

УДК 621.3:622:519.24

Кобылянский Б.Б.

Украинская инженерно-педагогическая академия

Мнухин А.Г.

Запорожская государственная инженерная академия

АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ, ОПАСНЫХ ПО ГАЗУ ИЛИ ПЫЛИ, С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЙ ПЕРСОНАЛА, СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И СРЕДЫ

Рассмотрены производственные комплексы, в т. ч. шахта, с позиции человек – машина – среда. По единой методике проведена оценка безопасности с последующим нормированием требуемых вероятностей нормальной или безаварийной работы предприятия с учетом действий обслуживающего персонала и влияния окружающей среды. Разработана методология оценки возможной аварийности, на этой основе выполнены расчеты, обеспечивающие оптимальный выбор последовательности действий по ее предупреждению. Предложенная методология позволяет повысить безопасность работы горного производства путем оптимального расположения имеющихся на конкретном предприятии материально-технических ресурсов.

Ключевые слова: методы регрессионного анализа, анализ безопасности, сложные эргатические системы.

Постановка проблемы. Участвовавшие в последнее годы на шахтах Украины крупные аварии со значительными социальными и материальными потерями влекут за собой необходимость анализа произошедшего с разных позиций, с использованием разных методов. Термины «анализ риска» и «оценка риска» достаточно известны специалистам, так как именно на них базируются критерии надежности и требования безопасности к эргатическим системам.

Общий уровень травматизма в Украине остается достаточно высоким, одним из самых высоких в мире. И если на предприятиях с высокой долей частного капитала, например у ДТЭК Павлоградуголь, в 2017 г. при повышении объемов добычи до 20 млн тонн угля в год уровень травматизма на шахтах снизился на 9%, то на предприятиях государственной собственности, по данным, представленным председателем Независимого профсоюза горняков Украины Михаилом Волинцом УНИАН в 2016 г., количество несчастных случаев со смертельным исходом на государственных предприятиях угольной отрасли Украины увеличилось в 2 раза. Согласно пресс-релизу М. Волинца, количество случаев общего травматизма за 9 месяцев этого года выросло на 21,6%

по сравнению с аналогичным периодом прошлого года – до 355 случаев.

Численный анализ безопасности многофункциональных систем был введен в практику в начале 1970-х гг. после катастрофических аварий на подземных комплексах запуска межконтинентальных ракет. Ныне пришло время практической реализации подобных подходов для оценки и нормирования потенциального риска работы в промышленности, в частности на таком сложном эргатическом объекте, каким является угольная шахта, с определением риска как вероятности человеческих жертв и материальных потерь или повреждений.

Анализ последних исследований и публикаций. Попытки оценить безопасность в шахте предпринимались, в частности, применительно к системам подземного электроснабжения [1; 2], горношахтного оборудования методом планирования режима обслуживания [3], а также состояния горного массива, т. е. непосредственно окружающей среды [4]. Именно эти работы послужили основой нового научного направления, которое позволило установить численное взаимоотношение как между составляющими частями угольной шахты, опасной по выбросам газа или

пыли, так и эргатического объекта типа человек – машина – среда.

Согласно исследованиям [5; 6], угольную шахту с учетом взаимодействия обслуживающего персонала, оборудования и среды будем рассматривать как эргатическую систему человек – машина – среда. Нормальное функционирование данной системы определяется взаимодействием персонала, оборудования и среды, которые характеризуются соответственно работоспособностью, исправностью и оптимальностью. В зависимости от поддержания на должном уровне указанных параметров, в системе будет осуществляться работа нормальная, безаварийная или аварийная.

Изложение основного материала исследования. Анализ показал, что в отрасли не охвачена статистикой большая часть факторов, подлежащих анализу, например, виды ошибок персонала, а данные по другим факторам (состояние персонала, оборудование) имеют явно недостоверный характер. Поэтому наиболее целесообразно определять основные параметры, характеризующие работу шахты, опасной по газу или пыли, используя методы экспертных оценок [7], позволяющие при достаточно широком (до 90% угольных предприятий Украины) и компетентном круге опрашиваемых специалистов (технические директоры и специалисты по безопасности работ) корректно решить указанные проблемы.

