

ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 519.21

А.С.Сорокин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАНОВЗРЫВООПАСНОСТИ ШАХТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для обеспечения безопасных условий работы в газовых шахтах содержание метана в выработках должно быть значительно меньше нижнего предела взрывчатости метановоздушной смеси (5%). Меры борьбы с метаном в шахтах преследуют цель не допустить опасных скоплений метана в выработках, предупредить воспламенение метана, ограничить последствия взрывов. Поэтому возникает необходимость исследования метановзрывоопасности типовых схем проведения выработок комбайнами (от электрооборудования) и взрывным способом.

С целью оценки влияния взрывных работ и электрооборудования, применения АГЗ (автоматической газовой защиты) на метановзрывоопасность на ЭВМ проведено математическое моделирование метановзрывоопасности, основанное на использовании программы [1- 2].

§ 1. Постановка задачи

Исследование вопросов, связанных с построением и реализацией математических моделей аэробологических процессов, представляет актуальную проблему в создании автоматических систем управления угольных шахт.

Применяемые в настоящее время методы снижения газовыделения, например, дегазация разрабатываемого угольного пласта и спутников, а также массива окружающих горных пород, и методы повышения безопасности горных работ путем периодического контроля концентрации метана на добывающих участках недостаточно эффективны при увеличении газовыделения [3] .

Для отыскания качественно новых путей решения проблемы борьбы со взрывоопасными концентрациями метана возникает, прежде всего, необходимость оперативной количественной оценки метановзрывоопасности шахтных технологических систем. А.Ф.Абрамовым и Р.Б.Тяном [3-5] рассмотрены методы построения алгоритмов централизованного контроля и управления проветриванием шахт с помощью ЭВМ. Ими определены статические и динамические характеристики объектов проветривания, а также выборы периода съёма информации о состоянии рудничной атмосферы по критериям безопасности и точности, определения расхода воздуха и оптимального

управления воздухораспределением в вентиляционной сети шахты. Они установили, что с точки зрения обеспечения безопасных условий на добывающем участке, большую опасность при управлении газовой обстановкой представляет переходный газодинамический процесс со всплеском концентрации метана, вызванный резким увеличением воздуха. Также было отмечено, что производственные процессы на добывающем участке вызывают не только колебания газовыделения, но и изменения дебита воздуха в широких пределах. Однако эти авторы не рассматривали вопрос о комплексе конкретных факторов, влиявших на повышение концентрации метана в рудничной атмосфере и количественной оценке метановзрывоопасности в зависимости от этих факторов.

В.Н.Вылегжаниным [6-8] разработаны алгоритмы и программы прогноза газовыделения в подготовительные и очистные выработки. В основу алгоритмов положены современные представления о фильтрации метана в среде с переменными пористостью и проницаемостью. Им изучено влияние различных природных факторов и технологических параметров ведения горных работ на интенсивность процесса газовыделения. Показано, что с увеличением природного давления газа, газопроницаемости, мощности пласта, а также с уменьшением крепости угля интенсивность газовыделения возрастает. Из технологических параметров наибольшее влияние на характер газовыделения оказывают длина лавы, скорость подвижания забоя, производительность выемочной машины, длительность цикла.

А.А.Мясниковым, А.Ф.Павловым, С.П.Казаковым [9] был рассмотрен элементный метод оценки надежности и безопасности технологических систем угольной шахты, формирование газоопасности в горных выработках выемочного участка. Ими созданы алгоритмы оценки газовой опасности выемочного участка, учитывающие неравномерность газовыделения во время работы комбайна, но нет количественной оценки метановзрывоопасности от электрооборудования, взрывных работ.

В.П.Лавцевич и А.С.Сорокин [10-13] разработали инженерную методику количественной оценки метановзрывоопасности шахтных техно-

логических систем применительно к условиям Кузбасса, используя методы теории массового обслуживания, вывели аналитические зависимости, позволяющие количественно оценить надежность технологических систем в отношении воспламенения метана при различных стратегиях действия контрольных подсистем.

На основе этой методики был создан комплекс программ для ЭВМ, позволяющих эффективно и в очень короткое время (2,5 - 3 мин) оценить метановзрывоопасность шахтной технологической системы [14,15].

Сложные в практическом применении алгоритмы оценки метановзрывоопасности, будучи переведенными на язык ЭВМ, становятся доступными для практического использования широким кругом специалистов, так как подготовка исходной информации к программам и сама их эксплуатация не сложны и не требуют специальных знаний.

§ 2. Разработка и исследование алгоритма оценки вероятности воспламенения метана от электрооборудования

В основу алгоритма положен метод, разработанный В.П.Лавцевичем, А.С.Сорокиным и М.К.Сорокиной [11-16]. Вероятностные характеристики потока воспламенений метана определяются как функции взаимодействия двух независимых случайных потоков: событий возникновения воспламеняющих агентов (ВА) и потока загазований [16].

Вероятность воспламенения метана за время T в пункте установки электрооборудования в выработке, где рудничная атмосфера не контролируется автоматическим метанометром, определяется по формуле [16]:

$$Q(T)=1-\exp(-\lambda_2\rho_M T), \quad (1)$$

где λ_2 - интенсивность возникновения дуг размыкания, искр, пламени и прочих воспламеняющих агентов при функционировании электрического объекта;

ρ_M - коэффициент загазованности или асимптотическая вероятность появления взрывоопасной концентрации метана;

T - длительность функционирования объекта - источника воспламеняющих агентов.

Для аппаратов, заключенных во взрывоопасные оболочки, поток воспламеняющих агентов суммируется из событий появления электрических дуг размыкания в нормальном режиме работы аппарата, в аварийном режиме короткого замыкания и в режиме обслуживания. Интенсивность возникновения воспламеняющих агентов при функционировании некоторых электроаппаратов представлены в [16].

Коэффициент загазованности, как функция вероятности появления максимальной концентрации метана, имеет вид :

$$\rho_M=2\tau_3[1-\Phi(\eta_n)],$$

$\Phi(\eta_n)$ - вероятность отсутствия взрывоопасной концентрации метана за полчасовой интервал времени:

τ_3 - средняя длительность загазования.

Исходя из II - предельного закона вероятностей Э. Гумбеля,

$$\Phi(\eta_n)=\exp\left(-\left(\frac{V_n}{\eta_n}\right)^k\right),$$

где V_n , k параметры распределения, связанные соотношением

$$V_n=\frac{\bar{\eta}_H}{\Gamma\left(1-\frac{1}{k}\right)}.$$

Здесь $\bar{\eta}_H$ - средняя максимальных получасовых концентраций метана, %

$$\bar{\eta}_H=1.08\bar{\eta}+0.043.$$

$\bar{\eta}$ - средняя концентрация метана, %

$\bar{\eta}_H$ - нижний взрывоопасный уровень концентрации метана.

