

УДК 004.02:004.42

**Ганна Анатоліївна Завгородня**  
(старший викладач кафедри інформаційних технологій, Державний  
університет інфраструктури та технологій);  
**Валерій Вікторович Завгородній, к.т.н, доцент**  
(доцент кафедри інформаційних технологій, Державний університет  
інфраструктури та технологій)

## МЕТОД КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ РИЗИКУ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

*Розглянуто метод кількісного аналізу ризику аварій на техногенних об'єктах на основі методики визначення ризиків техногенних об'єктів та моделювання процесів виникнення і розвитку аварій. Надано застосування математичної імовірнісної моделі для прогнозування індивідуального і соціального ризику з використанням автоматизованої комп'ютерної системи.*

**Ключові слова.** техногенний об'єкт, джерело небезпеки, імовірність, індивідуальний ризик, соціальний ризик, оцінка ризику, прогнозування ризику

**Вступ.** Діяльність людини у техногенній сфері неминуче призводить до виникнення аварій, які супроводжуються пожежами, вибухами і викидами токсичних речовин. У багатьох з них гинуть люди. Кожна з таких аварій наносить не тільки матеріальні, але й екологічні та соціальні збитки. Подальше зростання кількості небезпек, обумовлених промисловою діяльністю, зумовлюють необхідність забезпечення техногенної безпеки та попередження аварій на небезпечних техногенних об'єктах [1]. Ключовим аспектом в цьому питанні є аналіз ризику, який передбачає отримання кількісних оцінок потенційної небезпеки техногенних об'єктів і рекомендацій щодо її зниження шляхом реалізації відповідних інженерно-технічних і організаційних заходів.

**Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми.** До теперішнього часу в світі склалися наукові основи теорії оцінки потенційної небезпеки техногенних об'єктів [2], що становлять суть теорії аналізу ризику.

Розроблено методи оцінки частот реалізації різних сценаріїв виникнення і розвитку аварій [3], побудовані моделі утворення полів вражаючих факторів [4], а також моделі впливу вражаючих факторів на людей [5]. Однак, до теперішнього часу в Україні відсутні загальноприйняті методики аналізу ризику. Існуючі методики носять фрагментарний характер і не дозволяють в повному обсязі вирішувати важливі практичні завдання [6].

У розробку методичних основ оцінки потенційної небезпеки техногенних об'єктів, застосування результатів аналізу ризику техногенних об'єктів для вирішення

© Завгородня Г.А., Завгородній В.В., 2018

практичних завдань, зробили великий внесок відомі вчені В.А. Легасов, І.І. Кузьмін, В.Т. Алимов, В.А. Бондарь, А.Ф. Егоров та інші.

Одним з найбільш важливих аспектів оцінки потенційної небезпеки об'єктів є моделювання процесів розвитку аварій, проте до теперішнього часу методи такого моделювання залишаються недостатньо досконалими. Не існує єдиної методики, що дозволяє визначати показники ризику. Відкритими залишаються питання застосування кількісних оцінок показників ризику.

**Мета і завдання дослідження** – на основі методики визначення ризиків техногенних об'єктів та моделювання процесів виникнення і розвитку аварій розглянути метод кількісного аналізу ризику аварій на техногенних об'єктах. Надати застосування математичної імовірнісної моделі для прогнозування індивідуального і соціального ризику з використанням автоматизованої комп'ютерної системи.

**Матеріали та методи дослідження.** Внеском в реалізацію закону України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» і певним кроком на шляху вирішення проблеми оцінки ризику слід вважати розробку Методики визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки, що затверджена Наказом Міністерства праці та соціальної політики України №637 від 04.12.2002. Вперше у вітчизняну нормативну систему введений документ, що містить термінологію і методологію аналізу ризику. Ризик або ступінь ризику пропонується розглядати як поєднання частоти (імовірності) і наслідків конкретної небезпечної події. Математичне вираження ризику  $P$  – це співвідношення числа несприятливих проявів небезпеки  $k$  до їх можливого числа  $K$  за певний період часу, тобто  $P = k / K$ . Крім цього використовується поняття «ступінь ризику»  $R$ , тобто імовірність настання небажаної події з урахуванням розміру можливих збитків від події. Ступінь ризику можна подати як математичне очікування величини збитку від небажаної події [7]:

$$R(u) = \sum_{n=1}^k p_n u_n \quad (1)$$

де  $p_n$  – імовірність настання події, пов'язаної зі збитком;  $u_n$  – випадкова величина збитку, заподіяного економіці, здоров'ю і т.п.

