів, що здатні запобігати аварійним ситуаціям, не дозволяють з прийнятною для практичних розрахунків точністю прогнозувати виникнення небажаних подій (випадків виробничого травматизму, в т.ч. зі смертельним наслідком). Це, в свою чергу, не дає можливості розробляти

ефективні організаційно-технічні рекомендації щодо попередження випадків виробничого травматизму.

Метою статті є аналіз деяких математичних методів аналізу ризику нещасних випадків на виробництві спрямованих на запобігання виникнення цих явищ, що є достатньо актуальним у даний час.

Виклад основного матеріалу

Математичне моделювання в області безпеки праці ґрунтується на знанні залежності між частотою або ймовірністю виникнення нещасних випадків або захворювань та станом умов праці, зумовленими конкретними факторами, наявністю даних про кількість нещасних випадків на кожній операції технологічного процесу, встановлення та обліку залежностей між рівнями виробничих факторів і технічними характеристиками технічної системи, що досліджується[6-7].

Математична модель повинна бути продуктивною, тобто обов'язково давати відповіді на реальні питання, що виникають, наприклад, в практиці управління безпекою праці

Зручно будувати математичні моделі, коли керовані змінні пов'язані з її параметрами через лінійні залежності або коли нелінійні залежності можна замінити на наближені до лінійних.

Складність побудови математичних моделей управління виробничим ризиком визначається вибором проміжку часу, для якого будується модель, невизначеністю багатofакторного впливу на працюючих шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища і трудового процесу, впливу на організм людини відхилень від норм факторів різної природи (хімічних, фізичних, біологічних, психофізіологічних), неможливість обліку ризику впливу всіх можливих факторів в силу того, що вони не визначені у формуванні нормативів. Остання обставина призводить до значного спрощення моделі. Але якщо ставиться завдання визначення загальних закономірностей

виникнення ризику захворювань в залежності від факторів виробничого середовища і трудового процесу, спрощення може бути виправданим.

При моделюванні ризику нещасних випадків на виробництві виділяються два напрямки.

Перший напрямок спрямований на те, що при моделюванні ризику нещасних випадків практично важливо його виразити через техніко-технологічні характеристики досліджуваних систем і процесів. Найбільше значення має облік таких характеристик, якими можна управляти або в процесі проектування систем, або в процесі їх експлуатації. При визначенні конкретних значень цих характеристик необхідно враховувати вимоги по мінімізації ризику, під яким розуміється ймовірність виникнення нещасного випадку.

Моделювання ризику нещасних випадків обов'язково передбачає прийняття певного механізму їх виникнення. Дуже часто нещасні випадки виникають як результат перетину в часі і в просторі наступних подій (їх ймовірності позначені через P_{ij}): поява травмонебезпечної ситуації (P_1) → знаходження в небезпечній зоні (P_2) → попадання під дію травмонебезпечного чинника (P_3) → відмова засобів захисту (P_4).

Необхідно, щоб усі перераховані вище події, що обумовлюють виникнення нещасного випадку, були незалежними. Тому ймовірність $P_{ij}(HB)$ нещасного випадку при виконанні ij -ої дії може бути виражена як:

$$P_{ij}(HB) = P_{1ij} P_{2ij} P_{3ij} P_{4ij}. \quad (1)$$

Далі доречно прийняти, що кілька дій становлять операцію, а кілька операцій - цикл технологічного процесу. Тому враховуючи, що події – нещасні випадки при виконанні ij -х дій – є незалежними, маємо для розрахунку ймовірності $P_1(O)$ нещасного випадку в i -й операції:

$$P_1(O) = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_{ij}(D)], \quad (2)$$

де m – кількість дій в j -й операції.

Для одного циклу реалізації технологічного процесу аналогічно (2) отримуємо:

$$P_n(III) = 1 - \prod_{j=1}^n [1 - P_{ij}(O)], \quad (3)$$

де $P_n(III)$ – ймовірність нещасного випадку при виконанні одного циклу технологічного процесу;

n – кількість операцій, з яких складається технологічний процес, що досліджується.

Якщо протягом року виконують N циклів будь-якого технологічного процесу і в кожному циклі рівень ризику не змінюється, то ймовірність нещасного випадку (рівень ризику) $P_r(III)$, віднесена до одного року, буде складати:

$$P_r(III) = 1 - [1 - P_n(III)]^N. \quad (4)$$

З наведених вище формул випливають такі висновки: чим складніший технологічний процес (на це може вказувати збільшена кількість операцій n), тим вище інтенсивність праці (велике число циклів реалізації N за рік), тим вище за інших рівних умов буде ймовірність нещасного випадку.