Параметр определяется программно по таблице, составленной на основе графической зависимости, имеющейся в работе [17],

Γ - функция вычисляется из соотношения

$$\ln\Gamma\left(1-\frac{1}{k}\right)=\gamma\frac{1}{k}+\sum_{\nu=2}^{\infty}S_{\nu}\frac{\left(\frac{1}{k}\right)^{\nu}}{\nu}; \quad \left|\frac{1}{k}\right|<1.$$

В этом выражении [17]

$$\begin{aligned} \gamma &= 0,577921; & S_2 &= 1,644934; & S_3 &= 1,202056; \\ S_4 &= 1,082323; & S_5 &= 1,036927; & S_6 &= 1,017343; \\ S_7 &= 1,008349. \end{aligned}$$

Коэффициент вариации максимальных получасовых концентраций метана $V_{\eta H}$ связан с коэффициентом вариации всех значений концентраций V_{η} соотношением

$$V_{\eta H}=0.96 V_{\eta}$$

Величина средней длительности загазования находится в зависимости от частоты колебаний концентрации.

При условии $\eta_n-\bar{\eta}\geq 2.5\bar{\eta}V_{\eta}$:

$$\tau_3=\frac{0.4\bar{\eta}V_{\eta}}{\nu_{01}(\eta_n-\bar{\eta})};$$

при $\eta_n-\bar{\eta}<2.5\bar{\eta}V_{\eta}$:

$$\tau_3=\frac{0.5-\Phi\left(\frac{\eta_n-\bar{\eta}}{\bar{\eta}V_{\eta}}\right)}{\nu_{01}\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\eta_n-\bar{\eta}}{\bar{\eta}V_{\eta}}\right)^2\right)};$$

ν_{01} - частота превышения концентрацией метана среднего уровня.

При известных ожидаемых средних величинах метанопритока и дебита воздуха средняя концентрация метана с достаточной степенью точности может быть определена из соотношения

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{J}}{\bar{Q}} 100\%,$$

\bar{J} – средняя величина метанопритока, $M^3 / \text{мин.}$

\bar{Q} – средняя величина дебита воздуха, $M^3 / \text{мин.}$

Степень колеблемости концентрации метана зависит от изменчивости метанопритока и от неравномерности воздушного потока. Учитывая, что газовые потоки непостоянны не только

во времени, но и в пространстве, коэффициенты вариации концентраций должны быть увеличены в 1.3 – 1.5 раза

$$V_{\eta} = \alpha \sqrt{V_J^2 + V_Q^2},$$

α - коэффициент пространственной неравномерности,

V_J - коэффициент вариации значений метанопритока,

V_Q - коэффициент вариации значений дебита воздуха.

Метановзрывоопасность вентиляционных систем, контролируемых автоматическими метанометрами, отключающими электроэнергию при появлении концентрации метана, превышающий предельный уровень, оценивается ве-

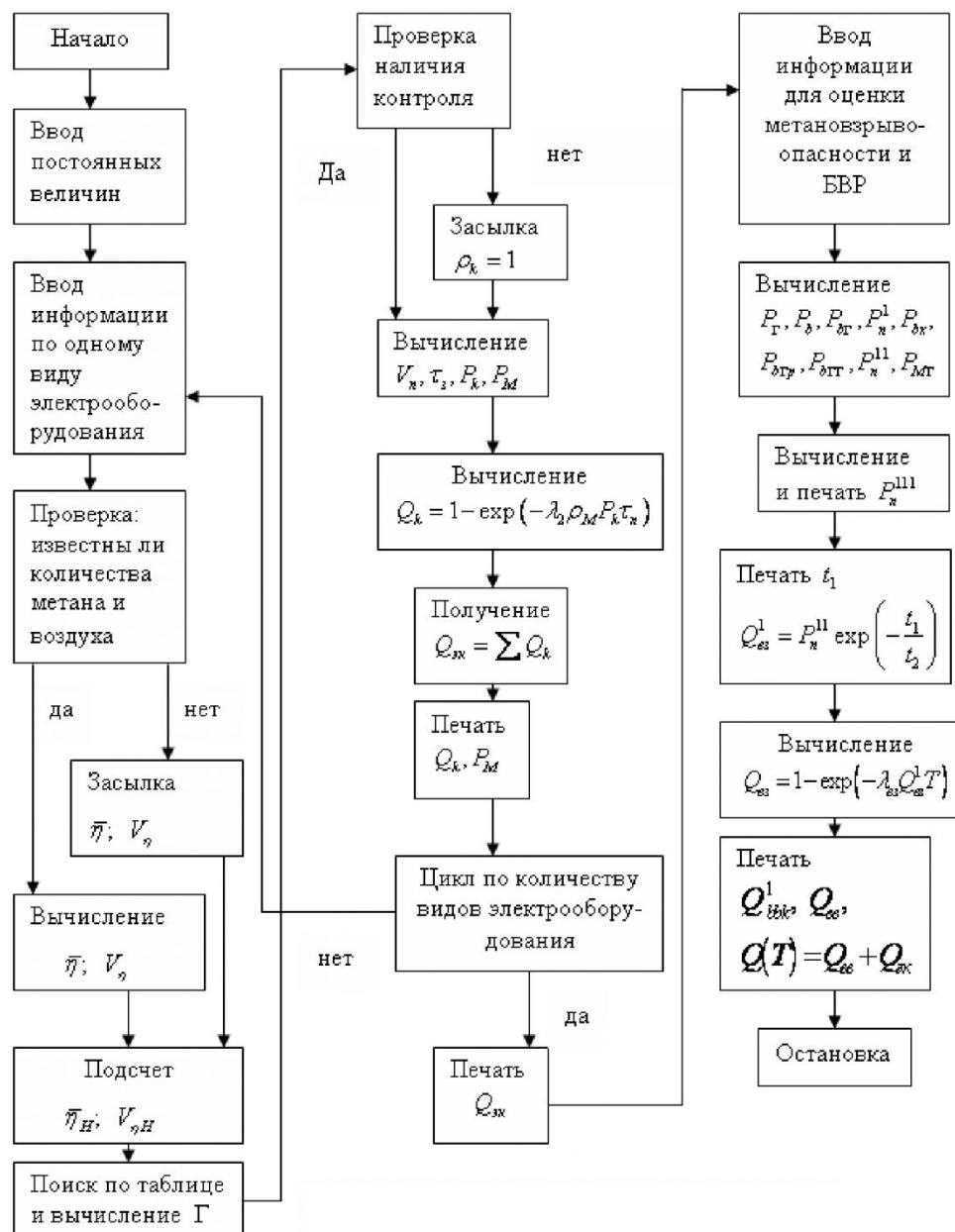


Рис. 1. Блок-схема задачи по количественной оценке метановзрывоопасности технологических систем

роятностью

$$\begin{aligned} Q_k(T) &= 1 - \exp(-\lambda_2 \rho_M \rho_k T), \\ \rho_k &= \frac{\lambda_k \tau_k}{\tau_3 - \tau_k}, \end{aligned}$$

ρ_k - коэффициент ненадежности контрольного элемента,

λ_k - интенсивность отказов системы автоматического контроля метана,

τ_k - среднее время пребывания контрольной системы в нерабочем состоянии.