Прийнято розрізняти:

- *індивідуальний ризик* – імовірність загибелі людини при даному виді діяльності;
- *соціальний ризик* – залежність числа загиблих людей від частоти виникнення події, що викликає ураження цих людей.

Значення індивідуального ризику використовується для кількісної оцінки потенційної небезпеки конкретного робочого місця, виду діяльності та робочої зони, соціального – для інтегральної кількісної оцінки небезпечних техногенних об'єктів, характеристики масштабу впливу аварії [8]. Особливу роль для суспільства відіграє встановлення прийнятного ризику. У зарубіжній практиці при вирішенні виробничих завдань вважається прийнятним значення індивідуального ризику  $10^{-8}$ . Індивідуальний ризик вище  $10^{-6}$  – неприйнятний. Однак ці значення – відправні дані для обґрунтування порогових значень ризику. Нормативу допустимого соціального ризику не існує.

## ІНФОРМАЦІЙНІ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ

Побічно соціальний ризик визначається небезпекою техногенних об'єктів. Оцінка безпеки об'єктів передбачає аналіз небезпечних чинників, встановлення чисельних значень імовірності виникнення небезпечних ситуацій, аналіз їх розвитку та прогноз можливого числа загиблих людей.

Для прогнозування і оцінки ризику застосовуються різні методи мереж, графів, дерева причинно-наслідкового зв'язку тощо [9]. У методиці мінсоцполітики наведені характеристики якісних і кількісних методів, найбільш використовуваних при аналізі ризику. У методиці відзначена складність реалізації кількісних методів і невисока точність результатів. Однак необхідність мати кількісні показники ризику при прогнозуванні об'єктів, оцінці впливу небезпечних чинників, визначенні пріоритету захисних заходів вимагає подальшої розробки кількісних методів оцінки ризику [10]. Відносно просто і наочно прогнозування індивідуального і соціального ризику може бути подано за допомогою математичної імовірнісної моделі з використанням автоматизованої комп'ютерної системи. Робочим простором є майданчик техногенного об'єкта (у прикладі – автомобільна газозаправна станція (АГЗС), рис. 1) прямокутної форми з розмірами: довжина (вздовж осі  $x$ ) і ширина (уздовж осі  $y$ ). За початок координат прийнятий нижній лівий кут майданчика. Всі параметри мають єдину розмірність (м). Джерело безпеки приймається у вигляді центральної його точки з координатами  $(x, y)$ .



Рис. 1. Робочий простір для оцінки ризику аварії на АГЗС

Імовірність аварії розраховується так само, як для складного об'єкта, в роботі якого –  $C_e$  етапів із задіянням  $C_{Sn}$  систем на  $n$ -му етапі. Причому кожній  $m$ -й системі відповідає імовірність її відмови  $P(F_{nm})$ . Кожна система може мати відмови при роботі в різних комбінаціях, як це подано на рис.2. Для кожної такої комбінації визначається імовірність виникнення аварії [11]. Так, в роботі АГЗС можна виділити етапи: злив палива з автоцистерни в резервуари, заправка автомобільних балонів і т.д. На етапі зливу палива ( $n = 1$ ) задіяна комбінація з чотирьох систем – автоцистерни ( $m = 1$ ), резервуарної ємності ( $m = 2$ ), трубопроводів ( $m = 3$ ) і насосної установки ( $m = 4$ ). На етапі заправки автомобільного балона ( $n = 2$ ) працює комбінація з п'яти систем – резервуарної ємності ( $m = 2$ ), насосної установки ( $m = 4$ ), газозаправної колонки ( $m = 5$ ), гнучкого заправного рукава ( $m = 6$ ) і автомобільного газового балона ( $m = 7$ ). Етапи