Другий напрям у моделюванні ризику нещасних випадків полягає у використанні математичних моделей технологічних процесів, які враховують їх основне призначення. Зазвичай технологічні процеси складаються з ряду послідовних операцій, що становлять один цикл реалізації процесу. Далі ці цикли повторюються. При цьому які-небудь істотні зміни в характеристиках виробничого процесу, які могли б впливати на показники ризику, не відбуваються. З урахуванням зазначеного, якщо оцінювати ризик можливого числа нещасних випадків (HC), то він може бути визначений як

$$HC = M \sum_{i=1}^n r_i N_s t_i, \quad (5)$$

де M – кількість циклів реалізації процесу, що досліджується;

n – кількість операцій;

r_i – питомий чи одиничний ризик, що припадає на 1 люд. год (чол.-з) роботи, тобто математичне очікування числа нещасних випадків на одиницю трудовитрат, в загальному випадку може залежати від швидкості виконання;

N_s – кількість осіб обслуговуючого персоналу, зайнятих у i -й операції;

t_i – тривалість виконання i -ї операції.

На базі таких математичних моделей можна вирішувати завдання зниження професійного ризику, включаючи вибір оптимальних шляхів його зниження.

Також, у практиці вивчення впливу факторів виробничого середовища і трудового процесу на людину використовуються психофізичні методи, що зв'язують залежність між величиною діючого на організм стимулу і виникає в організмі відчуття.

Психофізика розглядає проблеми побудови сенсорних шкал, що використовуються для оцінки верхніх граничних відчуттів з використанням логарифмічної функції – закон Вебера-Фехнера, або степеневі функції – закону С. Стівенса.

В. М. Мінько розробив системи побудови психофізичних шкал для обґрунтування співвідношення між балами ризику x_i і конкретними значеннями параметрів різних факторів виробничого середовища і трудового процесу [8].

Беручи до уваги те обставини, що закон Вебера-Фехнера діє для подразників середньої інтенсивності, В. М. Мінько у своїх розрахунках користувався законом С. Стівенса.

В. М. Мінько поєднав бальні оцінки впливу умов праці, запропонованих НДІ праці ще в 80-х роках минулого століття, з сучасними оцінками умов праці, які визначаються "Гігієнічною

класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу", затверджених Наказом Міністерства охорони здоров'я України 08 квітня 2014 року N 248.

Бал $x_i = 2$ відповідає ГДК або ГДР різних виробничих факторів. Введені в Гігієнічній класифікації праці класи умов праці (3.1, 3.2, 3.3, 3.4) умовно переведені у бали ризику за схемою: 3.1 – 3 бали, 3.2 – 4 бали, 3.3 – 5 балів, 3.4 – 6 балів.

Закон С. Стівенса має вигляд:

$$x = K * S^n, \quad (6)$$

де x – оцінка ризику;

K – константа, що залежить від одиниць вимірювання;

S – величина стимулу (або роздратування);

n – психофізичний показник ступеня, що вимірюється для різних подразників від 0,2 до 3,5.

З виразу (6) випливає:

$$\log x = \log K + n \log S. \quad (7)$$

Тоді

$$\log S = \frac{\log x - \log K}{n}. \quad (8)$$

Для отримання константи K необхідно використовувати введені визначення, якщо $S = S_{ндр}$, то $x = x_0 = 2$ (з використанням шестибальної класифікації). Тому з формули (8) знаходимо:

$$\log K = \log x_0 - n \log S_{ндр}. \quad (9)$$

Підставляючи вираз (9) у формулу (8), отримуємо:

$$\log S = \frac{\log x - (\log x_0 - n \log S_{ндр})}{n}. \quad (10)$$

Або

$$S = x \cdot 10^{\log(\frac{x}{x_0})/n}, \quad (11)$$

відносно бальних оцінок x отримаємо:

$$x = x_0 \cdot 10^{\frac{n}{10}(S - S_{ндр})}. \quad (12)$$

Приймаючи, що всі фактори виробничого середовища діють незалежно один від одного (принцип адитивності), для оцінки узагальненого рівня ризику будемо мати наступний вираз:

$$R_{nc} = 1 - \prod_{i=1}^n S_{nc_i}, \quad (13)$$

де S_{nc} – рівень безпеки за i -м фактором виробничого середовища, який може бути визначений за формулою:

$$S_{nc_i} = \frac{(x_{max} + 1) - x_i}{x_{max}}, \quad (14)$$

де x_{max} – максимальна бальна оцінка, що приймається у відповідності з методикою НДІ праці $x_{max} = 6$;

x_i – бальна оцінка по i -му фактору середовища;

n – кількість врахованих факторів середовища.

Важливо відзначити, що величина

$$S_{nc} = \prod_{i=1}^n S_{nc_i}. \quad (15)$$

визначає узагальнений рівень безпеки виробничого середовища, віднесений до трудового стажу.

Досвід показує, що ймовірність нещасних випадків у проміжок часу t , не залежить від того, чи були нещасні випадки у попередньому періоді t , що вказує на незалежність подій. Тоді ймовірність роботи без нещасних випадків (рівень безпеки виробничого середовища) протягом t років може бути визначена за формулою:

$$S_{nc} = (1 - r_r)^m, \quad (16)$$

де r_r – річний професійний ризик.

З формули (16) з урахуванням виразу (15) отримуємо:

$$r_r = 1 - \sqrt[m]{\prod_{i=1}^n S_{nc_i}}, \quad (17)$$

де m – 25 років – трудовий стаж.

