

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.59.98.003

УДК 331.453

© А. И. Фомин, Д. А. Бесперстов, В.А. Петрова, 2025

А. И. ФОМИН

д-р техн. наук, проф.,
профессор кафедры
КузГТУ, г. Кемерово
e-mail: fai.aotr@kuzstu.ru



Д. А. БЕСПЕРСТОВ

канд. техн. наук,
доцент кафедры
КемГУ, г. Кемерово
e-mail: gpnbesperstov@yandex.ru



В.А. ПЕТРОВА

студент
КемГУ, г. Кемерово
e-mail: valera_petrova@inbox.ru



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА РАБОТНИКОВ

В статье приведена методика оценки условий труда работников на основе имеющихся производственных рисков, описывающая опасные условия труда работников в зависимости от производственного травматизма и пожаров. Представлен анализ существующих в настоящее время методов моделирования, используемых для оценки производственных рисков от различных опасных факторов. В виде графиков и таблиц рассмотрены основные показатели человеческих потерь и финансовых расходов от производственного травматизма.

Так, математическая модель представлена в виде дифференциальных уравнений, описывающих число погибших и пострадавших работников на объектах за определенный промежуток времени. На основе выявленных зависимостей проведена оценка производственного травматизма, а также пожаров и их последствий на угольных предприятиях Кемеровской области — Кузбасса за многолетний период. Так, предложенная модель может быть использована для разработки способов прогнозирования и управления рисками на опасных производственных объектах.

Ключевые слова: ОПАСНЫЕ УСЛОВИЯ ТРУДА, БЕЗОПАСНОСТЬ ТРУДА, ПРОФИЛАКТИКА НАРУШЕНИЙ, ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ПРОФИЛАКТИКА РИСКОВ, УГЛЕДОБЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ТРАВМАТИЗМА, ПРОТИВОПОЖАРНАЯ ЗАЩИЩЕННОСТЬ

АКТУАЛЬНОСТЬ

Российская Федерация является страной с развитой производственной отраслью. В свою очередь, деятельность производственных объектов сопровождается опасными факторами для их работников. Данное говорит о том, что от работодателя требуется принятие мер по обеспечению безопасности труда работников [1, 2].

Основные опасные факторы производства представлены на рис. 1 в виде блок-схемы [3, 4].

Так, описанные производственные факторы могут возникнуть на предприятии в результате нарушения эксплуатации, монтажа и проектирования технологического

оборудования, а также пожаров, взрывов, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Оценка уровня производственного травматизма осуществляется следующими методами:

- статистическим – изучение травматизма и его тяжести. Специфика данного метода представлена на рис. 2 в виде блок-схемы [5];
- топографическим – по местам возникновения;
- монографическим – комиссионным исследованием для оценки травмирования группы лиц;
- экономическим – определение величины материального ущерба.