Разработанная методология оценки возможной аварийности [8] и выполненные на ее основе расчеты, обеспечивающие оптимальный выбор последовательности действий по ее предупреждению, обладают существенным недостатком, характерным для расчетов такого типа, так как используют аппарат условных вероятностей. В результате расчетов не определена их статическая надежность, без которой практическая реализация анализа в определенной мере становится некорректной.

В этом случае для оценки собранного путем опроса специалистов статистического материала и полученных на эргатической основе расчетов было бы возможно применить методы параметрической статистики, алгоритм реализации которых подробно изложены в работе [10].

Уравнение регрессии, выходным фактором которого является P_a , построенное методами, изложенными в работах [10, 11], имеет вид:

$$P_a = 0,102 - 0,25P_1 - 0,0003P_3 + 0,237P_4 + 0,0003P_8 - 0,198P_{10} + 0,052P_{13} + 0,146P_{14} - 0,121P_{21} \quad (1)$$

Критерий Фишера полученного уравнения составляет 13 406,7, что значительно больше пре-

дельного значения, равного 5,32. Используя для анализа значения Т-критериев Стьюдента, для каждого члена уравнения определяем устойчивость регрессионных коэффициентов, корректируя уравнение (1). Низкие значения Т-критериев Стьюдента для коэффициентов a_2 и a_4 (факторы P_3 и P_8 соответственно) совпадают с практически незначимыми по абсолютным значениям этих же коэффициентов ($\pm 0,0003$). В связи с этим факторы P_3 и P_8 можно вывести из регрессионного уравнения, которое после корректировки имеет вид:

$$P_a = 0,102 - 0,25P_1 + 0,24P_4 - 0,20P_{10} + 0,05P_{13} + 0,15P_{14} - 0,12P_{21} \quad (2)$$

Значения вероятностей состояний угольной шахты, полученные указанными методами, использовались для оценки безопасности и работоспособности угольной шахты (табл. 1).

Таблица 1

Значения вероятностей состояний угольной шахты

| Номер элемента схемы состояний | X_{\min} | X_{\max} | \bar{X} | σ |
|--------------------------------|------------|------------|-----------|----------|
| P_1 | 0,100 | 0,400 | 0,208 | 0,103 |
| P_2 | 0,200 | 0,750 | 0,408 | 0,167 |
| P_3 | 0,250 | 0,800 | 0,492 | 0,188 |
| P_4 | 0,150 | 0,400 | 0,258 | 0,084 |
| P_5 | 0,050 | 0,500 | 0,167 | 0,171 |
| P_6 | 0,150 | 0,650 | 0,450 | 0,266 |
| P_7 | 0,200 | 0,900 | 0,383 | 0,189 |
| P_8 | 0,200 | 0,600 | 0,433 | 0,141 |
| P_9 | 0,400 | 0,800 | 0,567 | 0,141 |
| P_{10} | 0,400 | 0,900 | 0,677 | 0,172 |
| P_{11} | 0,100 | 0,600 | 0,323 | 0,172 |
| P_{12} | 0,015 | 0,750 | 0,378 | 0,207 |
| P_{13} | 0,250 | 0,985 | 0,623 | 0,207 |
| P_{14} | 0,015 | 0,500 | 0,186 | 0,117 |
| P_{15} | 0,200 | 0,815 | 0,469 | 0,126 |
| P_{16} | 0,125 | 0,400 | 0,288 | 0,081 |
| P_{17} | 0,060 | 0,600 | 0,243 | 0,175 |
| P_{18} | 0,250 | 0,900 | 0,597 | 0,200 |
| P_{19} | 0,100 | 0,500 | 0,262 | 0,143 |
| P_{20} | 0,100 | 0,640 | 0,252 | 0,155 |
| P_{21} | 0,000 | 0,310 | 0,142 | 0,132 |

Определяем фактический уровень безопасности эксплуатируемых в настоящее время угольных шахт, опасных по газу или пыли, с учетом действий персонала, состояния оборудования и среды. Вероятности режимов работы угольной шахты:

– нормальная работа:

$$P_n^1 = 3,83 * 10^{-1}; P_n^2 = 1,60 * 10^{-2}; P_n^3 = 4,27 * 10^{-1}; P_n^4 = 6,00 * 10^{-2}$$

