
УДК 622.8:614.8.01

В.Ю. ДЕРЕВЯНСКИЙ, ст. науч. сотрудник, МакНИИ, г. Макеевка

МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПРИЧИН ТРАВМАТИЗМА НА ОСНОВЕ ФУНКЦИИ ОПАСНОСТИ ШАХТНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

Разработан метод интегральной оценки причин травматизма на основе структуры функции опасности шахтной производственной системы, позволяющий оценивать причины при отсутствии их вероятностных значений. Приведен пример ранжирования причин несчастных случаев с использованием этого метода.

Ключевые слова: несчастный случай, травматизм, шахтная производственная система, функция опасности системы, ситуация травмирования человека, причина, структурная значимость.

Важными направлениями повышения безопасности труда шахтеров являются создание новых средств защиты и планирование мероприятий по предотвращению травматизма на основе анализа происшедших несчастных случаев (НС). Для этого необходимо выполнять оценку влияния причин травматизма, результаты которой позволяют составлять ранжированные ряды причин и определять наиболее важные из них с точки зрения профилактики.

Анализ литературных источников [1-3 и др.] и практический опыт МакНИИ показывают, что удобным методическим инструментом является вероятностный метод, позволяющий определить вероятность возникновения НС до и после устранения каждой причины, а также в результате снижения вероятности ее возникновения за счет внедрения разрабатываемого средства защиты (планируемого мероприятия).

Как свидетельствует практика применения вероятностного метода, получение вероятностных значений отказов технических устройств (в т.ч. средств защиты) трудности не представляет, поскольку в инструкциях (руководствах) по эксплуатации приведено значение средней наработки на отказ, которое может быть преобразовано в вероятностную величину [1-3]. Однако, получение вероятностей возникновения причин, обусловленных проявлением в шахтах не в полной мере изученных явлений природного характера, невыполнением ответственными лицами организационно-технических и организационных мер безопасности, а также сознательным нарушением работниками требований охраны труда, часто встречает

непреодолимые трудности. В литературных источниках, например, в [4, 5], имеются данные о «надежности человека» в условиях разных производственных систем, которые, с течением времени, устаревают, и требуют проведения новых исследований по их уточнению. Таким образом, сбор необходимых вероятностных данных может потребовать проведения отдельной научно-исследовательской работы, значительных затрат финансовых и трудовых ресурсов.

Отсутствие методического инструмента, позволяющего оценивать причины НС без использования их вероятностных значений, в определенной мере сдерживает совершенствование средств защиты и планирование эффективных профилактических мероприятий, поскольку нет возможности выполнить оценку причин травматизма для шахтных производственных систем (ШПрС) сложной структуры. Функция опасности системы (ФОС) такого типа может насчитывать несколько десятков и даже сотен причин. Поэтому разработка метода оценки влияния причин на травматизм, не требующего вероятностных значений, является актуальной.

Целью статьи является разработка метода интегральной оценки причин травматизма на основе структуры ФОС, позволяющего оценивать причины при отсутствии их вероятностных значений.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- сформулировать научно-теоретические основания метода интегральной оценки причин травматизма на основе структуры ФОС;
- разработать метод и изложить его на примере ФОС сложной структуры.

Разработанный метод интегральной оценки причин травматизма основан на ситуационном подходе к исследованию и профилактике НС: к НС приводит не любая произвольная, а только определенная комбинация причин НС или одна определенная причина. Такая комбинация причин (или одна определенная причина) условно названа «ситуацией травмирования человека» (СТ). СТ может быть представлена в виде элементарной конъюнкции (логического произведения) причин [6, 7]:

$$K = x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_r = \bigwedge_{i=1}^r x_i,$$

где K – СТ;

x_1, x_2, \dots, x_r – причины НС;

r – количество причин в СТ (ранг конъюнкции);

i – порядковый номер причины НС;

\wedge – знак логического умножения (конъюнкции).

Из этого условия следует, что исключение минимум одной причины из СТ приводит к невозможности возникновения НС. Таким образом, профилактика травматизма не требует предотвращения абсолютно всех причин, а сводится к тому, чтобы не допустить появления хотя бы одной причины в СТ.

Каждый случай производственного травматизма на угольной шахте происходит в пределах ШПрС «человек - средства труда - среда». В любой реальной ШПрС травматизм по какому-либо опасному производственному фактору обусловлен, как правило, не одной, а множеством СТ. Анализ актов расследования случаев травматизма, происшедших в определенной ШПрС по исследуемому фактору, а также моделирование причин опасных событий позволяют установить перечень СТ и составить на их основе ФОС в виде логической матрицы [7]. Причины, входящие в состав СТ, и связи между ними образуют структуру ФОС.