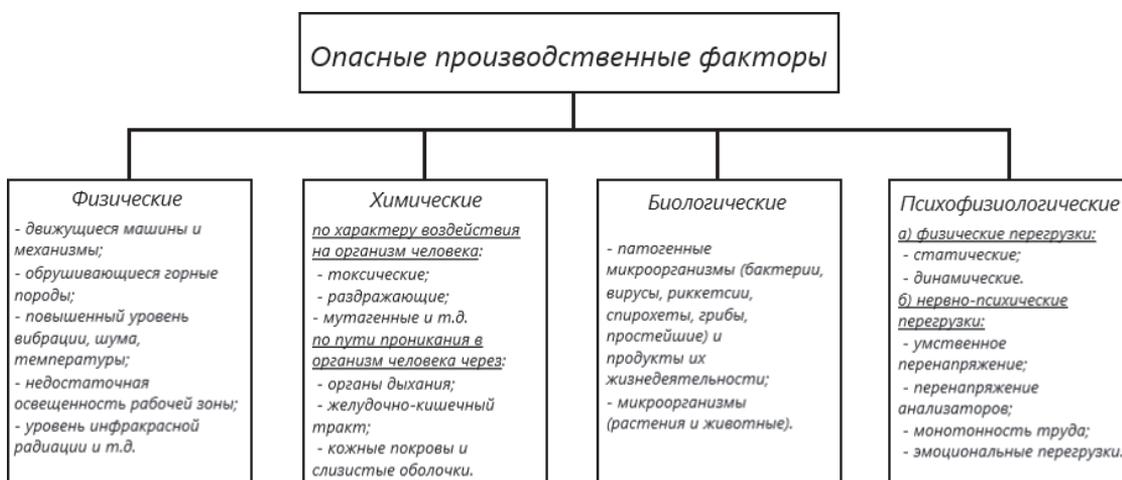


Рис. 1. Перечень опасных производственных факторов

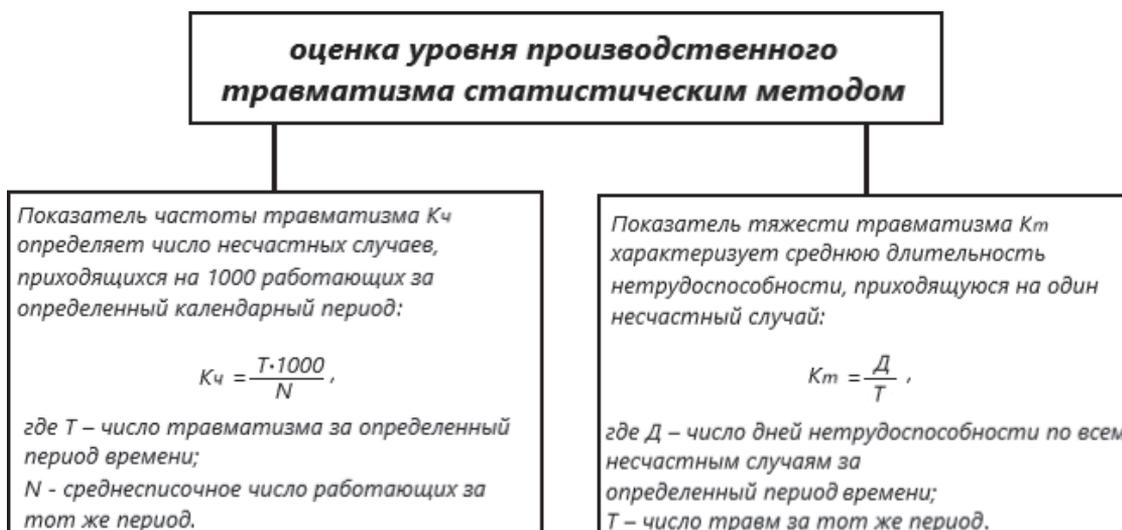


Рис. 2. Статистический метод оценки уровня производственного травматизма

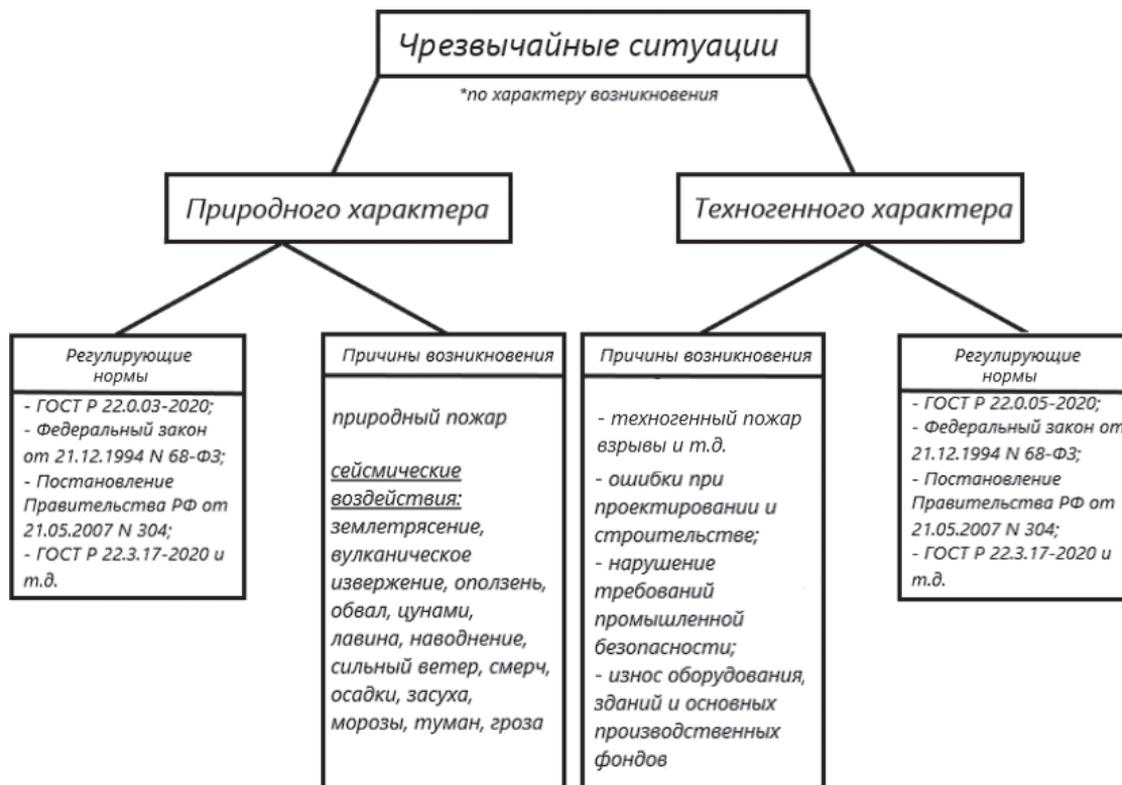


Рис. 3. Чрезвычайные ситуации по характеру возникновения, регулирующие их нормы и причины

В свою очередь, чрезвычайные ситуации оцениваются по характеру и причинам их возникновения в соответствии с рис. 3.

Производственные риски, чрезвычайные ситуации и пожары имеют малопредсказуемый характер, следовательно, необходимо их детальное изучение с математическим обоснованием профилактических мероприятий [6].

Рассмотрим основные показатели людских потерь и финансовых расходов от производственного травматизма в виде табл. 1.

Как видно из статистических показателей, социальный ущерб снижается, что отражено на рис. 4–6.

Согласно данным графикам, наглядно видна положительная зависимость влияния рисков на обеспечение безопасности труда работников и на их гибель на производстве.

Для оценки вероятностных критериев применим понятия фактических рисков происшествия на предприятии: фактический риск возникновения происшествия на объекте ($R_{пр.факт}$), ущерба ($R_{ущ.факт}$), пострадавших ($R_{постр.факт}$) и погибших работников ($R_{гиб.факт}$). Рассматриваемые риски можно представить в следующем виде [7, 8]:

Таблица 1

Гибель, травмирование работников и финансовые расходы на предупреждение негативных производственных факторов

Наименование показателя	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Численность пострадавших при несчастных случаях на производстве, тыс. человек	151.8	144.7	127.7	106.7	87.8	77.7	70.7	66.1	58.3	46.1	47.7	43.6	40.4	35.6	31.3	28.2	26.7	25.4	23.6	23.3	20.5	21.6	20.3
из них со смертельным исходом	4.4	4.37	3.92	3.54	3.29	3.09	2.9	2.99	2.55	1.97	2	1.82	1.82	1.7	1.46	1.29	1.29	1.14	1.07	1.06	0.91	1.21	1.07
Израсходовано средств на мероприятия по охране труда в расчете на 1 работающего, рублей	995	1420	1683	1995	2505	3197	3752	4726	5506	6493	6724	7966	8758	8881	9616	10930	11480	12965	14246	14862	18825	20476	21997
Отношение расходов к травматизму	6.555	9.813	13.18	18.69	28.53	41.15	53.07	71.49	94.44	140.8	141	182.7	216.8	249.5	307.2	387.6	430	510.4	603.7	637.9	918.3	948	1084

$$R_{\text{пр.факт}} = \frac{N_{\text{пр.}}}{Q_{\text{об.}}}, \quad (1)$$

$$R_{\text{ущ.факт}} = \frac{P_{\text{ущ.}}}{P_{\text{имущ.}}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{пр.}}$ — количество происшествий, шт.;
 $Q_{\text{об.}}$ — количество производственных объектов по виду деятельности, шт.;

где $P_{\text{ущ.}}$ — ущерб от происшествия, руб.;
 $P_{\text{имущ.}}$ — стоимость недвижимого и движимого имущества предприятия, руб.;



