

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ ГАЗА И УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Андриевская Н.К.,

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина
кафедра автоматизированных систем управления

Abstract

Andrievskaya N.K. The system analysis and logical likelihood modelling of emergency explosions of gas and a coal dust. This articles is devoted to increase of safety of work in mines. The present research represents the first investigation of the reliability of flammable gas measurement systems. At research of cases of emergency explosion of gas and a coal dust based on events in the fault tree analysis (FTA).

Общая постановка проблемы. Отличительной особенностью проведенных ранее исследований по обеспечению безопасной работы шахты являлось отсутствие системного подхода. Влияние разных факторов на безопасность ведения работ рассматривалось без учета возможных их взаимосвязей.

Постановка задач исследования:

При системном подходе к процессу возникновения аварийных взрывов газа и угольной пыли необходимо выявить основные факторы риска, которые приводят к аварийным ситуациям, определить и оценить опасные состояния системы на основании имеющихся статистических материалов по аварийным ситуациям, используя логико-вероятностные методы.

Решение задач исследований и результаты исследований.

Наиболее благоприятные условия для исследования и анализа безопасности работы шахты создаются в случае представления объекта в виде триединой системы «Человек - машина - среда» (ЧМС), которая изображенная на рисунке 1 [1].

В качестве «человека» в последующем будет подразумеваться персонал, непосредственно занятый выполнением работ или организационно-технических мероприятий по обеспечению безопасности, «машины» — технологическое оборудование, обеспечивающее изменение его свойств или состояния. Под «рабочей средой» следует понимать область пространства, в пределах которой совершается проведение технологических операций.

В модели объекта также использованы следующие векторные обозначения: $I(t)$ — входные воздействия на систему (заданные функции, установленные интервалы времени, выделенные ресурсы, требуемые условия работ); $S(t)$ — ее состояния (условно безопасное, опасное, критическое, послеаварийное); $E(t)$ — выходные воздействия системы на внешнюю среду (полезные и вредные результаты функционирования).

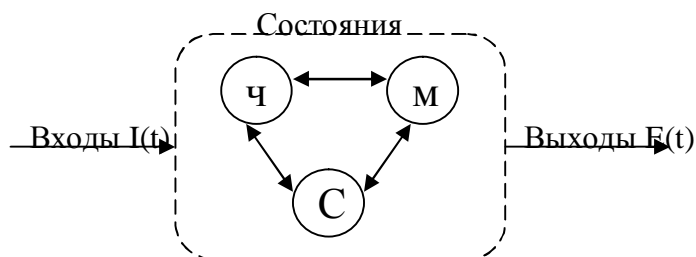


Рисунок 1 - Триединая система «Человек - машина - среда»

Названные состояния и векторные характеристики определяются структурой системы, включающей вышеперечисленные элементы с их взаимосвязями, которые рассматриваются переменными во времени и в совокупности задают соответствующее факторное пространство.

Общая процедура моделирования и системного анализа процесса появления аварийных событий состоит из следующих этапов:

- 1) изучение аварийного процесса и уточнение основных факторов риска;
- 2) построение моделей типа «дерево происшествий»;
- 3) проведение качественного анализа моделируемого процесса;
- 4) проведение количественного анализа моделируемого процесса;
- 5) обоснование мероприятий по снижению величины риска[2].

Для горнодобывающего предприятия наиболее существенные риски – это взрывы огнеопасного газа и угольной пыли, поэтому выполним моделирование для этого аварийного процесса.

Чтобы произошел взрыв газа и угольной пыли, необходимы следующие факторы (элементы треугольника взрыва): наличие взрывоопасной смеси, источник воспламенения или горения, адекватные условия для распространения взрыва.