Программа, составленная по приведенному выше алгоритму, позволяет оценивать метановзрывоопасность от электрооборудования вентиляционных систем, как контролируемых автоматическими метанометрами, так и не контролируемых, задавая соответствующим образом информацию о наличии контрольного элемента или его отсутствии.

В [16] показано, какая исходная информация необходима для работы программы и какие данные выдаются в результате работы программы на печать. Если нет необходимости в подробной информации о каждом виде электрооборудования источнике ВА, то на печать можно выдать только коэффициент загазованности ρ_M и вероятность взрывоопасного состояния $Q_i(T)$ для этого источника ВА.

Программа внедрена на ИВЦ ОАО "Южкузбассуголь" и "Прокопьевскуголь".

Моделирование на ЭВМ оценки метановзрывоопасности проведено по данным шахты "Зыряновская", шахты №12.

Оценка метановзрывоопасности от электрооборудования при проведении выработки узкохватным комбайном 4ПУ: $S_{np} = 5 \text{ м}^2$, скорость проведения выработки 380 м/мес, проведение за цикл – 2 м, число циклов в смену-3, длительность смены - 7 час.

Метаноприток в рудничную атмосферу определяется по формуле

$$\bar{J} = S_{np} r_{uw} \gamma (x_n - x_0),$$

где $x_0 = 2.6 \text{ м}^3/\text{T}$ - остаточная метаноносность угля;

$r_{uw} = 0,0105 \text{ м}/\text{мин}$. - средняя скорость подвигания забоя;

$\gamma = 1,3 \text{ т}/\text{м}^3$ - объемный вес угля;

$x_n = 6 \text{ м}^3/\text{T}$ - природная метаноносность угля;

$Q = 67 \text{ м}^3/\text{мин}$. - дебит воздуха.

Электрооборудование, находящееся в выработке при ее проведении и представляющее собой источники ВА, приведено в [16]. В [16] представлены результаты оценки метановзрывоопасности от электрооборудования.

Для каждого вида электрооборудования-источника ВА в той же последовательности вы-

даны значения коэффициента загазованности ρ_M и значение вероятности воспламенения метана $Q_i(T)$ при функционировании электрического аппарата. Последняя строка таблицы - показатель метановзрывоопасности электрообогрудования $Q_i(T) = 0.122 \cdot 10^{-12}$.

§ 3. Разработка и исследование алгоритма оценки вероятности воспламенения метана при взрывных работах

В основу алгоритма (рис. 1.) положен метод, разработанный В.П.Лавцевичем, А.С. Сорокиным и М.К.Сорокиной [12, 16].

При взрывании ВВ метан выделяется вследствие выброса высокотемпературных продуктов взрыва в атмосферу выработки уже содержащую высокий процент метана или вследствие интенсивного выделения метана из отбитого угля [16].

В первом случае опасность воспламенения метана оценивается вероятностью (1).

Интенсивность воспламеняющих агентов определяется как

$$\lambda_2 = \lambda_{63} P_n,$$

λ_{63} – частота взрываний, P_n - вероятность отката заряда ВВ.

Вероятность воспламенения метана, вследствие обильного выделения газа из отбитого угля, определяется из выражения

$$Q_{63} = P_n \exp\left(-\frac{t_1}{t_2}\right),$$

t_1 - среднее время от начала движения массива при взрыве ВВ до появления взрывоопасной концентрации, мин;

t_2 - среднее время действия воспламеняющих агентов при взрывании ВВ, мин.

$$t_1 = \frac{AV}{K_0 - Aq}, \quad A = \frac{(\eta_n - \bar{\eta}) K^1}{100 \gamma v (x_n - x_0)},$$

x_n - природная метаноносность угля, $\text{м}^3/\text{т}$;

x_0 - остаточная метаноносность угля, $\text{м}^3/\text{т}$;

v - объем взорванного в массиве угля, м^3 ;

γ - объемный вес угля, $\text{м}^3/\text{т}$;

q - интенсивность проветривания, $\text{м}^3/\text{т}$;

K^1 -коэффициент турбулентной диффузии, $K^1 = 0,8$.

K_0 – коэффициент, характеризующий степень снижения интенсивности газовыделения и зависящий от размеров зерен угля, его газопроницаемости, газоемкости и т.д.

При взрывании одиночного заряда вероятность выброса высокотемпературных продуктов определяется

$$P_n^1 \approx P_{63} + P_T + P_g,$$

где

$$P_{\text{бз}} = P_T P_B,$$

$$P_T = 0.5 - \Phi\left(\frac{S_n - S_k}{\sigma_n}\right),$$

$$P_B = 0.5 - \Phi\left(\frac{t_g V_{\text{зх}} - l_3}{t_g \sigma_V}\right),$$

P_T - вероятность замедления детонационного горения ВВ вследствие наличия зазоров между патронами,

P_B - вероятность того, что детонация выгорающего ВВ будет происходить после отрыва от массива,

S_k - средняя величина промежутка между патронами ВВ, $S_k = 2.5$ см,

S_n - расстояние между патронами, при котором обеспечивается вероятность детонации ВВ, равная 0.5 (для ПЖБ-20, $S_n = 3.3$ см; для Э-6 $S_n = 6$ см),

σ_n - среднее квадратическое отклонение промежутков между патронами, $\sigma_n = 0.66$;

l_3 - длина заряда, м.;

t_g - время от начала детонации ВВ до начала разрушения массива, сек;

для угля при одной обнаженной плоскости

$$t_g = (16 \div 20) \cdot 10^{-3} \text{ сек};$$

для угля при двух обнаженных плоскостях

$$t_g = (8 \div 11) \cdot 10^{-3} \text{ сек};$$

для песчаника при одной обнаженной плоскости

$$t_g = (13 \div 25) \cdot 10^{-3} \text{ сек};$$

для песчаника при двух обнаженных плоскостях

$$t_g = 5 \cdot 10^{-3} \text{ сек};$$

$V_{\text{зх}}$ - средняя скорость детонационного превращения выгорающего заряда ВВ;

$$V_{\text{зх}} = 2000 \text{ м/сек; для Э-6 } V_{\text{зх}} = 1750 \text{ м/сек;}$$

σ_V - среднеквадратическое отклонение скорости детонации выгорающего ВВ,

P_T - вероятность выброса высокотемпературных продуктов взрыва через трещины в массиве;

$$P_T \approx 0.75 P_{\text{бз}};$$

P_3 - вероятность выброса высокотемпературных продуктов взрыва из-за отсутствия или малой длины забойки,

$$P_3 = 0.5 P_{\text{бз}};$$

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz.$$

При взрывании группы зарядов возникает возможность воздействия взрыва одного заряда на смежные заряды ВВ из-за разброса моментов срабатывания детонаторов.