Отклонение от средней вероятности

| Вероятность | -3σ | -2σ | -σ | X | σ | +σ | +2σ | +3σ |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P_3 | -0,072 | 0,116 | 0,304 | 0,492 | 0,188 | 0,680 | 0,868 | 1,056 |
| P_6 | -0,347 | -0,081 | 0,184 | 0,450 | 0,266 | 0,716 | 0,981 | 1,247 |
| P_9 | 0,143 | 0,284 | 0,426 | 0,567 | 0,141 | 0,708 | 0,850 | 0,991 |
| P_{12} | -0,244 | -0,037 | 0,171 | 0,378 | 0,207 | 0,585 | 0,793 | 1,000 |
| P_{15} | 0,089 | 0,216 | 0,343 | 0,469 | 0,126 | 0,595 | 0,722 | 0,848 |
| P_{18} | -0,003 | 0,197 | 0,337 | 0,597 | 0,200 | 0,797 | 0,997 | 1,197 |

– безаварийная работа:

$$P_6^1=8,00 \cdot 10^{-3}; P_6^2=4,10 \cdot 10^{-2}; P_6^3=6,10 \cdot 10^{-2};$$

$$P_6^4=2,00 \cdot 10^{-3}; P_6^5=0,00; P_6^6=1,00 \cdot 10^{-3}.$$

$$\text{Тогда } P_n=8,86 \cdot 10^{-1}; P_a=1,13 \cdot 10^{-3}; P_a=10,81 \cdot 10^{-4}.$$

Разработанную методологию можно применить для решения аналогичных задач и в других смежных отраслях промышленности, функционирование которых связано с действиями персонала значительной численности и разной квалификации, высокой насыщенностью потенциально опасных машин и механизмов, часть которых расположена в потенциально опасной или нестабильной среде.

Определяем вероятность нормальной работы угольной шахты в случае технологического отказа персонала, приведшего к его функциональной ошибке.

Значения условных вероятностей $P_2 = 0,50$; $P_4 = 0,25$; $P_8 = 0,50$ определяют путем опроса ведущих технических специалистов данного предприятия:

$$P_n^3 = P_2 \cdot P(S_4 \cdot S_2) + P_8 - P(S_4 \wedge S_8);$$

$$P_n^3 = 0,50 \cdot 0,25 \cdot 0,50 + 0,50 - 0,25 = 0,312.$$

Определяем вероятность безопасной работы шахты при появлении неисправности оборудования, которая приводит к дефекту и возникновению усложненных условий эксплуатации.

Значения условных вероятностей $P_9 = 0,50$; $P_{10} = 0,70$ определяют путем опроса (методом экспертных оценок):

$$P_6^2 = 0,50 \cdot 0,70 = 0,350.$$

Таким образом, методом, изложенным в настоящей работе, совместно с формализованным опросом специалистов соответствующего профиля и уровня, установлены численные значения фактических уровней вероятностей безопасной работы конкретной шахты в зависимости от рассмотренных условий состояния её эргатических компонентов. В случае каких-либо существенных изменений подземного производства, например, при его расширении или модернизации, можно провести корректировку параметров безопасности.

Прежде, чем приступить к сопоставлению полученного значения P_a с расчетными, определенными исходя из иного методического подхода, например, приведенного в работе [11] или принятыми на основе нормативных документов [12; 13] для угольной шахты, отметим принципиальное различие предлагаемых методов. Следует также учитывать, что традиционные методы оценки безопасности шахт, как правило, не позволяют четко установить и оценить причинно-следственные зависимости: ошибки персонала – плохая подготовка или болезнь, отказ оборудования – низкое качество его проектирования, изготовления или обслуживания и т. д. В связи с изложенным, для оценки конечных результатов полученные расчетные значения целесообразно сопоставить с нормативными. Например, при 100–200 единицах оборудования или 10–20 участках вероятность аварии P_a , принимаемая в данном случае равной сумме предельных значений вероятностей взрыва P_v , пожара P_p и поражения РЭП, может быть приближенно определена по формуле

$$P_a = P_6 + P_n + P_{en}, \quad (3),$$

соответственно

$$P_a = 10^{-6}(10 - 20) + 10^{-6}(100 - 200) + 10^{-6} = 1,11 \cdot 10^{-4} \dots 2,21 \cdot 10^{-4}.$$

Отклонение от среднего этих шести вероятностей, выраженных через σ (см. табл. 1), приведены в табл. 2. Полученные методом сглаживания трендов [9] и реализованные в последующих расчетах значения вероятностей $P_3, P_6, P_9, P_{12}, P_{15}$ и P_{18} при настоящем уровне состояния шахт можно рассматривать как перспективные и вполне достижимые, хотя и порознь, на некоторых шахтах в настоящее время.