Проведенный анализ показал – на вероятность опасного функционирования ШПрС (вероятность возникновения НС) влияют вероятностные значения причин травматизма и структура ФОС. Поэтому при отсутствии таких значений целесообразно осуществлять оценку причин на основе структуры ФОС.

Известные методы структурного анализа надежности систем [8, 9] используют вероятностные значения отказов элементов либо оценивают влияние отказов элементов на отказ системы в предположении их равновероятного возникновения.

Одним из методов теории надежности, применимых для структурной оценки влияния причин на травматизм, является логико-вероятностный метод исследования надежности структурно-сложных систем [8]. Он позволяет оценивать причины по логической структуре их взаимодействия в ФОС, в предположении равной вероятности всех причин. Оценка причин травматизма этим методом носит комплексный характер и зависит от следующих условий [7, 8]:

- 1) общего количества СТ в ФОС;
- 2) количества ситуаций, содержащих оцениваемую причину;
- 3) количества причин в этих СТ;
- 4) условий 2 и 3 остальных причин.

Разрабатываемый интегральный метод должен осуществлять такую же комплексную оценку причин НС, но без использования вероятностных значений.

Для количественной оценки влияния причины на возникновение НС принят показатель «весомость причины», отражающий результат ее своеобразного «взвешивания» [7].

Для расчета величины «весомости» причин без использования их ве-

роятностных значений, только на основе структуры ФОС, введем показатели «структурная значимость причины» (ζ_i) и «структурная значимость ФОС» (Z_i), измеряемые на интервале $[0;1]$.

Оценка «весомости» причин с использованием показателя «структурной значимости» основана на следующих положениях. Если преобразовать ФОС из логической матрицы в уравнение вида $Z = f(\zeta)$ и построить график, а затем исключить из ФОС те СТ, которые содержат оцениваемую причину, составить соответствующее уравнение и также построить график, аналогичный первому, то вторая кривая будет располагаться ниже первой (рис. 1). Площади фигур, ограниченные сверху в первом случае кривой 1, во втором – кривой 2, и снизу – осью абсцисс ($y=0$), характеризуют плотность распределения «структурной значимости», соответственно, полной ФОС, и ФОС, из которой исключены ситуации, имеющие оцениваемую причину (т.к. согласно приведенному ранее условию, при исключении хотя бы одной причины из СТ возникновение НС невозможно). Таким образом, «весомость» причины может оцениваться по величине уменьшения плотности распределения «структурной значимости» ФОС при устранении оцениваемой причины (и, как следствие, всех СТ, содержащих эту причину).

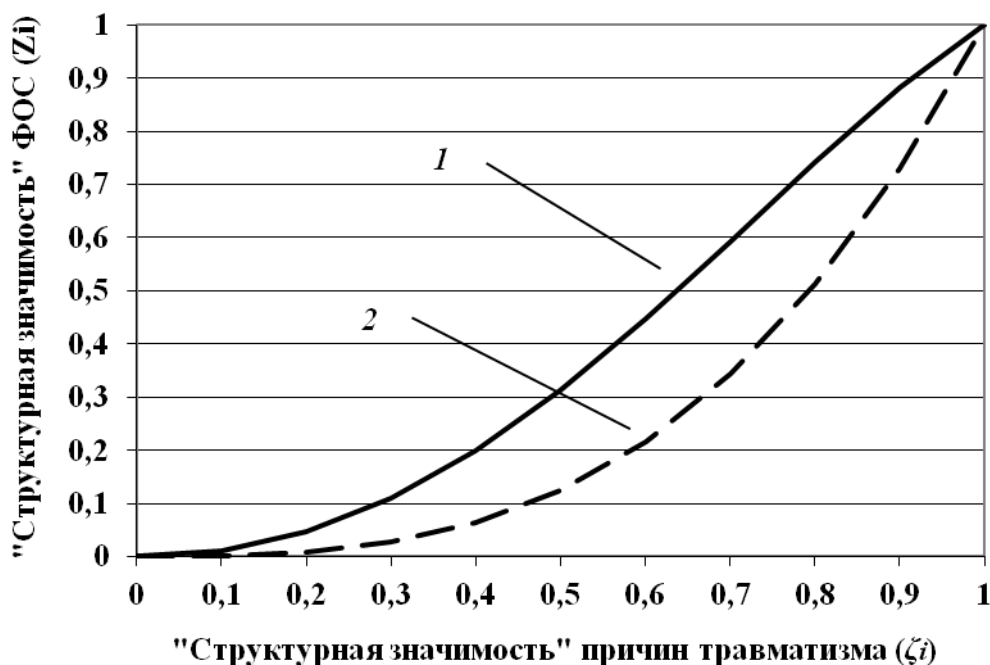


Рис. 1. Графики распределения «структурной значимости» ФОС:
1 – учитывающей все СТ; 2 – не учитывающей ситуации, содержащие оцениваемую причину.