В этом случае вероятность выброса горячих продуктов равна

$$P_n^{11} \approx P_{\text{бз}} + P_T + P_3, \quad P_{\text{бз}} \approx (P_T + P_3) P_{\text{бзр}},$$

$$P_3 = \exp\left(-0.063 \frac{R}{R_0}\right),$$

$$P_{\text{бзр}} = 0.5 - \Phi\left(\frac{t_g V_{\text{зх}}^1 - l_3}{t_g \sigma_V^1}\right),$$

$P_{\text{бзр}}$ - вероятность того, что детонация ВВ, подвергшегося взрыву соседнего заряда, будет происходить после отрыва от массива;

$V_{\text{зх}}^1$ - средняя скорость детонационного превращения заряда ВВ, подвергшегося взрыву;

σ_V^1 - среднеквадратическое отклонение скорости детонации ВВ, подвергшегося влиянию взрыва соседнего заряда;

$P_{\text{зх}}$ - вероятность замедления детонационного превращения ВВ из-за воздействия взрыва смежного заряда;

R - расстояние между зарядами, м;

R_0 - радиус заряда, м.

При взрывании с использованием детонаторов короткозамедленного действия вероятность выброса высокотемпературных продуктов взрыва в этом случае составляет

$$P_n^{111} = 1 - (1 - P_{\text{мз}}) \prod_{j=2}^m (1 - P_{k_j}),$$

$$P_{k_j} = 1 - (1 - P_n^{11} - P_{r_g})^{n_j},$$

$$P_{\text{мз}} = 1 - (1 - P_n^1)(1 - P_n^{11})^{n_j-1},$$

P_{k_j} - вероятность выброса высокотемпературных продуктов взрыва для второй и последующих ступеней замедления.

$P_{\text{мз}}$ - вероятность того, что из группы n одновременно взрываемых зарядов детонирование хотя бы одного завершится после разрушения массива;

P_{ng} - вероятность детонирования ВВ вне массива из-за подрыва заряда предыдущими зарядами, $P_{ng} \approx P_{\text{бз}}$;

n_j -количество зарядов в j -ой ступени замедления;

m - число ступеней замедления.

Применение водораспылительных завес путем взрываивания наполненных водой баллонов снижает опасность воспламенения метана. Вероятность того, что время детонации ВВ будет превосходить время эффективного действия завесы, определяется по формулам:

при взрывании одиночных зарядов

$$P_{\text{бз}}^1 = 0.5 - \Phi\left(\frac{t_{\text{бз}} V_{\text{зх}} - l_3}{t_{\text{бз}} \sigma_V}\right),$$

при взрывании группы зарядов

$$P_{\text{зр}} = 0.5 - \Phi \left(\frac{t_g V_{\text{зр}}^{\text{l}} - l_s}{t_g \sigma_V^{\text{l}}} \right),$$

где $t_{\text{зр}}$ - эффективное время действия водяной завесы ($t_{\text{зр}} = 0.5 - 0.6$ сек).

Для определения метановзрывоопасности при взрывных работах создана программа для ЭВМ, где оценки метановзрывоопасности от электрооборудования выдаются на печать в полном объеме [18] или выводу подлежат лишь:

P_M - коэффициент загазованности;

P_n^{111} - вероятность отказов зарядов ВВ взрываемых с замедлением;

t_l - промежуток времени от начала разрушения массива при взрыве ВВ до появления взрывоопасной концентрации;

$Q_{\text{взр}}^l$ - вероятность воспламенения метана, выделившегося непосредственного из отбитого угля за один взрыв;

$Q_{\text{взр}}^{l_{\text{вк}}}$ - вероятность воспламенения метана вследствие выброса высокотемпературных продуктов взрыва в загазованную атмосферу выработки;

$Q_{\text{взр}}^l$ - вероятность воспламенения метана при взрывных работах вследствие совокупного воздействия всех факторов.

§ 4. Метановзрывоопасность сложной шахтной системы

Представим функционирование сложной шахтной системы в виде простого многоступенчатого процесса, т.е. все N ступеней соединены последовательно [19].

С точки зрения технологической надежности каждая i -я ступень многоступенчатого процесса представляет собой подсистему с m_i параллельно соединенными элементами.

Резервирование принимаем поэлементным.

Необходимо выбрать оптимальное число дублирующих элементов для каждой i -ой подсистемы. Известно, что надежность такой системы определяется

$$R_c = \prod_{i=1}^N \left[1 - (1 - R_i)^{m_i} \right],$$

где R_i - надежность элемента i -ой подсистемы.

С точки зрения метановзрывоопасности также имеем простой многоступенчатый процесс с числом ступеней

$$r = \sum_{i=1}^N m_i,$$

каждая из которых состоит из одного элемента.

Метановзрывоопасность при функционировании сложной шахтной системы определяется соотношением

$$Q(T) = 1 - \prod_{i=1}^r \left[1 - Q_i(T) \right],$$

где $Q_i(T)$ - метановзрывоопасность элемента ступени процесса, величина случайная, распределенная по экспоненциальному закону.

Алгоритм оценки метановзрывоопасности технологических схем реализует выбор структуры системы, оптимальной как по надежности, так и по метановзрывоопасности. Можно предложить несколько моделей такого рода, суть одной из них заключается в следующем:

$$Q(T) \rightarrow \min$$

$$R_c \geq M,$$

где M - минимально допустимая надежность системы. Частный случай такой модели, приведен в [20].

§ 5. Программа моделирования метановзрывоопасности сложных шахтных систем

Программа, основанная на приведенном выше алгоритме, рассчитана на оценку метановзрывоопасности любого количества электрических источников ВА, входящих в шахтную технологическую систему, и включает в себя расчет метановзрывоопасности при взрывных работах. Программа построена так, что можно вести (по мере надобности) оценку метановзрывоопасности либо только для электрооборудования, либо для взрывных работ, либо для того и другого вместе.