В результате системного анализа техногенного происшествия, связанного с взрывами газовой смеси и угольной пыли, получены основные факторы риска, раскрывающие случайные механизмы для аварийной ситуации, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные факторы риска

Событие	Вид ошибки	Обознач. события	Базовое событие	Название события
1	2	3	4	5
x0	М	M1	Да	Остановка ВМП
x 1	М	M2	Да	Ошибки управления вентилятором
x 2	Ч	H1	Да	Ошибки проектирования вентилятора и расчета объема воздуха
x 3	М	M3	Да	Неисправности вентиляционной системы
x 4	М	M4	Да	Неисправности вентилятора
x 5			Нет	Ошибки вентиляции
x 6			Нет	Инструментальная ошибка определения концентрации газа
x 7			Нет	Ошибки автоматического определения концентрации газа
x 8	Ч	H2	Да	Программные ошибки при определении концентрации газа
x 9			Нет	Ошибки ручного определения концентрации газа
x 10	М	M6	Да	Ошибки телеметрии при определении концентрации газа
x 11			Нет	Ошибка определения концентрации газа
x 12	С	C1	Да	Эмиссия метана из пластов
x 13	С	C2	Да	Эмиссия метана из-за геологических отклонений
x 14	С	C3	Да	Выбросы метана
x 15	С	C4	Да	Высокая концентрация метана вблизи добычи
x 16	С	C5	Да	Множественные скопления метана
x 17			Нет	Эмиссия метана
x 18	М	M5	Да	Ошибки калибровки
x 19	М	M16	Да	Ошибки износа

Таблица 1. Основные факторы риска (продолжение)

1	2	3	4	5
x 20	М	М7	Да	Неисправность инструментов
x 21	М	М8	Да	Неисправность горношахтного оборудования
x 22			Нет	Электрическое искрение вследствие неисправного оборудования
x 23	М	М9	Да	Недостаточная искрозащитенность оборудования
x 24	М	М10	Да	Искрение контактных групп
x 25	М	М11	Да	Искрение кабеля
x 26	М	М12	Да	Неисправность системы освещения
x 27	Ч	Н3	Да	Искрение вследствие ошибки отключения питания
x 28			Нет	Электрическое искрение
x 29	М	М13	Да	Искрение вследствие трения механизмов машин
x 30	М	М14	Да	Технологическое искрение
x 31	М	М15	Да	Искрение вследствие трения конвейера
x 32			Нет	Фрикционное воспламенение
x 33	Ч	Н6	Да	Открытый огонь, в том числе курение
x 34	С	С8	Да	Подземные пожары
x 35			Нет	Наличие источника воспламенения
x 36	Ч	Н7	Да	Ошибка предотвращения выброса пыли вследствие неверных действий человека
x 37	М	М15	Да	Ошибка предотвращения выброса пыли вследствие неисправности средств противоаварийной защиты
x 38			Нет	Наличие угольной пыли взрывоопасной концентрации
x 39	С	С10	Да	Подземные взрывы и нарушения при их проведении
x 40	С	С11	Да	Подземные случайные горные удары и микросейсмические явления
x 41			Нет	Наличие взрывоопасной газовой смеси
x 42			Нет	Наличие инициатора взрыва
x 43	С	С13	Да	Наличие кислорода
x 44			Нет	Наличие источника горения
x 45	С	С14	Да	Наличие легко-воспламеняемых материалов и топлива
x 46			Нет	Локальный взрыв газа и угольной пыли
x 47	Ч	Н4	Да	Ошибки размещения датчиков метана
x 48			Нет	Ошибки датчиков метана
x 49	Ч	Н5	Да	Частота измерений
x 50	Ч	Н7	Да	Ошибки выбора точек измерения
x 51	Ч	Н8	Да	Ошибка ручного считывания
x 52	М	М17	Да	Ошибки калибровки
x 53	М	М18	Да	Ошибки износа

В исследованиях по техногенной безопасности наиболее широкое распространение получили семантические модели причинно-следственных связей в виде «дерева происшествий», относящиеся к классу логико-вероятностных моделей.

Дерево ошибок, раскрывающее случайные механизмы для аварийных ситуаций, вызванных взрывами огнеопасных газов и угольной пыли приведено на рисунке 2.