Рис. 4. Социальный ущерб от несчастных случаев на производстве

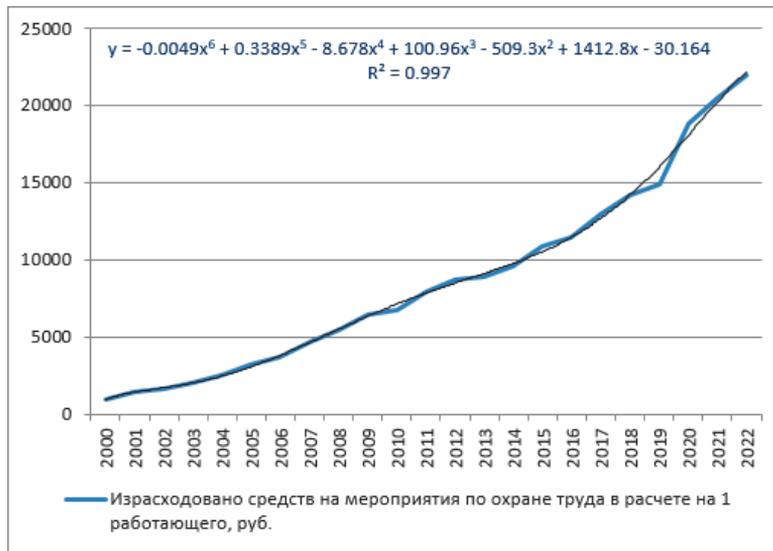


Рис. 5. Экономические затраты на безопасные условия труда работников



Рис. 6. Социально-экономическая зависимость расходов на безопасность работников по отношению к их травмированию

$$R_{\text{постр.факт}} = \frac{N_{\text{постр.}}}{Q_{\text{рабoтн.об.}}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{постр.}}$ — количество пострадавших работников на объектах по виду деятельности, чел.; $Q_{\text{рабoтн.об.}}$ — количество работников на объектах по виду деятельности, чел.;

$$R_{\text{гиб.факт}} = \frac{N_{\text{гиб.}}}{Q_{\text{рабoтн.об.}}}, \quad (4)$$

где $N_{\text{гиб.}}$ — количество погибших работников от несчастных случаев, чел.

В свою очередь, изменения во времени погибших и пострадавших работников будет описываться следующим дифференциальным уравнением [9, 10]: для описания погибших работников:

$$Q_{\text{рабoтн.об.}} \frac{\partial R_{\text{гиб.факт.}}}{\partial \tau} = 0,0001\Delta\tau^3 + 0,0026\Delta\tau^2 - 0,2896\Delta\tau + 4,7577,$$

для описания пострадавших работников при возникновении происшествий:

$$Q_{\text{рабoтн.об.}} \frac{\partial R_{\text{постр.факт.}}}{\partial \tau} = -0,00004\Delta\tau + 0,0033\Delta\tau^5 - 0,949\Delta\tau^4 + 1,2775\Delta\tau^3 - 7,43\Delta\tau^2 + 2,0789\Delta\tau + 158,13, \quad (6)$$

Вышеуказанные зависимости являются математическим описанием социальных последствий производственных рисков.

Далее перейдём к следующим опасным производственным факторам — пожарам. Рассмотрим статистику пожаров и их последствий на производственных предприятиях, а также их количество на угольных объектах Кемеровской области – Кузбасса [11, 12]. Данные представлены в виде табл. 2.

Согласно данным статистическим показателям, построим графики изменения параметров во времени. Далее построим полиномиальные линии тренда, имеющие наиболее высокую величину достоверности, и выведем соответствующие математические зависимости.

По аналогии производственного травматизма и чрезвычайных ситуаций фактические риски возникновения пожаров и потерь от них будут рассчитываться по формулам:

$$R_{\text{пoж.факт}} = \frac{N_{\text{пoж.}}}{Q_{\text{уп.}}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{пoж.}}$ — количество пожаров, произошедших на угольных предприятиях Кузбасса, шт.; $Q_{\text{уп.}}$ — количество угольных предприятий в Кузбассе, шт.

$$R_{\text{п.факт}} = \frac{N_{\text{п}}}{Q_{\text{чел.уп.}}}, \quad (8)$$

где $N_{\text{п}}$ — количество пострадавших работников угольных предприятий от пожаров в Кузбассе, шт.; $Q_{\text{чел.уп.}}$ — количество работников угольных предприятий Кузбасса, шт.