В целях экономии оперативной памяти предусмотрен последовательный ввод информации заключающейся в следующем: после обработки информации по одному источнику ВА (виду электрооборудования) и запоминания результата в те же ячейки оперативной памяти вводится информация по следующему источнику ВА и т.д. Это позволяет оценивать метановзрывоопасность горных выработок практически с любым количеством типов электрооборудования. Максимальное время работы программы - 1.5 мин, максимальное - 4 мин., включая выдачу результатов и ввод исходной информации. Время работы программы зависит от объема исходной информации (количества источников ВА).

Расчет метановзрывоопасности ведется для каждого источника воспламеняющих агентов отдельно. Начальными исходными данными для оценки вероятности возникновения взрывоопасной концентрации метана являются статистические характеристики рудничной атмосферы в месте функционирования источника ВА: среднее абсолютное содержание метана в рудничной атмосфере \bar{J} , коэффициент вариации дебита метана V_J , среднее количество воздуха, проходящее в единицу времени через выработку Q , коэффициент вариации воздушного потока V_Q . При неизвестных указанных параметрах в качестве исходных данных могут быть использованы величины средней концентрации

метана и коэффициента вариации концентрации в данной точке.

Для определения метановзрывоопасности от электрооборудования для решения задачи на ЭВМ необходимо задать, кроме вышеуказанных параметров: блокируется ли электрический источник ВА системой АГЗ, коэффициент пространственной неравномерности α , частоту превышения концентрацией метана среднего уровня V_Q , интенсивность отказов системы автоматического контроля метана λ_k , среднее время пребывания контрольной системы внерабочем состоянии τ_k , интенсивность λ_2 возникновения дуг размыкания, искр и прочих ВА, количество элементов данного вида электрооборудования n , длительность Γ функционирования объекта - источника воспламеняющих агентов .

Для решения на ЭВМ задачи определения метановзрывоопасности от взрывных работ необходимо задать, кроме вышеуказанных параметров \bar{J} , V_J , \bar{Q} , V_Q : расстояние S_n между патронами, при котором обеспечивается детонация ВВ ; среднюю величину S_k промежутка между патронами ВВ ; среднеквадратическое отклонение σ_n промежутков между патронами ; время t_g от начала детонации ВВ до начала разрушения массива; длину заряда l_s , среднеквадратическое отклонение σ_V скорости детонации выгорающего ВВ ; среднюю скорость V_{sx} детонационного превращения заряда ВВ ; расстояние R между зарядами; радиус заряда R_0 ; среднюю скорость V_{sx}' детонационного превращения заряда ВВ, подвергшегося взрыву ; среднеквадратическое отклонение σ_V' скорости детонации ВВ, подвергшегося влиянию взрыва соседнего заряда ; число зарядов n_1 в первой ступени замедления и т.д. до 5, число ступеней замедления m ; коэффициент турбулентной диффузии K^l ; объемный вес γ угля ; объем V взорванного угля в массиве ; природная метаноносность угля x_n ; остаточная метаноносность угля x_0 ; интенсивность проветривания q ; среднее время t_2 детонационного превращения ВВ после начала разрушения массива ; частота взрываний λ_{63} .

Программа оценки вероятности воспламенения метана решает следующие частные задачи.

1. Определение средней концентрации метана $\bar{\eta}$, исходного параметра для расчета вероятности загазирования, производится по известным значениям дебитов метана и воздуха.

2. Коэффициент вариации концентрации метана V_η определяется как функция коэффициентов вариации метанопритока и расхода

воздуха. Самостоятельное значение эта задача имеет при расчетах сложных технологических систем.

3. Максимальные получасовые концентрации $\bar{\eta}_H$ определяются с целью перехода от исходных распределений вероятностей к асимптотическим экстремальным распределениям Э.Гумбеля, что облегчает задачу вычисления вероятности загазирования.

4. Второй статистической характеристикой экстремальных концентраций будет коэффициент вариации максимальных концентраций $V_{\eta H}$.

5. Коэффициент загазованности P_M определяется как вероятность превышения концентрацией метана порогового уровня, равного 5%.

Подпрограмма определения P_M может быть использована для оценки как непосредственно вероятности загазирования, так и для стохастического моделирования рудничной атмосферы, установления зависимости вероятности загазирования от технологических и пластовых параметров.

6. Определение длительности загазирования τ_z определяется программой с использованием вероятности загазирования и частотной характеристики процесса изменения концентрации – частоты превышения средней концентрации метана v_{01} , определяемой экспериментально. Параметр, характеризующий длительность загазирования, может быть использован в задачах, связанных с эффективностью контрольной службы шахты.

7. Показатель ненадежности автоматической газовой защиты P_k определяется по двум параметрам, характеризующим отказы АГЗ: длительность отказов и их частота. Самостоятельное значение эта задача может иметь при исследовании надежности сложных шахтных систем, обслуживаемых контрольными процессами различного типа.

Ненадежность АГЗ может быть использована для моделирования контрольной службы шахты.

8. Оценка вероятности воспламенения метана $Q_i(T)$ при функционировании электрического аппарата - одна из основных задач программы. Получение численного значения метановзрывоопасности в точке установки данного электрического объекта имеет важное значение для выяснения пространственного распределения опасности воспламенения метана, исследования влияния технологических и организационных мероприятий, моделирования эффективности АГЗ.

9. Программа предусматривает определение вероятности воспламенения метана не только в отдельности для каждого электрического

источника ВА, но и всех их в совокупности. Показатель метановзрывоопасности электрооборудования $Q(T)$ может быть использован самостоятельно для сравнительной оценки надежности технологических систем, а также и в автоматизированной системе контроля вентиляции и метановзрывобезопасности шахт в качестве критерия оптимизации.

10. Отдельная подпрограмма рассчитывает вероятности отказов зарядов ВВ: вероятность замедления детонационного горения ВВ вследствие наличия зазоров между патронами одиночного заряда P_Γ ; вероятность детонационного превращения ВВ вне массива $P_{B\Gamma}$; вероятность замедления детонационного превращения ВВ вследствие воздействия взрыва смежного заряда $P_{x\Gamma}$; вероятность детонирования ВВ, подвергшегося взрыву соседнего заряда, вне массива $P_{\text{сбр}}$; вероятность выгорания групповых зарядов ВВ $P_{\text{вз}}$; вероятность отказа заряда из группы одновременно взрываемых зарядов вследствие действия всех причин P_n^{II} , вероятность выброса высокотемпературных продуктов взрыва при взрывании одиночных зарядов P_n^I , группы одновременно взрываемых зарядов $P_{M\Gamma}$; зарядов, взрываемых с замедлением P_n^{III} .