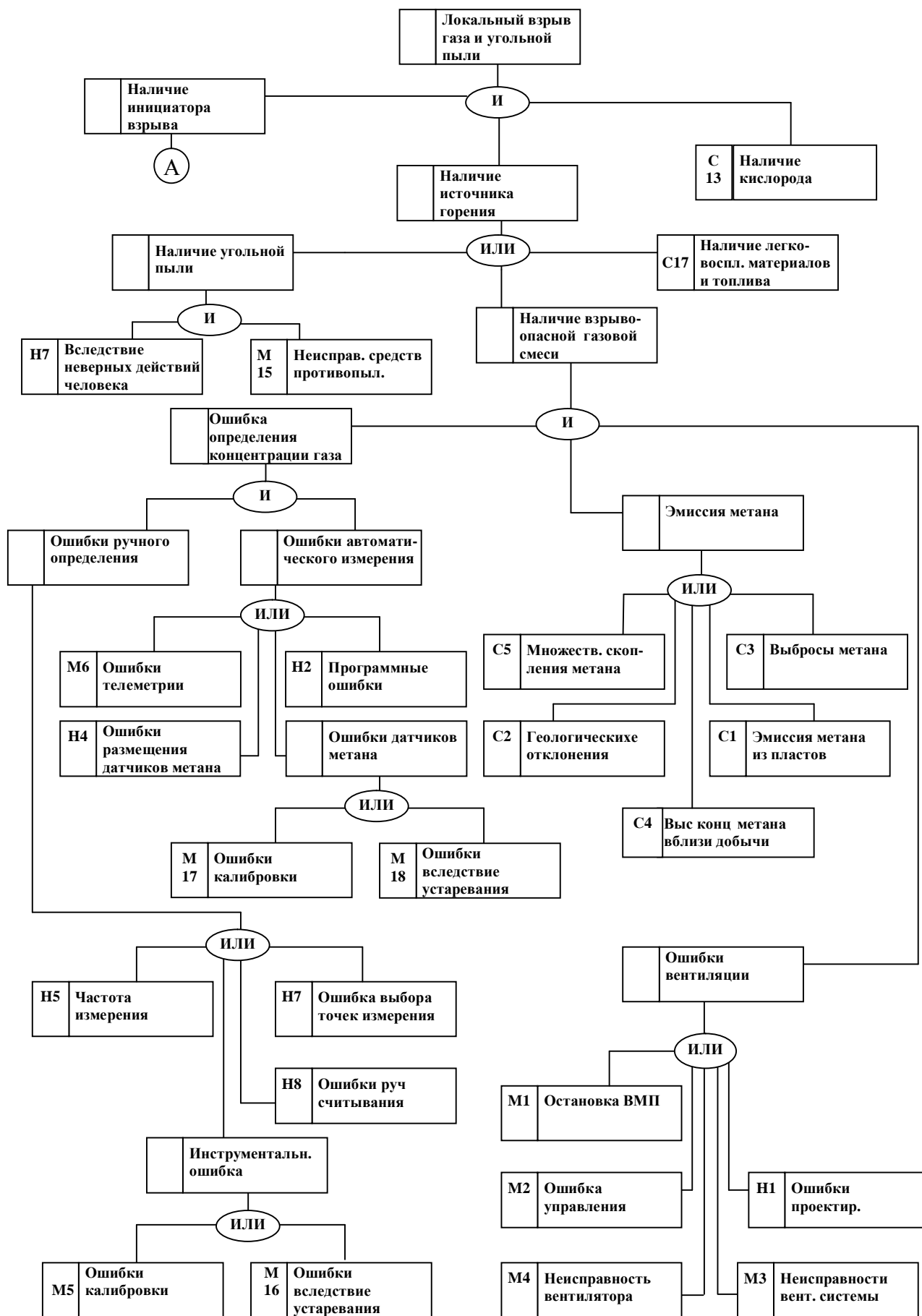


Рисунок 2- Дерево ошибок, раскрывающее случайные механизмы для аварийных ситуаций, вызванных взрывами газа и угольной пыли