Площадь фигуры, ограниченная сверху кривой 1 и снизу – кривой 2 (рис. 1) характеризует влияние оцениваемой причины на опасное функционирование ШПрС и может быть получена как результат разности площадей вышеуказанных фигур [10].

На основании изложенного, «весомость» i -й причины (g_i) численно равна площади фигуры, ограниченной сверху кривой, построенной по уравнению полной ФОС, а снизу – кривой, построенной по уравнению ФОС, из которого исключены СТ, содержащие причину x_i , и определяется из выражения:

$$g_i = S(Z_0) - S(Z_i), \quad (1)$$

где $S(Z_0)$ – площадь фигуры под кривой, построенной по уравнению «структурной значимости» полной ФОС на интервале $[0;1]$;

$S(Z_i)$ – площадь фигуры под кривой, построенной по уравнению «структурной значимости» ФОС, после исключения СТ, содержащих оцениваемую причину x_i , на интервале $[0;1]$.

Площади указанных фигур определяются из выражения [10]

$$S(Z) = \int_0^1 f(\zeta) d\zeta. \quad (2)$$

Поскольку площади фигур вычисляются с помощью определенного интеграла, предлагаемый метод условно назван методом интегральной оценки причин травматизма.

Для оценки «весомости» причин необходимо выполнить анализ НС, установить причины травматизма и СТ, составить ФОС в виде логической матрицы и привести ее к дизъюнктивной нормальной форме – сумме выявленных СТ – и пронумеровать ситуации

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = \bigvee_{i=1}^m K_i, \quad (3)$$

где n – количество причин травматизма;

m – количество СТ в исследуемой ФОС;

i – порядковый номер СТ.

Дальнейшее описание метода интегральной оценки причин травматизма приведем на примере следующей ФОС, записанной в дизъюнктивной нормальной форме (3)

$$y_0(x_1, x_2, \dots, x_{10}) = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 x_2 x_3 \\ x_1 x_2 x_4 \\ x_1 x_5 x_6 x_7 \\ x_1 x_5 x_8 x_9 x_{10} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Эта ФОС сложной структуры содержит:

- одну причину, повторяющуюся во всех СТ (x_1);
- две причины, встречающиеся в нескольких СТ, имеющих разный ранг (x_2, x_5);
- семь причин, встречающихся по одному разу в СТ с разным рангом ($x_3, x_4, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}$).

Преобразование логической матрицы в уравнение вида $Z = f(\zeta)$, отражающего зависимость «структурной значимости» ФОС от «структурной значимости» причин, может осуществляться ортогональным и табличным способами.

Приведем описание ортогонального способа, в соответствии с рекомендациями работы [8].

Логическая матрица, записанная в дизъюнктивной нормальной форме (3), приводится к ортогональному виду:

$$y = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ K_m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} K_1 \\ K'_1 K_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ K'_1 K'_2 \dots K'_{m-1} K_m \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Все члены ортогональной дизъюнктивной нормальной формы попарно ортогональны – их произведение равно нулю.

Отрицания элементарных конъюнкций K'_i для матрицы (5) устанавливаются посредством преобразования:

$$K'_i = (x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_r)' = \begin{vmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ x'_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x'_1 \\ x_1 x'_2 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ x_1 x_2 \dots x_{r-1} x'_r \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Приводим матрицу (4) к ортогональному виду, используя преобразование (5)

$$y = \begin{vmatrix} K_1 \\ K'_1 K_2 \\ K'_1 K'_2 K_3 \\ K'_1 K'_2 K'_3 K_4 \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Отрицания элементарных конъюнкций для этой матрицы получим из преобразования (6)

$$K'_1 = \begin{vmatrix} x'_1 \\ x_1 x'_2 \\ x_1 x_2 x'_3 \end{vmatrix}; \quad K'_2 = \begin{vmatrix} x'_1 \\ x_1 x'_2 \\ x_1 x_2 x'_4 \end{vmatrix}; \quad K'_3 = \begin{vmatrix} x'_1 \\ x_1 x'_5 \\ x_1 x_5 x'_6 \\ x_1 x_5 x_6 x'_7 \end{vmatrix}. \quad (8)$$