Эти вероятностные характеристики определяются для решения задачи опасности воспламенения метана при взрывных работах. Однако они могут иметь и самостоятельное значение для оценки и оптимизации надежности конструкции зарядов ВВ.

11. Промежуток времени t_1 от начала разрушения массива при взрыве ВВ до появления взрывоопасной концентрации метана определяется как функция многих переменных, поэтому данный параметр может быть широко использован для исследования метановыделения после взрыва.

12. Программа позволяет получить целый ряд показателей, характеризующих надежность взрывных работ в отношении воспламенения метана:

вероятность воспламенения метана, выделившегося непосредственно из отбитого угля за один взрыв Q_{63}^I и в течение одного часа функционирования системы Q_{63} ; вероятность воспламенения метана вследствие выброса высокотемпературных продуктов взрыва в загазованную атмосферу выработки Q_{66}^I и, наконец, вероятность воспламенения метана при взрывных работах вследствие совокупного воздействия всех факторов Q_{66} [14].

Все эти показатели могут найти широкое применение для моделирования надежности взрывных работ на газоносных пластах.

13. Определение вероятности воспламенения метана $Q(T)$ от совокупного воз-

действия всех воспламеняющих агентов - ко-нечный результат работы программы.

Эта величина может быть использована для решения широкого круга задач:

сравнительной оценки степени метановзрывоопасности нескольких технологических систем, моделирование метановзрывоопасности, оптимизация технологических параметров по заданной надежности в отношении воспламенения метана, автоматизированного контроля и управления метановзрывоопасности, анализа состояния опасности воспламенения метана на действующих шахтах, синтез оптимальных технологических систем и т.д.

§ 6. Математическое моделирование метановзрывоопасности технологических систем проведения выработок

Проведено математическое моделирование метановзрывоопасности, основанное на использовании программы, для оценки влияния взрывных работ и электрооборудования, применения АГЗ (автоматической газовой защиты) на метановзрывоопасность на ЭВМ.

Проигрывание модели на ЭВМ было осуществлено более чем для 500 вариантов: для шахт Прокопьевско-Киселевского района, шахты "Зыряновская", с использованием различных величин метанопритоков, дебитов воздуха, различных сечений выработок, различных горно-геологических условий, при наличии автоматического контроля за состоянием рудничной атмосферы и его отсутствии.

При моделировании оценена метановзрывоопасность при проведении штреков типовых сечений $S=5, 7.9; 12.1 \text{ м}^2$ взрывным способом для дебитов воздуха $Q = 67; 100; 200 \text{ м}^3/\text{мин.}$ и природной метаноносности $x_n = 6; 12; 24; 30; 36 \text{ м}^3/\text{т}$, а также метановзрывоопасность проведения штреков комбайнами 4ПУ и ПК-ЗМ с учетом наличия АГЗ (автоматической газовой защиты) и при ее отсутствии (рис. 2 - 14).

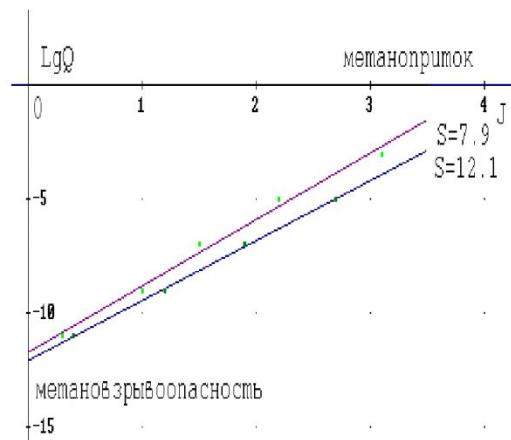


Рис.2. Зависимость метановзрывоопасности от метанопритока при взрывных работах

На рис.2 представлена зависимость ме-

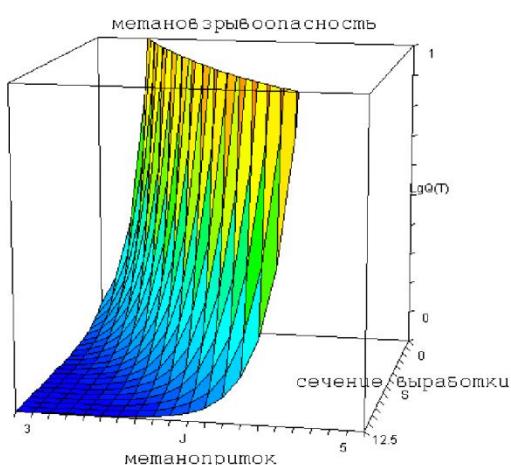


Рис.3. Зависимость метановзрывоопасности от метанопритока и от сечений выработки при взрывных работах

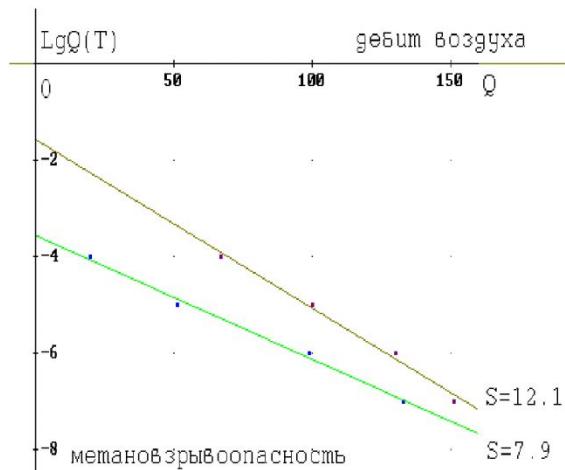


Рис.4. Зависимость метановзрывоопасности от дебита воздуха при взрывных работах.