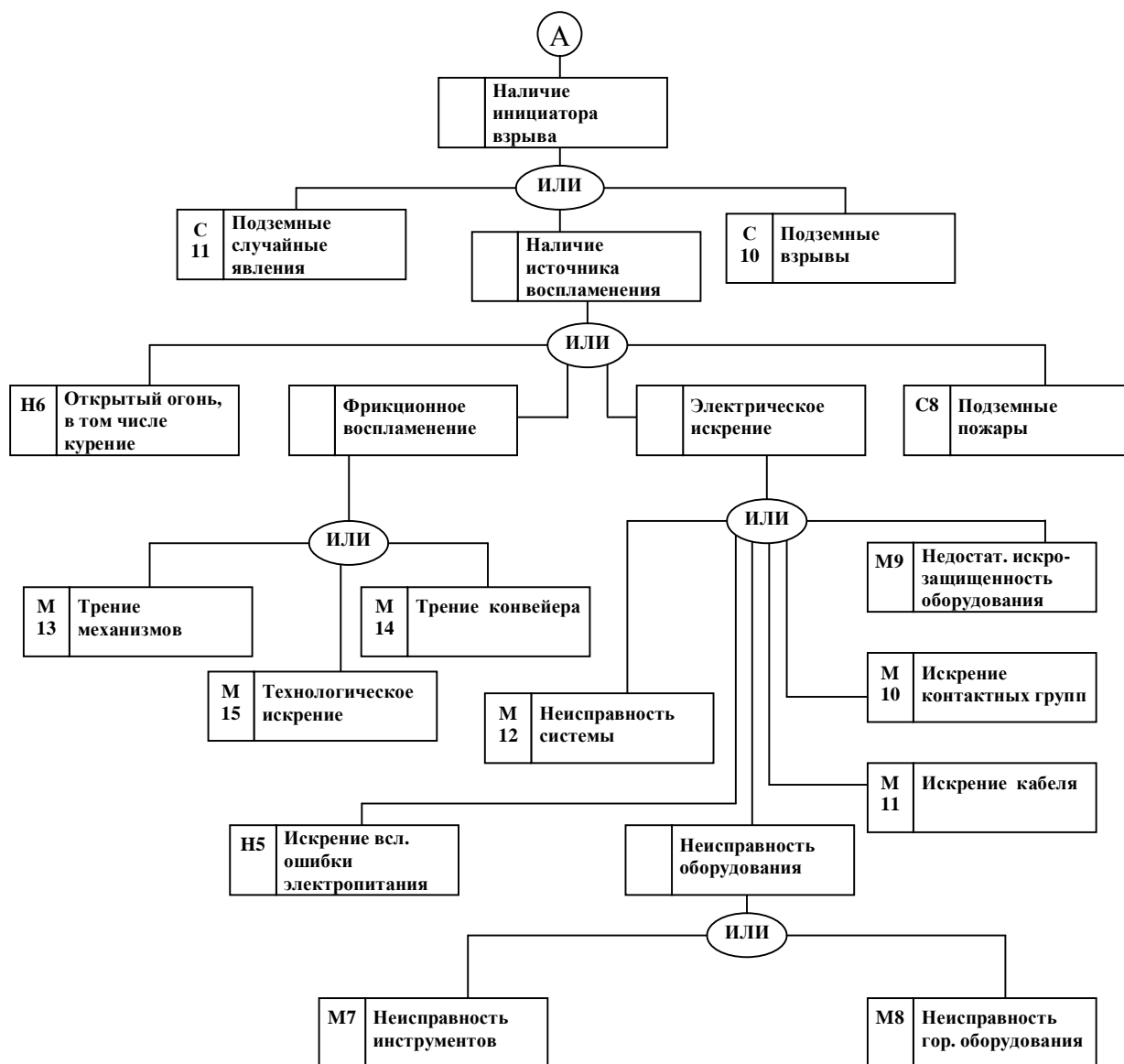


Рисунок 2 - Дерево ошибок, раскрывающее случайные механизмы для аварийных ситуаций, вызванных взрывами газа и угольной пыли (продолжение)

Семантическая модель типа дерева происшествия обычно включает одно головное событие, которое соединяется с помощью конкретных логических условий с промежуточными и исходными предпосылками, обусловившими в совокупности его появление. Листьями же дерева происшествия служат исходные события (ошибки, отказы и неблагоприятные внешние воздействия), дальнейшая детализация которых нецелесообразна.

Процесс появления конкретного происшествия в последующем будет интерпретироваться данной моделью как прохождение некоторого сигнала от каких-либо исходных событий, инициирующих причинную цепь к головному событию.