Таблица 2

Статистические показатели рисков возникновения негативных показателей при пожарах на угольных предприятиях в сравнении с другими производствами

года пара- метры	Количественные показатели на производственных объектах / на угольных предприятиях											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
пожары	58 / 5	48 / 1	54 / 4	41 / 3	56 / 1	59 / 4	41 / 1	52 / 2	51 / 1	87 / 20	83 / 12	48 / 16
гибель	2 / 0	5 / 0	2 / 0	0 / 0	2 / 0	3 / 0	2 / 0	1 / 0	0 / 0	7 / 0	2 / 0	1 / 1
травмы	3 / 2	1 / 0	0 / 0	1 / 0	2 / 0	3 / 0	2 / 0	1 / 0	7 / 0	10 / 0	4 / 0	8 / 6
ущерб, млн.	5,8 / 0,5	1,4 / 0,2	2,3 / 0,4	8,7 / 0,3	7,1 / 0,1	1,7 / 0,1	1,9 / 0	1,6 / 0	8,3 / 0	2,5 / 2	9,2 / 2,2	20 / 7,1

$$R_{п.факт} = \frac{N_{\Gamma}}{Q_{чел.у.п.}}, \quad (9)$$

где N_{Γ} — количество погибших работников от пожаров на территории Кузбасса, шт.

Также математическое моделирование по описанию динамики пожаров и их

последствий, исходя из статических показателей, построенным по ним графикам и выведенным формулам, будет описываться следующими зависимостями [13]:

для описания динамики пожаров:



Рис. 7. Изменение количества пожаров на производственных объектах и угольных предприятиях с 2010 по 2021 годы в Кузбассе



Рис. 8. Изменение количества пострадавших на производственных объектах и угольных предприятиях с 2010 по 2021 годы в Кузбассе



Рис. 9. Изменение количества погибших на производственных объектах и угольных предприятиях с 2010 по 2021 годы в Кузбассе



Рис. 10. Изменение экономического ущерба от пожаров на производственных объектах и угольных предприятиях с 2010 по 2021 годы в Кузбассе

$$Q_{\text{уп.}} \frac{\partial R_{\text{чс.факт.}}}{\partial \tau} = 0,0007\Delta\tau^6 - 0,034\Delta\tau^5 + 0,6111\Delta\tau^4 - 5,1781\Delta\tau^3 + 21,391\Delta\tau^2 - 39,911\Delta\tau + 28,152, (10)$$

для описания пострадавших работников на угольных предприятиях при возникновении пожара:

$$Q_{\text{чел.уп.}} \frac{\partial R_{\text{пож.факт.}}}{\partial \tau} = 0,0006\Delta\tau^6 - 0,0221\Delta\tau^5 + 0,3216\Delta\tau^4 - 2,3354\Delta\tau^3 + 8,8539\Delta\tau^2 - 16,466\Delta\tau + 11,667, (11)$$

для описания погибших работников на угольных предприятиях при возникновении пожара:

$$Q_{\text{уп.чел}} \frac{\partial R_{\text{пож.факт.}}}{\partial \tau} = 7 \cdot 10^{-5}\Delta\tau^6 - 0,0026\Delta\tau^5 + 0,0351\Delta\tau^4 - 0,23\Delta\tau^3 + 0,7533\Delta\tau^2 - 1,1327\Delta\tau + 0,5833, (12)$$

Система вышеизложенных предлагаемых дифференциальных уравнений является математической моделью, описывающей опасные условия труда работников в зависимости от производственного травматизма и пожаров, которые могут возникать на объектах [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Так, представленные математические модели позволяют оценить влияние опасных производственных факторов, а именно пожаров и травматизма, на работников. Стоит отметить, что дальнейшие исследования могут быть направлены на совершенствование представленной модели с внедрением в неё дополнительных критериев для оценки,

а также на её применение на конкретных производственных объектах.