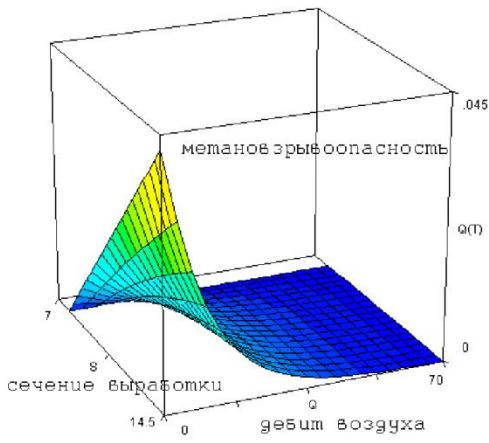


Рис.5. Зависимость метановзрывоопасности от дебита воздуха и от сечений выработки при взрывных работах

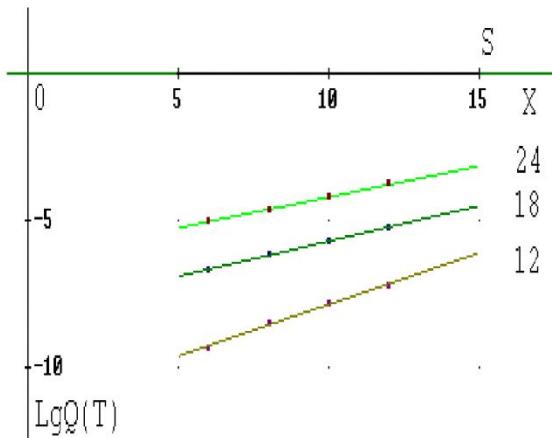


Рис. 6. Зависимость метановзрывоопасности от сечения выработки при взрывных работах

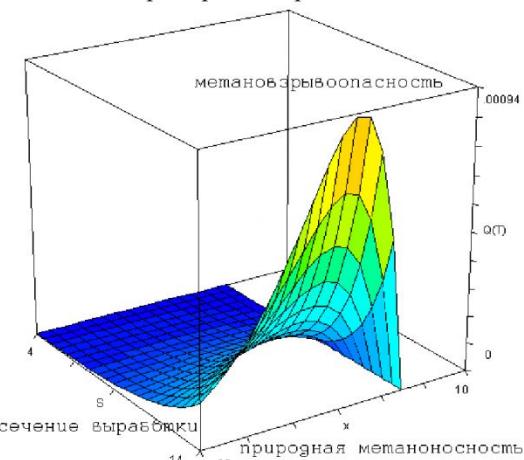


Рис. 7. Зависимость метановзрывоопасности от природной метаноносности и от сечения выработки при взрывных работах

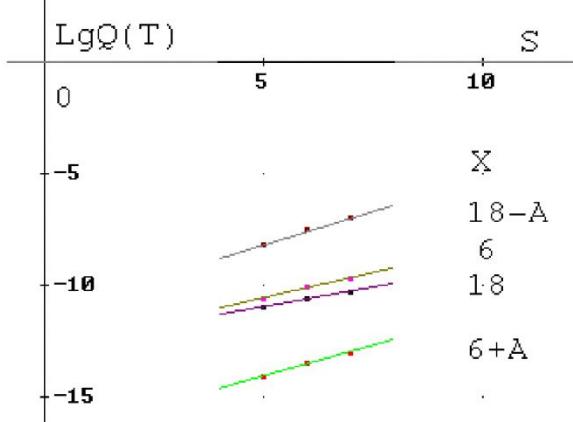


Рис.8. Зависимость метановзрывоопасности от сечения выработки при работе комбайна ПК-3М.

тановзрывоопасности от метанопритока при взрывных работах. Аналитически эти зависимости изображаются логистическими кривыми с несимметрией. Соответственно, математические модели

метановзрывоопасности имеют вид :
 при $S=7.9$ $Q(t)=1.9 \cdot 10^{-12} e^{6.7J}$
 при $S=12.1$ $Q(t)=8.4 \cdot 10^{-13} e^{6.06J}$.
 Исследования показали, что метановзрыво-

опасность при проведении штрека взрывным способом на 4-5 порядков выше, чем при проведении комбайнами (рис. 2, 9, 11). Применение автоматической газовой защиты снижает метановзрывоопасность при проведении штреков примерно на 4 порядка (рис. 9).

На рис.3 представлена зависимость метановзрывоопасности как от метанопритока так и от сечений выработки при взрывных работах. Аналитически эта зависимость изображается логистической поверхностью с несимметрией:

Математическая модель метановзрывоопасности будет иметь следующий вид:

$$Q(T) = \frac{(3.9 - 2.5S)10^{-13}}{\exp((-7.9 + 0.15S)J)}.$$

На рис.4 представлена зависимость метановзрывоопасности от дебита воздуха при взрывных работах. Аналитически эти зависимости изображаются логистическими кривыми с несимметрией. Математические модели метановзрывоопасности будут иметь вид:

при $S=7.9$

$$Q(t)=275 \cdot 10^{-6} e^{-0.06Q};$$

при $S=12.1$

$$Q(t)=0.027 \cdot e^{-0.08Q}.$$

На рис. 5 представлена зависимость мета-

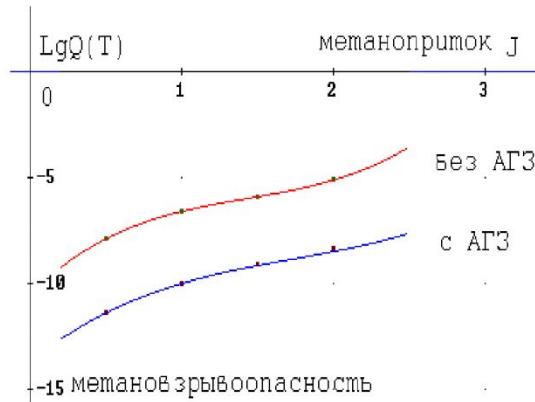


Рис. 9. Зависимость метановзрывоопасности от метанопритока при работе комбайна 4ПУ.

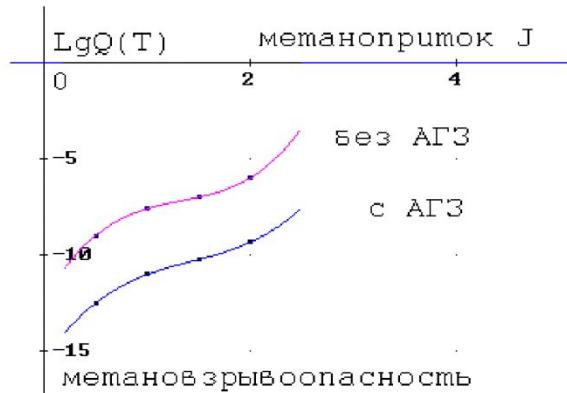


Рис. 11. Зависимость метановзрывоопасности от метанопритока при работе комбайна ПК-3М.