роботи агрегата приймаються незалежними один щодо одного. Якщо прийняти  $C_{gn} = 2^{C_{Sn}}$  – кількість комбінацій на  $n$ -му етапі,  $T_g^m = (g/2^m)/2$  – стан  $m$ -го біта в двійковому поданні числа  $g$  (0 або 1), а  $g$  приймає всі можливі значення від 0 до  $C_{gm} - 1$ , то імовірність аварії на об'єкті буде:

$$(E) = \sum_{n=1}^{C_e} \sum_{g=0}^{C_{gm}} \left[ P(E_{ng}) \prod_{m=0}^{C_{Sn}} \begin{cases} P(F_{nm}), T_g^n = 0 \\ 1 - P(F_{nm}), T_g^n = 1 \end{cases} \right] \quad (2)$$

де  $P(E_{ng})$  – імовірність аварії агрегата при  $g$ -й комбінації роботи систем на  $n$ -му етапі;  $P(F_{nm})$  – імовірність відмови  $m$ -ї системи на  $n$ -му етапі.

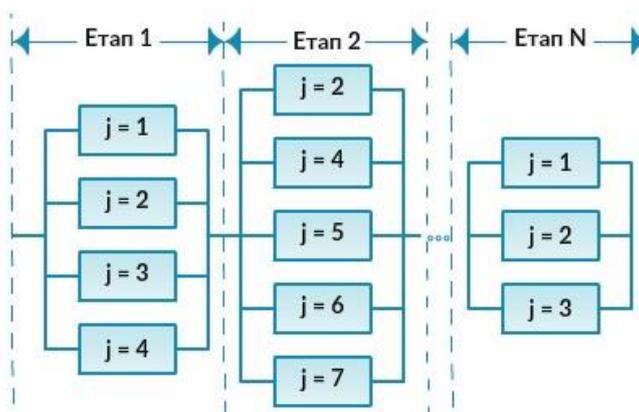


Рис. 2. Схема роботи складного агрегата

Небезпечна зона, яка характеризує вплив небезпечних факторів на людину, має центр в точці знаходження агрегата ( $X_E, Y_E$ ) і вважається експоненціально розподіленою з параметром  $\lambda$ . Такий розподіл досить добре описує картину аварійної ситуації, оскільки саме за таким законом загасає швидкість уламків, що розлітаються, відбувається дифузія токсичної пари і газів і т.д [12].

Формула для визначення імовірності впливу небезпечних чинників:

$$R_E(x, y) = P(E)R(x, y) = P(E)\lambda e^{-\lambda d} \quad (3)$$

де  $d = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2}$ ;  $R(x, y)$  – імовірність впливу вражаючого фактора в точках  $(x, y)$  при аварії.

Персонал об'єкта має чисельність  $C_v$ , у кожного співробітника є робоче місце з координатами ( $X_g, Y_g$ ). Поле розподілу персоналу в робочому приміщенні біля джерела небезпеки задається нормальним розподілом з параметром  $\sigma_g$ , що підтверджується багаторічними дослідженнями [13]. Імовірність знаходження  $g$ -го співробітника в точках  $(x, y)$  [14]:

$$P_{Vg}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_g^2} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-x_g)^2}{\sigma_g^2} + \frac{(y-y_g)^2}{\sigma_g^2}\right]} \quad (4)$$

Відповідно до цього індивідуальний ризик розраховується за формулою:

$$R_g = \sum_{x_n} \sum_{y_n} P_{Vg}(x_n, y_n) R_E(x_n, y_n) \quad (5)$$

де  $x_n, y_n$  визначаються екранним растром як сітка з кроком  $h$ :

$$h = \frac{\max(H, W)}{100} \quad (6)$$

де  $H$  – довжина;  $W$  – ширина робочої площі.