При вычислении произведений конъюнкций матрицы (7) используем отрицания элементарных конъюнкций (8) и учитываем, что произведение x_i и x'_i равняется нулю:

$$K'_1 K_2 = \begin{vmatrix} x'_1 \\ x_1 x'_2 \\ x_1 x_2 x'_3 \end{vmatrix} \cdot |x_1 x_2 x_4| = |x_1 x_2 x'_3 x_4|. \quad (9)$$

$$K'_1 K'_2 K'_3 = \begin{vmatrix} x'_1 \\ x_1 x'_2 \\ x_1 x_2 x'_3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x'_1 \\ x_1 x'_2 \\ x_1 x_2 x'_4 \end{vmatrix} \cdot |x_1 x_5 x_6 x_7| = \begin{vmatrix} x_1 x'_2 x_5 x_6 x_7 \\ x_1 x_2 x'_3 x'_4 x_5 x_6 x_7 \end{vmatrix}. \quad (10)$$

$$K'_1 K'_2 K'_3 K'_4 = \begin{vmatrix} x'_1 \\ x_1 x'_2 \\ x_1 x_2 x'_3 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x'_1 \\ x_1 x'_2 \\ x_1 x_2 x'_4 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} x'_1 \\ x_1 x'_5 \\ x_1 x_5 x'_6 \\ x_1 x_5 x_6 x'_7 \end{vmatrix} \cdot |x_1 x_5 x_8 x_9 x_{10}| =$$

$$= \begin{vmatrix} x_1 x'_2 x_5 x'_6 x_8 x_9 x_{10} \\ x_1 x_2 x'_3 x'_4 x_5 x'_6 x_8 x_9 x_{10} \\ x_1 x'_2 x_5 x_6 x'_7 x_8 x_9 x_{10} \\ x_1 x_2 x'_3 x'_4 x_5 x_6 x'_7 x_8 x_9 x_{10} \end{vmatrix}. \quad (11)$$

Полученные матрицы (9), (10), (11) подставляем в матрицу (7) и записываем ФОС в ортогональном виде:

$$y_0 = \begin{vmatrix} x_1 x_2 x_3 \\ x_1 x_2 x'_3 x_4 \\ x_1 x'_2 x_5 x_6 x_7 \\ x_1 x_2 x'_3 x'_4 x_5 x_6 x_7 \\ x_1 x'_2 x_5 x'_6 x_8 x_9 x_{10} \\ x_1 x_2 x'_3 x'_4 x_5 x'_6 x_8 x_9 x_{10} \\ x_1 x'_2 x_5 x_6 x'_7 x_8 x_9 x_{10} \\ x_1 x_2 x'_3 x'_4 x_5 x_6 x'_7 x_8 x_9 x_{10} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

При переходе к уравнению вида $Z = f(\zeta)$ следует учитывать, что $x'_i = 1 - x_i$, поэтому $\zeta'_i = 1 - \zeta_i$.

На основе матрицы (12), сложив элементарные конъюнкции, получим искомое уравнение распределения «структурной значимости» ФОС (4):

$$\begin{aligned}
 Z_0 = & \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 + \zeta_1 \zeta_2 (1 - \zeta_3) \zeta_4 + \zeta_1 (1 - \zeta_2) \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 + \zeta_1 \zeta_2 (1 - \zeta_3) \times \\
 & \times (1 - \zeta_4) \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 + \zeta_1 (1 - \zeta_2) \zeta_5 (1 - \zeta_6) \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 (1 - \zeta_3) \times \\
 & \times (1 - \zeta_4) \zeta_5 (1 - \zeta_6) \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 (1 - \zeta_2) \zeta_5 \zeta_6 (1 - \zeta_7) \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \\
 & + \zeta_1 \zeta_2 (1 - \zeta_3) (1 - \zeta_4) \zeta_5 \zeta_6 (1 - \zeta_7) \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} = \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_4 - \\
 & - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_4 + \zeta_1 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 - \\
 & - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 + \zeta_1 \zeta_5 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_5 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \\
 & - \zeta_1 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_5 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \\
 & - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_5 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \\
 & - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \\
 & - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \\
 & - \zeta_1 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \\
 & - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \\
 & - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \\
 & - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10}.
 \end{aligned} \tag{13}$$

При условии $\zeta_1 = \zeta_2 = \dots = \zeta_{10}$, уравнение (13) примет вид

$$Z_0 = 2\zeta^3 + \zeta^5 - 2\zeta^6 - 2\zeta^7 + \zeta^8 + 2\zeta^9 - \zeta^{10}. \tag{14}$$

Табличный способ преобразования ФОС из логической матрицы в уравнение вида $Z = f(\zeta)$ применим при небольшом числе СТ в указанной функции, его описание приводится в [7, 8]. Вначале требуется составить таблицу, аналогичную приведенной (табл. 1). В левом крайнем столбце приводятся условные обозначения причин НС, в верхней строке таблицы следует записать номера ситуаций отдельно и в различных сочетаниях между собой и проставить под ними знаки «плюс» и «минус» в последовательности, показанной в табл. 1.