При современном техническом оснащении шахт значения P_a уже сегодня не должны превышать $10,81 \times 10^{-4}$ за год. Следовательно, количество аварий, например на 144 шахтах, должно быть не более

$$Na = 144 \times 10,81 \times 10^{-4} = 0,156 \text{ 1/год,}$$

что существенно (примерно на 1,5 порядка) ниже средней аварийности, которая характерна для

шахт України в настоящее время, а уровень риска будет достигать примерно соответствующего значения для транспорта в странах дальнего зарубежья. Такой уровень безопасности недостаточен для угольной отрасли, в связи с чем необходимо принимать меры для его эффективного повышения.

Расчеты выполнялись на основе статистических данных по аварийности и состоянию энергохозяйства (количество обслуживаемого оборудования, численность персонала, количество зарегистрированных нарушений действующей нормативной документации, установленная мощность). Причем при расчетах, исходя из трудоемкости обслуживания, 5 км кабельной сети приравнивались к единице высоковольтного оборудования. Статистический подход основан на методах регрессионного анализа, разработан для определения расположения бифуркационных линий множества катастрофы сборки на пространстве управления.

Статистические характеристики данных ежегодной аварийности систем подземного электроснабжения приведены в табл. 3.

Полученные на основе этих данных значения параметров уравнений бифуркационных линий, расположенных на двумерном пространстве управления (см. рис. 1), приведены в табл. 4 [14].

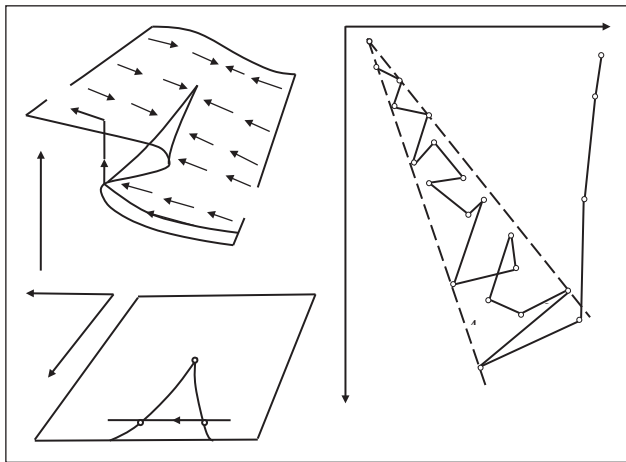


Рис. 1. Типичная катастрофа сборки данных по безопасности систем подземного электроснабжения

Анализируя исходные данные для расчетов [8] и полученные зависимости (см. рис. 2), отметим, что совпадение с точностью до доверительного интервала (точность расчетов) соответствующих бифуркационных линий для выходных факторов «авария» и «аварийная ситуация» указывает на недостаточную эффективность действия служб, отражающих аварийные ситуации, которые возникают в условиях эксплуатации.

Рассмотрим пример из практики эксплуатации горношахтного электрооборудования, которым комплектуются шахты Украины. Отметим, что сопоставление работы и обслуживания электрооборудования на отечественных предприятиях с аналогичными зарубежными практически некорректно вследствие использования технических устройств других типов и ограниченных сведений о технологии обслуживания. Поэтому значительный интерес представляет процесс эксплуатации систем электроснабжения мощностью 6 кВ на шахтах прибалтийских государств в сопоставлении с аналогичным процессом на шахтах Украины.