Соціальний ризик, тобто імовірність загибелі  $k$  людей, задається залежністю [15]:

$$R_k = \sum_{g=1}^{C_V} \left[ \sum_{x_n} \sum_{y_n} P_{Vg}(x_n, y_n) R_E(x_n, y_n) \right] \quad (7)$$

Для розрахунку індивідуального і соціального ризику на техногенному об'єкті на основі поданої математичної моделі необхідні вихідні дані для розрахунку. Ці дані приймаються з урахуванням специфіки розглянутого техногенного об'єкта і включають параметри, наведені на рис. 3.



**Рис. 3. Вихідні дані для математичної моделі оцінки ризику технічної системи**

На основі заданих параметрів і прийнятих математичних залежностей розраховують: імовірність аварії на небезпечному техногенному об'єкті, розподіл персоналу і небезпечної зони по об'єкту, а також індивідуальний і соціальний ризику [16]. Результати розрахунку виводяться у вікні автоматизованої комп'ютерної системи в графічній формі у вигляді розподілу ризику персоналу і небезпечних зон по робочій площі (рис. 4).

## ІНФОРМАЦІЙНІ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ



Рис. 4. Розподіл зон ризику на території техногенного об'єкта

Напрямом розвитку розглянутого імовірнісного методу слід вважати дослідження змін параметра небезпечної зони  $\lambda$ , що характеризує вплив небезпечних факторів (ударна хвиля, дифузія токсичних речовин, розліт уламків від вибуху і т.п.), а також уточнення параметра експоненціального розподілу за фактичними даними про параметр небезпечної зони [17].

**Висновки.** Пропонований метод аналізу ризику дозволяє прогнозувати розподіл небезпечних зон при аварії; розподіл працівників на об'єкті при аварії (імовірнісний); індивідуальний і соціальний ризику для працівників на виробничій площі (закономірність).

Прогнозування ризику дає можливість інформувати працівників про ризик, підвищувати ефективність розроблюваних заходів захисту персоналу при аварії, а також запобігати негативним наслідкам аварій.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Liu H. C., Liu L., Liu N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review //Expert systems with applications. – 2013. – Т. 40. – №. 2. – С. 828-838.
2. Tinga T. Introduction: The Basics of Failure //Principles of Loads and Failure Mechanisms. – Springer, London, 2013. – С. 3-10.
3. Levitin G. et al. Reliability of non-repairable phased-mission systems with propagated failures //Reliability Engineering & System Safety. – 2013. – Т. 119. – С. 218-228.
4. Han X., Zhang J. A combined analysis method of FMEA and FTA for improving the safety analysis quality of safety-critical software //Granular computing (GrC), 2013 IEEE international conference on. – IEEE, 2013. – С. 353-356.
5. Отрох С.І. Аналіз взаємозв'язку збитку з ризиком при виникненні техногенних аварій в концепції прийнятного ризику / С.І. Отрох, В.В. Завгородній, Г.А. Завгородня // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2018. №2 (59). – С. 117-123. DOI: 10.31673/2412-4338-2018-0-2-117-123
6. Brunelli M. Introduction to the analytic hierarchy process. – Springer, 2014.
7. Lu J. M., Wu X. Y. Reliability evaluation of generalized phased-mission systems with repairable components //Reliability Engineering & System Safety. – 2014. – Т. 121. – С. 136-145.
8. Завгородній В.В. Метод подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій / В.В. Завгородній, Г.А. Завгородня // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2018. – Випуск 4 (111). – С. 43–48. DOI:10.30929/1995-0519.2018.4.43-48