Таблица 1

Преобразование ФОС из логической матрицы в уравнение вида $Z = f(\zeta)$ табличным способом

x_i	K_1	K_2	K_3	K_4	$K_1 K_2$	$K_1 K_3$	$K_1 K_4$	$K_2 K_3$	$K_2 K_4$	$K_3 K_4$	$K_1 K_2 K_3$	$K_1 K_2 K_4$	$K_1 K_3 K_4$	$K_2 K_3 K_4$	$K_1 K_2 K_3 K_4$
	+				-						+				-
x_1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
x_2	X	X	-	-	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X
x_3	X	-	-	-	X	X	X	-	-	-	X	X	X	-	X
x_4	-	X	-	-	X	-	-	X	X	-	X	X	-	X	X
x_5	-	-	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
x_6	-	-	X	-	-	X	-	X	-	X	X	-	X	X	X
x_7	-	-	X	-	-	X	-	X	-	X	X	-	X	X	X
x_8	-	-	-	X	-	-	X	-	X	X	-	X	X	X	X
x_9	-	-	-	X	-	-	X	-	X	X	-	X	X	X	X
x_{10}	-	-	-	X	-	-	X	-	X	X	-	X	X	X	X

В пустых клетках на пересечении строк и столбцов необходимо поставить знак «х», если данная причина имеется в указанной в верхней строке табл. 1 ситуации (комбинации ситуаций), и знак «-», если ее там нет. Проверить таблицу на наличие одинаковых столбцов с противоположными знаками и сократить их. Перемножить во всех оставшихся столбцах переменные, отмеченные знаком «х», сложить или вычесть результаты произведений с учетом знаков «плюс» и «минус», приведенных в таблице.

На основе табл. 1 получим следующее уравнение ФОС:

$$\begin{aligned} Z_0 = & \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_4 + \zeta_1 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 + \zeta_1 \zeta_5 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_4 - \\ & - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_5 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 - \\ & - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \zeta_1 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 + \\ & + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} + \\ & + \zeta_1 \zeta_2 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10} - \zeta_1 \zeta_2 \zeta_3 \zeta_4 \zeta_5 \zeta_6 \zeta_7 \zeta_8 \zeta_9 \zeta_{10}. \end{aligned}$$

При условии $\zeta_1 = \zeta_2 = \dots = \zeta_{10}$ уравнение ФОС имеет вид:

$$\begin{aligned} Z_0 = & \zeta^3 + \zeta^3 + \zeta^4 + \zeta^5 - \zeta^4 - \zeta^6 - \zeta^7 - \zeta^6 - \zeta^7 - \zeta^7 + \zeta^7 + \\ & + \zeta^8 + \zeta^9 + \zeta^9 - \zeta^{10} = 2\zeta^3 + \zeta^5 - 2\zeta^6 - 2\zeta^7 + \zeta^8 + 2\zeta^9 - \zeta^{10}. \end{aligned}$$

Это уравнение соответствует уравнению (14), полученному способом ортогонализации. График распределения «структурной значимости» ФОС, построенный по этому уравнению, приведен на рис. 2.

С помощью уравнения (2) определяем площадь фигуры под кривой, описываемой уравнением (14):

$$S(Z_0) = \int_0^1 (2\zeta^3 + \zeta^5 - 2\zeta^6 - 2\zeta^7 + \zeta^8 + 2\zeta^9 - \zeta^{10}) d\zeta \approx 0,351.$$