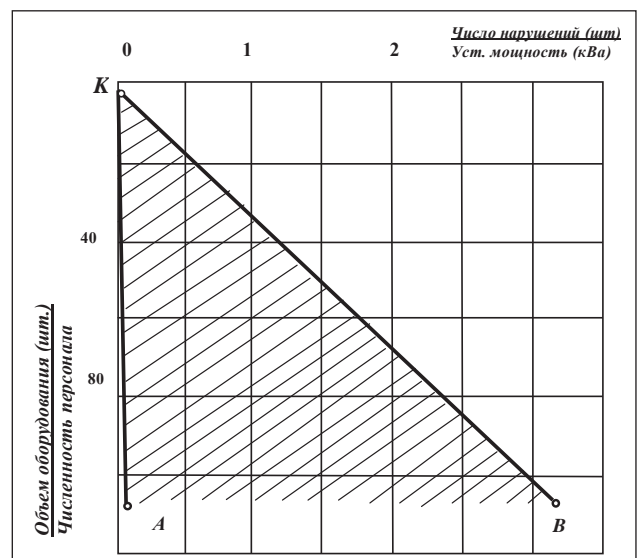


Рис. 2. Бифуркационные линии катастроф сборки данных по безопасности систем подземного электроснабжения

Система электроснабжения построена исключительно на использовании морально устаревших ячеек РВД-6 с масляным выключателем ВМБ-10 выпуска более чем 40-летней давности. Однако наличие минимальной ремонтной базы непосредственно на месте установки ячеек РВД-6 в сочетании с их регулярным поочередным обслуживанием позволило добиться отличного состояния и практически безаварийной работы. В этом случае увеличение количества сотрудников службы эксплуатации оборудования напрямую связано с повышением надежности его работы.

Из сопоставления рис. 1 и 2 также вытекает, что заштрихованная зона AKB представляет собой проекцию неустойчивого участка сборки, т. е. пространства переменных состояний, проектируемого на пространство управления (площадь AKB) трижды. Таким образом, для ликвидации условий, в которых возникают аварийные ситуации или непосредственно аварии, режим эксплу-

Таблица 3

Статистические характеристики данных ежегодной аварийности систем подземного электроснабжения

| Фактор F | F_{\max} | F_{\min} | \bar{X} | σ |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1. Аварийная, ед. / Суточная производительность, т | $3,24 \times 10^{-7}$ | 0 | $6,66 \times 10^{-8}$ | $1,04 \times 10^{-7}$ |
| 2. Аварийная, ситуация, ед. / Суточная производительность, т | $5,14 \times 10^{-5}$ | $1,35 \times 10^{-6}$ | $1,91 \times 10^{-5}$ | $1,48 \times 10^{-5}$ |
| 3. Количество оборудования, шт. / Численность персонала, чел. | 126,18 | 0,18 | 15,90 | 34,92 |
| 4. Количество нарушений, ед. / Установленная мощность, кВт·А | $2,71 \times 10^{-1}$ | 0 | $2,76 \times 10^{-2}$ | $7,75 \times 10^{-2}$ |

Таблица 4

Значения параметров уравнений бифуркационных линий

| Бифуркационная линия | A | B | SA | SB |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| КА | $1,38 \times 10^{-5}$ | $6,76 \times 10^{-5}$ | $0,33 \times 10^{-5}$ | $1,12 \times 10^{-5}$ |
| KB | $2,55 \times 10^{-2}$ | 0,12 | $0,21 \times 10^{-2}$ | 0,27 |

атации системы подземного электроснабжения необходимо выбрать таким, чтобы характеризующие его параметры (координаты: приведенное количество нарушений – приведенный объем обслуживания) находились в пространстве переменных состояний, ограниченном бифуркационными линиями *КА* и *KB*.

Выполнив непосредственно численный анализ рис. 2, можно также сделать вывод, что вследствие высокой крутизны бифуркационной линии *КА* снижение приведенного объема обслуживания как метод борьбы с аварийностью не обладает высокой эффективностью. Более эффективны в данном случае методы, направленные на снижение количества нарушений обслуживающим и ремонтным персоналом требований нормативно-технической документации и выполнения регламента обслуживания электрооборудования. Причем предлагаемые рекомендации вполне реализуемы в реальных производственных условиях,

так как требуют снижения количества нарушений при эксплуатации фактического количества оборудования не более чем в 4–6 раз.

Выводы. Учитывая значительные расхождения вероятностей ошибок различного рода, возникающих при обслуживании систем подземного электроснабжения на разных предприятиях (2,8–13,3 раза), полученные теоретическим путем рекомендации вполне согласуются с данными по безопасности существующего электрооборудования, полученными на действующих шахтах разных регионов Украины статистическими методами. Следовательно, существенное увеличение численности обслуживающего персонала без осуществления кардинальных мероприятий по перестройке службы эксплуатации не снизит аварийность в системах подземного электроснабжения. Для этого необходима коренная перестройка всего режима эксплуатации горношахтного электрооборудования.