В качестве промежуточных состояний рассматриваемого дерева применяются события верхнего и последующих уровней, а узлов-регуляторов потока — логические условия сложения или перемножения, используемые в булевой алгебре.

Важным достоинством моделирования происшествий с помощью диаграмм типа «дерево» является возможность обстоятельного и системного анализа интерпретируемых им процессов.

Задачи качественного анализа при использовании моделей типа «дерево» состоят в выявлении закономерностей возникновения и снижения ущерба от техногенного происшествия, т.е. в выявлении в соответствующем дереве тех цепочек событий, реализация которых приводит к появлению его головного события, а также в количественной оценке вклада интересующих событий-предпосылок.

Одним из способов качественного анализа дерева происшествия является анализ с помощью минимальных пропускных сочетаний.

Минимальное пропускное сочетание включает в себя наименьшее число исходных событий дерева происшествия, одновременное появление которых достаточно для появления головного события.

Следующим этапом системного анализа и моделирования опасных процессов с помощью диаграмм типа «дерево» является количественный анализ, при котором вычисляется вероятность появления аварийного события.

Подготовительным этапом при переходе к количественному анализу дерева происшествия служит дальнейшая формализация этой семантической диаграммы — аналитическое представление заданного процесса в виде структурной функции.

При вычислении числовых характеристик выполняется поэтапная декомпозиция дерева. При объединении логическим условием «И» *n* предпосылок заменяют одним событием с вероятностью появления P_n :

$$P_n = \prod_{i=1}^n P_i \tag{1}$$

При соединении логическим условием «ИЛИ» *m* предпосылок заменяют одним событием с вероятностью P_m :

$$P_m = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i) \tag{2}$$

Результаты моделирования опасных процессов с помощью диаграмм типа «дерево» и вычислений по формулам 1 и 2 приведены на рисунке 3.

Узловые события	Вероятность	Описание
x11=[x6*x7*x8*x9*x10]	0.0893457936559018	Ошибка определения концентрации газа
x17=[x12*x13*x14*x15*x16]	0.299692073695333	Эмиссия метана
x41=[x5*x11*x17]	0.855309723466125	Наличие взрывоопасной газовой смеси
x22=[x20*x21]	0.202938473728191	Электрическое искрение вследствие неисправного оборудования
x28=[x23*x24*x25*x26*x27*x22]	0.56246074167067	Электрическое искрение
x32=[x29*x30*x31]	0.060700008787	Фрикционное воспламенение
x35=[x33*x34*x32*x28]	0.831128708073318	Наличие источника воспламенения
x38=[x36*x37]	0.213759213330057	Наличие угольной пыли взрывоопасной концентрации
x42=[x39*x40*x35]	0.976880004195419	Наличие инициатора взрыва
x44=[x45*x41*x38]	0.997880160932623	Наличие источника горения
x46=[x43+x44+x42]	0.208374442565585	Локальный взрыв газа и угольной пыли

Рисунок 3- Качественный и количественный анализ дерева происшествий

Другим способом качественного анализа дерева происшествий, позволяющим уточнить вклад его конкретных событий в появление и предупреждение головного события, является анализ значимости исходных событий.

Оценка *значимости* любого события дерева происшествия основана на учете логики его объединения с другими событиями этой модели: чем ближе к вершине находится событие, тем больше его вклад в условие возникновения конкретного происшествия.

В настоящее время используются количественные критерии оценки значимости, характеризующие вероятность наступления головного события за некоторое время.

Самым предпочтительным считается критерий Фусселя — Везели, характеризуемый вероятностью того, что событие или минимальное сочетание событий дерева происшествия способствуют появлению его головного события. [2]

Значение критерия рассчитывается по следующим формулам:

$$N_i^{fv} = P_i(\tau) / Q(\tau) \tag{3}$$

$$N_i^{fv} = (\sum_{k=1}^n P_k^*(\tau)) / Q(\tau)$$

где $P_i(\tau)$, $Q(\tau)$ - соответственно вероятности наступления i -го события и головного события дерева происшествий за некоторое время τ ; $P_k^*(\tau)$ - вероятности событий, принадлежащих минимальному пропускному сочетанию; n — число событий в этом сочетании.