Практической значимостью данной модели является обоснованность существующих рисков и возможность прогнозирования посредством перераспределения финансовых, материальных и человеческих ресурсов на необходимые мероприятия по предупреждению гибели или травматизма работников предприятия. Хотелось бы обратить внимание на то, что деятельность опасных производственных объектов влияет на безопасность близ проживающего населения, поэтому любые формы производственной безопасности положительно влияют на социальные и экономическое положение страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые производства России — 2023 [Электронный ресурс] // ООО «ТЕНЧАТ», 2023. URL: <https://tenchat.ru/media/1444564-novyue-proizvodstva-rossii--2023>
2. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ. Москва: ЦЕНТРМАГ, 2024. 144 с.
3. ГОСТ 12.0.003–2015. Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация: введен в действие Приказом Росстандарта от 09.06.2016 № 602-ст. Москва: ЦЕНТРМАГ, 2024. 16 с.
4. Трудовой кодекс Российской Федерации. Федеральный закон от 30.12.2001 № 197-ФЗ. Москва: ЦЕНТРМАГ, 2024. 440 с.
5. О специальной оценке условий труда. Федеральный закон от 28.12.2013 № 426-ФЗ. Москва: ЦЕНТРМАГ, 2024. 44 с.
6. Голик Е. С., Афанасьева О. В. Теория и методы статистического прогнозирования: учебное пособие. СПб: Изд-во СЗТУ, 2007. 182 с.
7. Li F., Duan B., Sun Y., He X., Li Z., Wang B. Quantitative risk assessment model of working positions for roof accidents in coal mine // Safety Science. 2024. No. 1178. P. 106628.
8. Ren J. Jahromi M.Z., Van Nguyen T., Utne I.B., Goerlandt F. Determining essential criteria for selection of risk assessment techniques in occupational health and safety: A hybrid framework of fuzzy Delphi method // Safety Science. 2023. No. 167. P. 106253.
9. Mrozowska A. Formal Risk Assessment of the risk of major accidents affecting the natural environment and human life, occurring as a result of offshore drilling and production operations based on the provisions of Directive 2013/30/EU // Safety Science. 2021. No. 134. P. 105007.
10. Королук В. С., Портенко Н. И., Скороход А. В., Турбин А. Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. Киев: ЦЕНТРМАГ, 2025. 584 с.
11. Фомин А. И., Бесперстов Д. А., Моисеев А. А., Просин М. В. Профилактика нарушений обязательных требований в области пожарной безопасности на предприятиях угольной промышленности при возникновении чрезвычайной ситуации в мирное и военное время // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2021. № 2. С. 41–46.

12. Статистика травматизма на производстве в России [Электронный ресурс] // URL: <https://oxrana-bez.ru/stati/statistika-travmatizma-na-proizvodstve-v-rossii/?ysclid=lnnndpktvb519721743> (дата обращения 27.03.2025).

13. Фомин А. И., Бесперстов Д. А., Сайбель С. Ю. Выполнение комплекса противопожарных мероприятий на объектах — важнейший элемент снижения риска гибели людей при пожарах // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири СИБРЕСУРС 2016: Материалы XVI Международной научно-практической конференция (Кемерово, 23–24 ноября 2016 г.). Кемерово: КузГТУ, 2016. С. 160–165.

14. О промышленной безопасности опасных производственных объектов [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 11.06.2021). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/6e24082b0e98e57a0d005f9c20016b1393e16380/ (дата обращения: 28.03.2025).

DOI: 10.25558/VOSTNII.2025.59.98.003

UDC 331.453

© A. I. Fomin, D. A. Besperstov, V. A. Petrova, 2025

A. I. FOMIN

Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Professor of the Department
KuzSTU, Kemerovo
e-mail: fai.aotp@kuzstu.ru

D. A. BESPERSSTOV

Candidate of Engineering Sciences
Associate Professor
KemSU, Kemerovo
e-mail: gpnbesperstov@yandex.ru

V. A. PETROVA

Student
KemGU, Kemerovo
e-mail: valera_petrova@inbox.ru

MATHEMATICAL MODELING OF DANGEROUS WORKING CONDITIONS OF WORKERS

The article presents a methodology for assessing the working conditions of employees based on existing production risks, describing the dangerous working conditions of employees depending on occupational injuries and fires. The analysis of currently existing modeling methods used to assess production risks from various hazards is presented. The main indicators of human losses and financial expenses from occupational injuries are considered in the form of graphs and tables.