9. Xing L., Levitin G. BDD-based reliability evaluation of phased-mission systems with internal/external common-cause failures // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2013. – Т. 112. – С. 145-153.
10. Wu W. et al. Reliability analysis of a k-out-of-n: G repairable system with single vacation // *Applied Mathematical Modelling*. – 2014. – Т. 38. – №. 24. – С. 6075-6097.
11. Ruijters E., Stoelinga M. Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools // *Computer science review*. – 2015. – Т. 15. – С. 29-62.
12. Hua D. et al. Reliability estimation of load sharing capacity-c-out-of-n pairs: G Balanced system // *Prognostics and System Health Management Conference (PHM)*, 2015. – IEEE, 2015. – С. 1-8.
13. Zhai Q. et al. Multi-Valued Decision Diagram-Based Reliability Analysis of k-out-of-n Cold Standby Systems Subject to Scheduled Backups // *IEEE Transactions on Reliability*. – 2015. – Т. 64. – №. 4. – С. 1310-1324.
14. Ветошкин А.Г. Техногенный риск и безопасность / А.Г. Ветошкин, К.Р. Таранцева // – Пенза: ПГУ, 2001. – 171 с.
15. *Завгородній В.В.* Модель управління ризиком об'єктів підвищеної небезпеки / В.В. Завгородній, Г.А. Завгородня // *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. – 2018. №18 (58). DOI:10.25313/2520-2057-2018-18-4261
16. Coit D. W. et al. Dynamic k-out-of-n system reliability with component partnership // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2015. – Т. 138. – С. 82-92.
17. *Отрох С.І.* Аналіз методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру / С.І. Отрох, В.В. Завгородній, Г.А. Завгородня // *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку*. – 2018. №3 (51). – С. 36-46.

## REFERENCES

1. Liu, H. C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert systems with applications*, 40(2), 828-838.
2. Tinga, T. (2013). Introduction: The Basics of Failure. In *Principles of Loads and Failure Mechanisms* (pp. 3-10). Springer, London.
3. Levitin, G., Xing, L., Amari, S. V., & Dai, Y. (2013). Reliability of non-repairable phased-mission systems with propagated failures. *Reliability Engineering & System Safety*, 119, 218-228.
4. Han, X., & Zhang, J. (2013, December). A combined analysis method of FMEA and FTA for improving the safety analysis quality of safety-critical software. In *Granular computing (GrC), 2013 IEEE international conference on* (pp. 353-356). IEEE.
5. Otrok, S.I., Zavorodnii, V.V., & Zavorodnya, G.A. (2018). Analiz vzayemozv'yazku zbytku z ryzykom pry vynyknenni tekhnohennykh avaryi v kontseptsii pryynatnoho ryzyku [Analysis of interaction of risk damage in the case of technogenic accidents in the concept of acceptable risk]. *Telekomunikatsiyni ta informatsiyni tekhnolohiyi – Telecommunication and Information Technologies*, 2 (59), 117-123, DOI: 10.31673/2412-4338-2018-0-2-117-123 [in Ukrainian]
6. Brunelli, M. (2014). Introduction to the analytic hierarchy process. Springer.
7. Lu, J. M., & Wu, X. Y. (2014). Reliability evaluation of generalized phased-mission systems with repairable components. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 136-145.
8. Zavorodnii, V.V., & Zavorodnya, G.A. (2018). Metod podannya znan' pro otsinku ryzyku vynyknennya tekhnohennykh avaryi [Method of representation of knowledge about the assessment of risk of appearance of technogenic accidents]. *Visnyk Kremenchuts'koho natsional'noho universytetu imeni Mykhayla Ostrohrads'koho – Bulletin of Kremenchuk Mykhaylo Ostrohradskyi National University*, 4 (111), 43-48, DOI:10.30929/1995-0519.2018.4.43-48 [in Ukrainian]
9. Xing, L., & Levitin, G. (2013). BDD-based reliability evaluation of phased-mission systems with internal/external common-cause failures. *Reliability Engineering & System Safety*, 112, 145-153.
10. Wu, W., Tang, Y., Yu, M., & Jiang, Y. (2014). Reliability analysis of a k-out-of-n: G repairable system with single vacation. *Applied Mathematical Modelling*, 38(24), 6075-6097.
11. Ruijters, E., & Stoelinga, M. (2015). Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. *Computer science review*, 15, 29-62.
12. Hua, D., Elsayed, E. A., Al-Khalifa, K. N., & Hamouda, A. S. (2015, October). Reliability estimation of load sharing capacity-c-out-of-n pairs: G Balanced system. In *Prognostics and System Health Management Conference (PHM)*, 2015 (pp. 1-8). IEEE.