Список литературы:

1. Хенли Э.Д., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. Москва: Машиностроение. 1984. 528 с.
2. Mnykhin A., Bryukhanov O. Optimization of coal mine parameters to provide safe operation. Technology at the service of environment. Komeko, 2003. Vol. II. P. 91–106.
3. Мнухин А.Г., Брюханов А.М., Иорданов И.В. Технологии XXI века. Электрогидравлика. Макеевка-Донецк: ВИК, 2012. Т. 1. 432 с.
4. Мнухин А.Г., Брюханов А.М., Вовченко А.Р. Оптимизация обслуживания шахт, исходя из их аварийности. Наук. вісн. НГАУ. 2002. № 1. С. 83–86.
5. Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых. Москва: Недра. 2001. 412 с.
6. ДСТУ 2293: Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. Чинний від 01 травня 2015 р. Вид. офіц. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015.
7. Юрнев А.П., Сахаров Б.Д., Сытин А.В. Аварии под водой. Л.: Судостроение, 1981. 144 с.
8. Кобылянский Б.Б., Мнухин А.Г. Оценка горного производства на эргатической основе. Вісті Донецького гірничого інституту. 2015. № 1 (36) – № 2 (37). С. 83–92.

9. Ширяев А.Н. Вероятность. Москва: Наука, 1980. 576 с.
10. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. Москва: Статистика, 1980. 263 с.
11. Мнухин А.Г., Коневский Б.И. Защита электрических сетей шахт от коммутационных перенапряжений. Москва: Недра. 1987. 143 с.
12. Мнухин А.Г., Коневский Б.И. Планирование эксперимента при исследованиях коммутационных перенапряжений в электрических сетях. Электричество. 1984. № 11. С. 17–18.
13. Методы анализа данных / пер. с франц. под ред. С.А. Айвазяна, В.М. Бухштабера. Москва: Финансы и статистика, 1985. 357 с.
14. Горский В.Г. Об оценке рисков в сфере технического регулирования. Москва, 2003. 12 с.

АНАЛІЗ І ВИЗНАЧЕННЯ ФАКТИЧНОГО РІВНЯ БЕЗПЕКИ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ, НЕБЕЗПЕЧНИХ ЧЕРЕЗ ГАЗ АБО ПИЛ, З УРАХУВАННЯМ ДІЙ ПЕРСОНАЛУ, СТАНУ ОБЛАДНАННЯ І СЕРЕДОВИЩА

Розглянуто виробничі комплекси, в т. ч. шахту, з позиції людина – машина – середовище. За єдиною методикою проведено оцінку безпеки з подальшим нормуванням необхідних ймовірностей нормальної або безаварійної роботи підприємства з урахуванням дій обслуговуючого персоналу і впливу навколишнього середовища. Розроблено методологію оцінки можливої аварійності, на цій основі виконані розрахунки, що забезпечують оптимальний вибір послідовності дій щодо її попередження. Запропонована методологія дозволяє підвищити безпеку роботи гірничого виробництва шляхом оптимального розташування наявних на конкретному підприємстві матеріально-технічних ресурсів.

Ключові слова: методи регресійного аналізу, аналіз безпеки, складні ергатичні системи.

ANALYSIS AND DETERMINATION OF THE ACTUAL SAFETY OF COAL MINES, DANGEROUS FOR GAS OR POWDER, WITH ACCOUNT OF PERSONNEL, EQUIPMENT AND ENVIRONMENT

Production complexes are considered, including mine, from the position of man – machine – environment. According to a uniform methodology, a safety assessment was carried out with subsequent normalization of the required probabilities of normal or accident-free operation of the enterprise taking into account the actions of the maintenance personnel and the influence of the environment. A methodology for estimating a possible accident rate has been developed, and calculations have been made on this basis to ensure the optimal choice of the sequence of actions to prevent it. The proposed methodology makes it possible to increase the safety of mining operations through the optimal location of the material and technical resources available at a particular enterprise.

Key words: methods of regression analysis, safety analysis, complex ergatic systems.