Результати розрахунків за формулою (17) повинні бути близькі до даних, отриманих за фактичними показниками рівня травматизму на виробництві. Звичайно, не можливо лише при організації об'єктивного обліку захворюваності і правильному визначенні стану виробничого середовища.

Н. В. Муллер (Росія) пропонує методику, в основі якої лежить модель прогнозування ризику виробничого травматизму за допомогою вейвлет та фрактального аналізу [9]. В основі методики здійснено застосування статистики травматизму як часового ряду. На підставі даного часового ряду можна прогнозувати сплески нестабільності або нестійкості явища травматизму. Саме даний метод дозволяє прогнозувати в режимі реального часу. Вейвлет-перетворення переважно застосовувати саме для аналізу часових рядів. А зміна кількості нещасних випадків має нестационарний, стохастичний характер. Вейвлет-аналіз застосовується зазвичай для аналізу складних даних та їх відображення у масштабно-часову площину, що дозволяє виявити різні властивості складного сигналу, невидимі при звичайному поданні в режимі реального часу [10].

Застосування методів фрактального аналізу і теорії інформації дозволяє знаходити глобальні взаємозв'язки між змінними, що входять у процеси,

що відбуваються на досліджуваній території і впливають на кількість нещасних випадків. При цьому також за величиною фрактальної розмірності послідовності, що відбиває кількість нещасних випадків у досліджуваному проміжку, судять про ступінь хаотичності самого процесу.

Висновки

З вищесказаного випливає, що актуальною проблемою сучасного виробництва є застосування різноманітних методик дослідження та оцінки ризику виникнення нещасних випадків на виробництві, які набувають все більшої актуальності та знаходять своє застосування у різних галузях науки. Поява таких науково - обґрунтованих методик і методів дозволяє отримувати об'єктивні характеристики ризику виробничого травматизму.

Це, в свою чергу, дасть можливість застосовувати більш ефективні профілактичні і організаційно - технічні заходи щодо зниження рівня виробничого травматизму, а відповідно, знижувати збитки на виробництві; дозволить виділяти пріоритетні напрями щодо забезпечення безпечних і менш шкідливих умов праці; проводити оптимізацію розподілу фінансових коштів, спрямованих на поліпшення рівня безпеки працівників на підприємстві.

Література

1. Калькис В. Основные направления оценки рисков рабочей среды. Охрана труда/ В. Калькис, И. Кристиньш, Ж. Роя. – Рига: SIA "Jelgavas tipografija", 2005. – 72с.
2. National program on occupational safety and health 2011 – 2015. Ministry of Labour, invalids and social affairs, Hanoi, November, 2010.
3. R. I. Moraru. Developing a participative management strategy for occupational health and safety risks / R. I. Moraru, G. B. Babut. Annals of the University of Petroșani, Mining Engineering, Vol. 11 (2010), pp. 154-165.
4. Occupational health and safety management systems: OHSAS18001:2007.– [Requirements 2007-07-31]. – OHSAS Project Group. – 18p.
5. Ткаченко И. А. Моделирование оптимальных стратегий управления производственными рисками в условиях неопределенности/ Б. М. Коржик, I. О.Ткаченко// Международные научные чтения «Белые ночи – 2012». – К., 2012. – С.254-260.
6. White, Larry. "Management Accountants and Enterprise Risk Management." *Strategic Finance* (November 2004).
7. Masike R. A gender sensitive framework to safety and health at work/ R. Masike, B. Mwanza, L. Masiyazi. *European Scientific Journal*, Vol.10, No.11 (2014), pp. 155-168.
8. Минько В. М. Математическое моделирование в охране труда / В. М. Минько. – Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО «КГТУ», 2008.
9. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения / Н. М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – No11. – С. 1145–1171.
10. Kaboudan M. Computational forecasting of wavelet-converted monthly sunspot numbers./ M. Kaboudan. *Journal of Applied Statistics* 33, pp. 925-941.

Рецензент: д-р техн. наук проф. М. І. Адаменко, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків.

Автор: ТКАЧЕНКО Ірина Олександрівна
Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, кандидат технічних наук, старший викладач
E-mail – tia_tpv@mail.ru.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АНАЛИЗА РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

И. А. Ткаченко

Уровень производственного травматизма в Украине превышает в 3-4 раза показатели промышленно развитых стран Европы, поэтому возникает необходимость научной проработки методов исследования и прогнозирования травматизма и поиск таких решений, которые обеспечили бы достоверную прогнозную оценку и снижение рисков производственного травматизма.

Ключевые слова: математическое моделирование, модель, анализ, риск, несчастный случай, травматизм.

MATHEMATICAL MODEL ANALYSIS OF THE RISK OF ACCIDENTS ON MANUFACTURE

I. A. Tkachenko

The rate of injury in Ukraine exceeds 3-4 times the performance of the industrialized countries of Europe, therefore there is a need for the scientific study of methods and prediction of injury and the search for solutions that would provide accurate prognostic assessment and reduction of risks of occupational injuries.

Key words: mathematical modeling, model analysis, risk, accident, injury.