Thus, the mathematical model is presented in the form of differential equations describing the number of dead and injured workers at facilities over a certain period of time. Based on the identified dependencies, an assessment of occupational injuries, as well as fires and their consequences at coal enterprises in the Kemerovo region — Kuzbass over a long-term period was carried out. Thus, the proposed model can be used to develop methods for forecasting and managing risks at hazardous production facilities.

Keywords: HAZARDOUS WORKING CONDITIONS, OCCUPATIONAL SAFETY, PREVENTION OF VIOLATIONS, INDUSTRIAL SAFETY, PREVENTION OF RISKS, COAL MINING INDUSTRY, INJURY PREVENTION, FIRE PROTECTION.

REFERENCES

1. New production facilities in Russia — 2023 [Electronic resource] // TENCHAT LLC, 2023. URL: <https://tenchat.ru/media/1444564-novyie-proizvodstva-rossii--2023>. [In Russ].
2. Technical regulations on fire safety requirements. Federal Law No. 123-FZ of July 22, 2008. Moscow: TSENTRMAG, 2024. 144 p. [In Russ].
3. GOST 12.0.003–2015. The interstate standard. A system of occupational safety standards. Dangerous and harmful production factors. Classification: put into effect by Rosstandart Order No. 602 dated 06/09/2016. Moscow: TSENTRMAG, 2024. 16 p. [In Russ].
4. The Labor Code of the Russian Federation. Federal Law No. 197-FZ dated December 30, 2001. Moscow: TSENTRMAG, 2024. 440 p. [In Russ].
5. About a special assessment of working conditions. Federal Law No. 426-FZ dated December 28, 2013. Moscow: TSENTRMAG, 2024. 44 p. [In Russ].
6. Golik E. S., Afanasyeva O. V. Theory and methods of statistical forecasting: a textbook. St. Petersburg: Publishing House of NWTU, 2007. 182 p. [In Russ].
7. Li F., Duan B., Sun Y., He X., Li Z., Wang B. Quantitative risk assessment model of working positions for roof accidents in coal mine // Safety Science. 2024. No. 1178. P. 106628.
8. Ren J. Jahromi M.Z., Van Nguyen T., Utne I.B., Goerlandt F. Determining essential criteria for selection of risk assessment techniques in occupational health and safety: A hybrid framework of fuzzy Delphi method // Safety Science. 2023. No. 167. P. 106253.
9. Mrozowska A. Formal Risk Assessment of the risk of major accidents affecting the natural environment and human life, occurring as a result of offshore drilling and production operations based on the provisions of Directive 2013/30/EU // Safety Science. 2021. No. 134. P. 105007.
10. Korolyuk V. S., Portenko N. I., Skorokhod A.V., Turbin A. F. Handbook of Probability Theory and Mathematical Statistics. Kiev: MAG CENTER, 2025. 584 p. [In Russ].
11. Fomin A. I., Besperstov D. A., Moiseev A. A., Prosin M. V. Prevention of violations of mandatory fire safety requirements at coal industry enterprises in case of emergency in peacetime and wartime // Bulletin of the Scientific Center for Safety of Work in the Coal Industry [Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti]. 2021. No. 2. P. 41–46. [In Russ].
12. Occupational injury statistics in Russia [Electronic resource] // URL: <https://oxrana-bez.ru/stati/statistika-travmatizma-na-proizvodstve-v-rossii/?ysclid=lwnndpktvb519721743> (date of access 27.03.2025). [In Russ].
13. Fomin A. I., Besperstov D. A., Saibel S. Y. The implementation of a complex of fire — fighting measures at facilities is the most important element in reducing the risk of death in fires // Natural and intellectual resources of Siberia SIBRESURS 2016: Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference (Kemerovo, November 23-24, 2016). Kemerovo: KuzSTU, 2016. P. 160–165. [In Russ].
14. On Industrial Safety of Hazardous Production facilities [Electronic resource]: Federal Law No. 116-FZ dated 07/21/1997 (as amended on 06/11/2021). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/6e24082b0e98e57a0d005f9c20016b1393e16380/ (date of access: 28.03.2025). [In Russ].