Для оценки «весомости» причины x_1 необходимо из матрицы (4) исключить все СТ, содержащие эту причину. Поскольку она имеется во всех ситуациях, то после ее исключения в ФОС не остается ни одной СТ. Таким образом, площадь определяемой фигуры ограничивается снизу осью абсцисс ($y=0$). Поэтому «весомость» причины x_1 , в соответствии с уравнением (1), равна:

$$g_1 = 0,351 - 0 = 0,351.$$

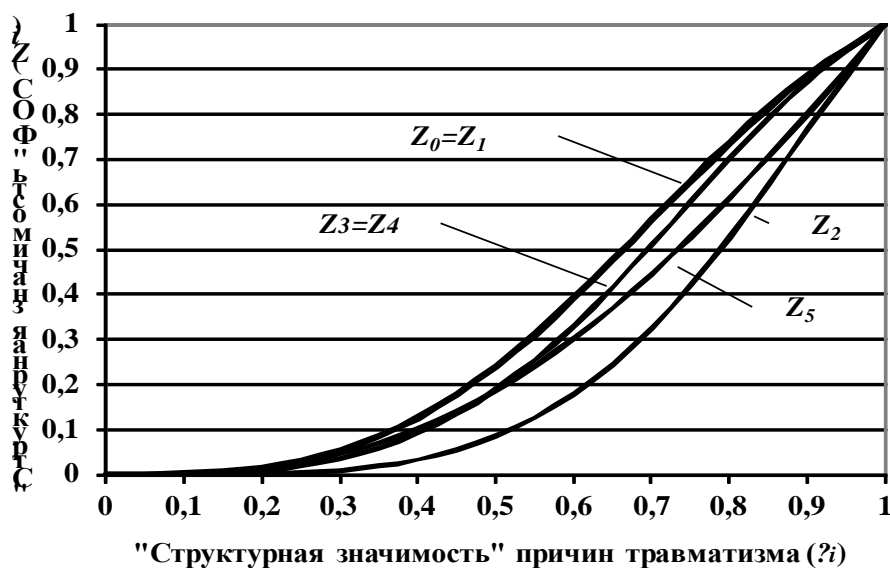


Рис. 2. Графики распределения «структурной значимости» ФОС

При оценке «весомости» причины x_2 исключаем из матрицы (4) ситуации K_1 и K_2 , в которых есть указанная причина, и записываем ФОС:

$$y_2 = \begin{vmatrix} K_3 \\ K_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 x_5 x_6 x_7 \\ x_1 x_5 x_8 x_9 x_{10} \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Способом ортогонализации или табличным способом преобразуем логическую матрицу (15) в уравнение функциональной зависимости и при равных ζ_i получаем уравнение ФОС:

$$Z_2 = \zeta^4 + \zeta^5 - \zeta^7. \quad (16)$$

График распределения «структурной значимости» этой ФОС приведен на рис. 2. С помощью уравнения (2) определяем площадь фигуры под кривой, описываемой уравнением (16):

$$\begin{aligned} S(Z_2) &= \int_0^1 (\zeta^4 + \zeta^5 - \zeta^7) d\zeta = \left(\frac{\zeta^5}{5} + \frac{\zeta^6}{6} - \frac{\zeta^8}{8} \right) \Big|_0^1 = \\ &= \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{6} - \frac{1}{8} \right) - 0 \approx 0,242. \end{aligned}$$

Подставляем это значение в уравнение (1) и получаем «весомость» причины x_2 :

$$g_2 = 0,351 - 0,242 = 0,109.$$

Аналогично определяем значения «весомости» остальных причин.

Вычислим «весомость» причины x_3 . Для этого исключим из матрицы (4) ситуацию K_1 , содержащую указанную причину, и получим ФОС:

$$y_3 = \begin{vmatrix} K_2 \\ K_3 \\ K_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 x_2 x_4 \\ x_1 x_5 x_6 x_7 \\ x_1 x_5 x_8 x_9 x_{10} \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Преобразуем логическую матрицу (17) в уравнение «структурной значимости» ФОС:

$$Z_3 = \zeta^3 + \zeta^4 + \zeta^5 - \zeta^6 - 2\zeta^7 + \zeta^9. \quad (18)$$

Площадь фигуры под кривой, описываемой уравнением (18):

$$S(Z_3) = \int_0^1 (\zeta^3 + \zeta^4 + \zeta^5 - \zeta^6 - 2\zeta^7 + \zeta^9) d\zeta \approx 0,324.$$

«Весомость» причины x_3 :

$$g_3 = 0,351 - 0,324 = 0,027.$$

Из матрицы (4) видно, что положение в структуре ФОС причин x_3 и x_4 одинаковое. Следовательно,

$$g_3 = g_4 = 0,027.$$

Оценивая причину x_5 , исключим из матрицы (4) ситуации K_3 и K_4 , содержащие эту причину, и составим ФОС:

$$y_5 = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 x_2 x_3 \\ x_1 x_2 x_4 \end{vmatrix}. \quad (19)$$