13. Zhai, Q., Xing, L., Peng, R., & Yang, J. (2015). Multi-Valued Decision Diagram-Based Reliability Analysis of  $k$ -out-of- $n$  Cold Standby Systems Subject to Scheduled Backups. *IEEE Transactions on Reliability*, 64(4), 1310-1324.
14. Vetoshkin, A.G. (2001). *Tekhnogennyy risk i bezopasnost' [Technogenic risk and safety]*. Penza: PSU, [in Russian]
15. Zavgorodnii, V.V., & Zavgorodnya, G.A. (2018). Model' upravlinnya ryzykom ob'yektiv pidvyshchenoyi nebezpeky [Risk management model of high danger objects]. *Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal "Internauka" – International scientific journal «Internauka»*, 18 (58), DOI:10.25313/2520-2057-2018-18-4261 [in Ukrainian]
16. Coit, D. W., Chatwattanasiri, N., Wattanapongsakorn, N., & Konak, A. (2015). Dynamic k-out-of-n system reliability with component partnership. *Reliability Engineering & System Safety*, 138, 82-92.
17. Otrokh, S.I., Zavgorodnii, V.V., & Zavgorodnya, G.A. (2018). Analiz metodiv podannya znan' pry rozpoznavanni nadzvychaynykh situatsiy tekhnogennoho kharakteru [Analysis of the methods of presentation of knowledge in the recognition of emergency situations of anthropogenic nature]. *Naukovi zapysky Ukrayins'koho naukovo-doslidnoho instytutu zv'yazku. – Scientific notes of the Ukrainian Research Institute of Communication*, 3 (51), 36-46 [in Ukrainian]

**Анна Анатольевна Завгородняя,**  
**(старший преподаватель кафедры Информационных технологий,**  
**Государственный университет инфраструктуры и технологий);**  
**Валерий Викторович Завгородний, к.т.н, доцент**  
**(доцент кафедры Информационных технологий, Государственный**  
**университет инфраструктуры и технологий)**

#### МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ РИСКА ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*Рассмотрен метод количественного анализа риска аварий на техногенных объектах на основе методики определения рисков техногенных объектов и моделирования процессов возникновения и развития аварий. Представлены применения математической вероятностной модели для прогнозирования индивидуального и социального риска с использованием автоматизированной компьютерной системы.*

**Ключевые слова.** техногенный объект, источник опасности, вероятность, индивидуальный риск, социальный риск, оценка риска, прогнозирование риска

**Anna Zavgorodnya**  
**(Senior teacher of Department of information technology, State University**  
**of Infrastructure and Technologies)**  
**Valerii Zavgorodnii, PhD (Technical Sciences), Associate Professor**  
**(Associate Professor of Department of information technology, State University**  
**of Infrastructure and Technologies)**

#### METHOD OF QUANTIFICATION OF RISK OF TECHNICAL SYSTEM

*Risk analysis is important on dangerous man-made objects due to the need to provide anecdotal safety and prevent accidents. It involves obtaining quantitative estimates of the potential danger of man-made objects and recommendations for its reduction through the implementation of appropriate engineering, technical and organizational measures. The method of quantitative analysis of the risk of accidents on man-made objects is considered*

*the basis of the methodology for determining the risks of man-made objects and modeling the processes of occurrence and development of accidents. We introduced the application of a mathematical probabilistic model for predicting individual and social risk using an automated computer system. According to the Cabinet of Ministers of Ukraine "On the identification and declaration of safety of high-risk objects", the declaration of dangerous industrial activities is carried out, an important direction of implementation of which is the development of a method for quantitative analysis of the risk of accidents on man-made objects. The method of risk analysis allows predicting the distribution of hazardous areas in the event of an accident, the distribution of workers at the facility at the accident (probabilistic), and the individual and social risks for workers in the production area (regularity). Risk forecasting allows employees to be informed about risks, improve the effectiveness of the personnel protection measures being developed in the event of an accident, and prevent the negative consequences of accidents.*

**Keywords:** *man-made object, source of danger, probability, individual risk, social risk, risk assessment, risk forecasting.*