Результаты расчетов значимости отдельных событий и минимальных пропускных сочетаний приведены на рисунках 4 и 5.

№	Номер события	Значимость	Описание
1	43	0,479905303014911	Наличие кислорода
2	44	0,478887981004938	Наличие источника горения
3	42	0,46880989442261	Наличие инициатора взрыва
4	45	0,43131162772859	Наличие легковоспламеняемых материалов
5	41	0,41046767201161	Наличие взрывоопасной газовой смеси
6	35	0,398863074492317	Наличие источника воспламенения
7	28	0,269927892665454	Электрическое искрение

Рисунок 4 - Анализ значимости исходных событий

Номер соч	Цепь событий	Значимость	Описания
1	x43+x36+x45+x25+	0,272051995403624	Наличие кислородаОшибка предотв
2	x43+x36+x45+x39+	0,212310849675112	Наличие кислородаОшибка предотв
3	x43+x36+x45+x21+	0,170032497127265	Наличие кислородаОшибка предотв
4	x43+x36+x45+x27+	0,102019498276359	Наличие кислородаОшибка предотв
5	x43+x36+x45+x30+	0,0680129988509059	Наличие кислородаОшибка предотв
6	x43+x36+x4+x25+	0,0458640453595414	Наличие кислородаОшибка предотв
7	x43+x37+x45+x25+	0,0435754274430336	Наличие кислородаОшибка предотв

Рисунок 5- Анализ значимости минимальных пропускных сочетаний

В заключение, укажем порядок обоснования мер по снижению техногенного риска с помощью диаграмм причинно-следственных связей типа «дерево». Необходимость в этом возникает в тех случаях, когда ожидаемые вероятности возникновения происшествий или ущерб от них не удовлетворяет требованиям безопасности проведения исследуемых процессов.

Для выбора соответствующих мероприятий по обеспечению заданного уровня безопасности используются выявленные при моделировании минимальные сочетания исходных предпосылок дерева происшествия и расчетная оценка их значимости. Устранение причинных цепей, состоящих из наиболее значимых предпосылок, за счет внедрения дополнительных организационно-технических мероприятий, является самым эффективным способом обеспечения заданного уровня безопасности.

При формировании набор оптимальных мероприятий для определения эффекта, ожидаемого от внедрения дополнительного технического средства или организационного мероприятия достаточно провести повторный количественный анализ, но при новых значениях вероятностей предпосылок дерева происшествия. Данный факт еще раз подтверждает актуальность и плодотворность рассмотренных здесь моделей и методов системного исследования опасных процессов.

Выводы:

При исследовании процесса аварийного взрыва газовой смеси и угольной пыли использовалось логико-вероятностное моделирование. Используя системный подход, были проанализированы основные риски для аварийного события.

При моделировании происшествий с помощью диаграмм типа «дерево» был выполнен качественный и количественный анализ событий, выявлены минимальные пропускные сочетания исходных предпосылок дерева происшествия и выполнена оценка их значимости.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для обоснования наилучших организационно-технических решений при системном синтезе мер снижения техногенного риска. Учитывая значимость соответствующих событий-предпосылок, определяется наиболее предпочтительная для этого стратегия.

Литература

1. Обеспечение безопасности технологических процессов угольных шахт. Красик Я.Л., Андриевская Н.К.: С23 Наукові праці Донецького Національного Технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 107/ Редкол.: Башков Є.О(голова) та ін.- Донецьк-ДонНТУ, 2006.-203с.
2. Белов П.Г. Моделирование опасных процессов в техносфере. Москва: Издательство Академии гражданской защиты МЧС РФ, 1999. -124 с.
3. CSIR Research Space [Электронный ресурс] / Inertisation strategies and practices in underground coal mines , J JL du Plessies Van Nickerk – Электронные данные,- Режим доступа: <http://reseachspace.csir.co.za/dspace/handle/10204/1510> - Загл. с экрана.-Яз. англ.
4. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology [Электронный ресурс] / Reliability of flammable gas detection methods in Japanese coal mines A. Tanaka, K. Noda and K. Aoki. – Электронные данные,- Режим доступа: <http://staff.aist.go.jp/a.tanaka/MNT848-finel.pdf>