Преобразуем логическую матрицу (19) в уравнение «структурной значимости» ФОС:

$$Z_5 = 2\zeta^3 - \zeta^4. \quad (20)$$

Площадь фигуры под кривой, описываемой уравнением (20):

$$S(Z_5) = \int_0^1 (2\zeta^3 - \zeta^4) d\zeta = \left(\frac{2\zeta^4}{4} - \frac{\zeta^5}{5} \right) \Big|_0^1 = 0,300.$$

«Весомость» причины x_5 :

$$g_5 = 0,351 - 0,300 = 0,051.$$

Для вычисления «весомости» причины x_6 исключим из матрицы (4) ситуацию K_3 , содержащую указанную причину, и запишем ФОС:

$$y_6 = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_4 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 x_2 x_3 \\ x_1 x_2 x_4 \\ x_1 x_5 x_8 x_9 x_{10} \end{vmatrix}. \quad (21)$$

Преобразуем логическую матрицу (21) в уравнение «структурной значимости» ФОС:

$$Z_6 = 2\zeta^3 - \zeta^4 + \zeta^5 - 2\zeta^7 + \zeta^8. \quad (22)$$

Площадь фигуры под кривой, описываемой уравнением (22):

$$S(Z_6) = \int_0^1 (2\zeta^3 - \zeta^4 + \zeta^5 - 2\zeta^7 + \zeta^8) d\zeta \approx 0,328.$$

«Весомость» причины x_6 :

$$g_6 = 0,351 - 0,328 = 0,023.$$

Из матрицы (4) видно, что положение в структуре ФОС причин x_6 и x_7 одинаковое. Следовательно,

$$g_6 = g_7 = 0,023.$$

Определяя «весомость» причины x_8 , исключим из матрицы (4) ситуацию K_4 , содержащую данную причину, и получим ФОС:

$$y_8 = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_1 x_2 x_3 \\ x_1 x_2 x_4 \\ x_1 x_5 x_6 x_7 \end{vmatrix}. \quad (23)$$

Преобразуем логическую матрицу (23) в уравнение «структурной значимости» ФОС:

$$Z_8 = 2\zeta^3 - 2\zeta^6 + \zeta^7. \quad (24)$$

Площадь фигуры под кривой, описываемой уравнением (24):

$$S(Z_8) = \int_0^1 (2\zeta^3 - 2\zeta^6 + \zeta^7) d\zeta \approx 0,339.$$

«Весомость» причины x_8 :

$$g_8 = 0,351 - 0,339 = 0,012.$$

Из матрицы (4) видно, что положение в структуре ФОС причин x_8, x_9 и x_{10} одинаковое. Следовательно,

$$g_8 = g_9 = g_{10} = 0,012.$$

На рис. 2 приведены графики распределения «структурной значимости» ФОС, построенные по уравнениям (14), (16), (18), (20) при оценке наиболее «весомых» причин x_1, x_2, \dots, x_5 , и не показаны графики по уравнениям «структурной значимости» ФОС, составленным при оценке причин x_6, x_7, \dots, x_{10} , поскольку они практически совпадают с графиком функции Z_0 .

Результаты расчетов «весомости» причин предлагаемым методом сведены в табл. 2. В этой же таблице приведены результаты вычислений «весомости» тех же причин, полученные логико-вероятностным методом [8].

Таблица 2

Сравнительный анализ результатов оценки «весомости» причин
логики-вероятностным [8] и интегральным методом

x_i	Результаты оценки «весомости» причин		Ранг причины
	логики-вероятностным методом	интегральным методом	
x_1	0,482421875	0,351	1
x_2	0,310546875	0,109	2
x_3	0,103515625	0,027	4
x_4	0,103515625	0,027	4
x_5	0,107421875	0,051	3
x_6	0,068359375	0,023	5
x_7	0,068359375	0,023	5
x_8	0,029296875	0,012	6
x_9	0,029296875	0,012	6
x_{10}	0,029296875	0,012	6

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что несмотря на разные значения «весомости» причин, их ранги совпадают. Таким образом, сравнение результатов ранжирования причин НС, показывает их сходимость.

При необходимости может вычисляться нормированная «весомость», когда сумма значений «весомости» всех причин равна единице [7]:

$$g_i^{(H)} = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i}, \quad (25)$$

где $g_i^{(H)}$ – нормированная «весомость» i -й причины.

Ниже приведен расчет нормированной «весомости» причин на примере ФОС (4).

Сумма полученных значений «весомости» причин:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{10} g_i &= 0,351 + 0,109 + 0,027 + 0,027 + 0,051 + 0,023 + 0,023 + \\ &+ 0,012 + 0,012 + 0,012 = 0,647. \end{aligned}$$

Из уравнения (25) определяем нормированные значения «весомости» причин НС:

$$g_1^{(H)} = \frac{0,351}{0,647} \approx 0,543;$$

$$g_5^{(H)} = \frac{0,051}{0,647} \approx 0,079;$$

$$g_2^{(H)} = \frac{0,109}{0,647} \approx 0,168;$$

$$g_6^{(H)} = g_7^{(H)} = \frac{0,023}{0,647} \approx 0,036;$$

$$g_3^{(H)} = g_4^{(H)} = \frac{0,027}{0,647} \approx 0,042;$$

$$g_8^{(H)} = g_9^{(H)} = g_{10}^{(H)} = \frac{0,012}{0,647} \approx 0,018.$$

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку более простых методов структурной оценки «весомости» причин травматизма.

ВЫВОДЫ

Обоснование разработки новых средств защиты и планирования мероприятий по профилактике травматизма на основе анализа происшедших НС предусматривает количественную оценку влияния причин на травматизм. Как показывает практика, наиболее удобным методом решения таких задач является вероятностный метод, позволяющий определить вероятность возникновения НС до и после устранения каждой причины, а также в результате снижения вероятности ее возникновения за счет внедрения разрабатываемого средства защиты (планируемого мероприятия). Однако существуют объективные трудности получения исходных данных, особенно, касающихся вероятностных значений причин, обусловленных проявлением в шахтах не в полной мере изученных явлений природного характера, невыполнением ответственными лицами организационно-технических и организационных мер безопасности, а также сознательным нарушением работниками требований охраны труда. В этих условиях большое значение приобретает разработка методов структурной оценки влияния причин на возникновение НС. В статье приведен метод интегральной оценки причин травматизма на основе структуры функции опасности шахтной производственной системы, позволяющего оценивать причины при отсутствии их вероятностных значений. «Весомость» причины оценивается по величине уменьшения плотности распределения «структурной значимости» функции опасности системы при устранении оцениваемой причины. Приведен пример ранжирования причин травматизма с использованием этого метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткачук С. П. Взрывопожаробезопасность горного оборудования / С. П. Ткачук, В. П. Колосюк, С. А. Ихно – Киев: Основа, 2000. – 696 с.
2. Миц В. Н. Формирование опасностей, место и роль мер и средств защиты в предупреждении аварий / В. Н. Миц, Р. С. Грих // Безопасность труда в промышленности. – 1970. – № 10. – С. 37-39.
3. Евдокимов Ф. И. Оценка безопасности технологических процессов / Ф. И. Евдокимов, Г. В. Саенко, Б. А. Грядущий – Київ: Техніка, 1992. – 124 с.
4. Гамхарашвили А. Г. Вероятностный подход к анализу некоторых причин производственного травматизма / А. Г. Гамхарашвили // Безопасность труда в промышленности. – 1979. – № 8. – С. 58-59.
5. Деревянский В. Ю. Оценка надежности человека в условиях шахтных транспортных систем / В. Ю. Деревянский, В. А. Будишевский // Известия Донецкого горного института. – 1999. – № 1. – С. 48-50.
6. Деревянский В. Ю. Ситуационная модель несчастного случая / В. Ю. Деревянский // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. / МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ, 2014. – Вып. 1 (33). – С.99-107.
7. Деревянский В. Ю. Обоснование способов и средств повышения безопасности угольных шахт: [монография] / В. Ю. Деревянский – Донецк: ЦБНТИ угольной промышленности, 2001. – 140 с.
8. Рябинин И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
9. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото; пер. с англ. В. С. Сыромятникова, Г. С. Деминой; под общ. ред. В. С. Сыромятникова. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
10. Красс М. С. Математика для экономистов / М. С. Красс, Б. П. Чупрынов – СПб.: Питер, 2008. – 464 с.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук Кременевым О. Г.
Получено: 14.02.18

**METHOD OF INTEGRAL ESTIMATION OF INJURY CAUSES
BASED ON HAZARD FUNCTION
OF MINE PRODUCTION SYSTEM**

The method of integral estimation of reasons of traumatism is developed on the basis of structure of function of danger of the mine production system, allowing to estimate reasons in default of their probabilistic values. The example of ranging of reasons of accidents is resulted with the use of this method.

Keywords: accident, traumatism, mine production system, function of danger of the system, situation of injuring of man, reason, structural meaningfulness.