новзрывоопасности как от дебита воздуха так и от сечений выработки при взрывных работах. Аналитически эта зависимость изображается логистической поверхностью с несимметрией:

$$Q(T) = \frac{(0.0064S - 0.05)}{\exp(8 \cdot 10^{-4}(6S + 25)Q)}.$$

На рис. 6 представлена зависимость метановзрывоопасности от сечения выработки при взрывных работах - логистические кривые с несимметрией:

при природной метаноносности

$$x_n = 24 \text{ м}^3/\text{T}, Q(t) = 5 \cdot 10^{-7} e^{0.48S};$$

при природной метаноносности

$$x_n = 18 \text{ м}^3/\text{T}, Q(t) = 8 \cdot 10^{-9} e^{0.55S};$$

при природной метаноносности

$$x_n = 12 \text{ м}^3/\text{T}, Q(t) = 4.5 \cdot 10^{-12} e^{0.8S}.$$

На рис. 7 - зависимость метановзрывоопасности как от природной метаноносности, так и от сечения выработки при взрывных работах. Аналитически эта зависимость изображается логистической поверхностью с несимметрией:

$$Q(T) = \frac{(4.2x_n - 58) \cdot 10^{-8}}{\exp((-1.09 + 0.027x_n)S)}.$$

На рис.8 представлена зависимость мета-

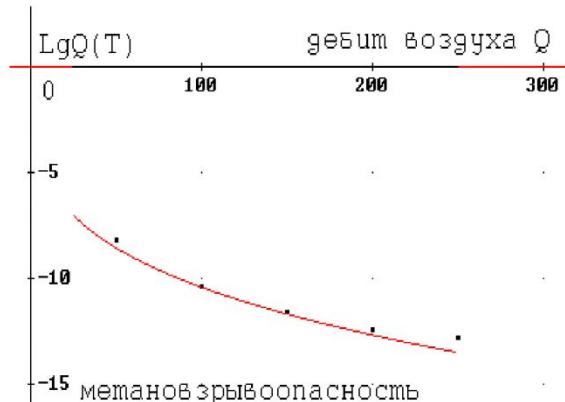


Рис. 10. Зависимость метановзрывоопасности от дебита воздуха при работе комбайна 4ПУ

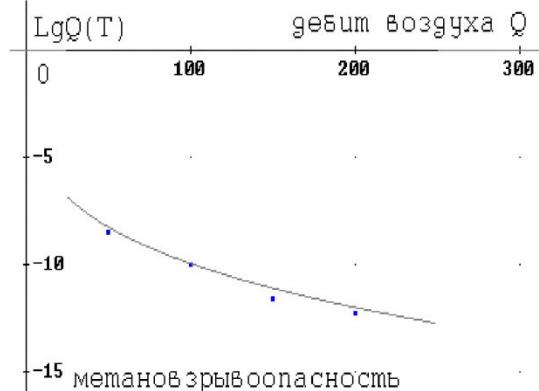


Рис. 12. Зависимость метановзрывоопасности от дебита воздуха при работе комбайна ПК-3М

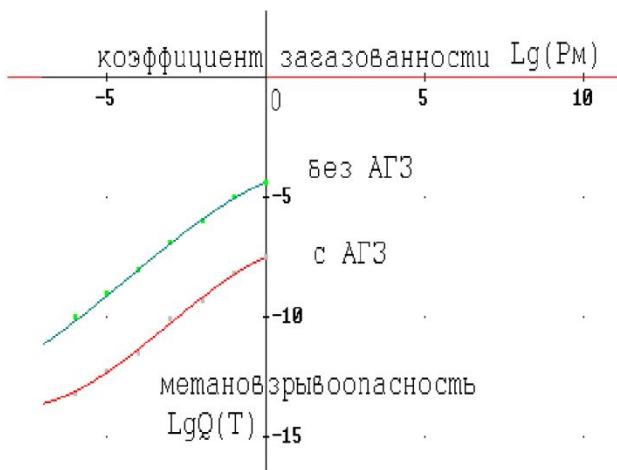


Рис. 13. Зависимость метановзрывоопасности от коэффициента загазованности при работе комбайна

новзрывоопасности от сечения выработки при работе комбайна ПК-3М - логистические кривые с несимметрией:

при природной метаноносности $x_n=18 \text{ м}^3/\text{T}$ без АГЗ

$$Q(t)=6.3 \cdot 10^{-12} e^{1.38S};$$

при природной метаноносности $x_n=6 \text{ м}^3/\text{T}$

$$Q(t)=1.6 \cdot 10^{-13} e^{1.04S};$$

при природной метаноносности $x_n=18 \text{ м}^3/\text{T}$

$$Q(t)=2 \cdot 10^{-13} e^{0.8S};$$

при природной метаноносности $x_n=6 \text{ м}^3/\text{T}$ с АГЗ

$$Q(t)=1.6 \cdot 10^{-17} e^{1.3S};$$

На рис. 9 представлена зависимость метановзрывоопасности от метанопритока при работе комбайна 4ПУ - логистические кривые с несимметрией:

без АГЗ

$$Q(t)=\exp(2.1 J^3 - 9.2 J^2 + 16 J - 24.2),$$

с АГЗ

$$Q(t)=\exp(1.15 J^3 - 6 J^2 + 13.4 J - 31.5).$$

На рис. 10 представлена зависимость метановзрывоопасности от дебита воздуха при работе комбайна 4ПУ логистическая кривая с несимметрией:

$$Q(t)=\exp(-2.84 Q^{0.282}).$$

На рис.11 представлена зависимость метановзрывоопасности от метанопритока при работе комбайна ПК-3М- логистические кривые с несимметрией:

без АГЗ

$$Q(t)=\exp(3.7 J^3 - 14.7 J^2 + 22 J - 28.6),$$

с АГЗ

$$Q(t)=\exp(2.5 J^3 - 10.6 J^2 + 18.4 J - 35.7).$$

На рис.12 представлена зависимость метановзрывоопасности от дебита воздуха при работе комбайна ПК-3М:

$$Q(t)=\exp(-2.87 Q^{0.27}).$$

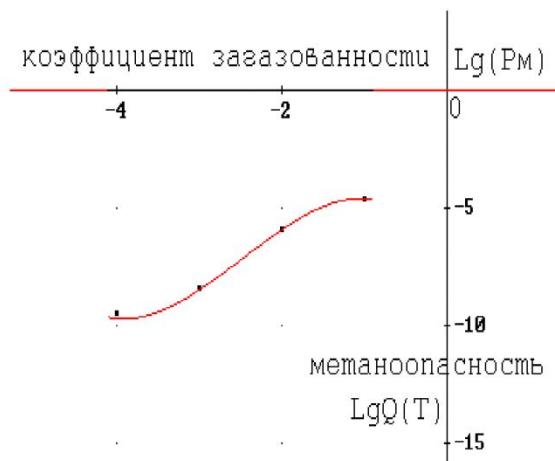


Рис. 14. Зависимость метановзрывоопасности от коэффициента загазованности при взрывных работах

При взрывных работах с возрастанием метанопритока метановзрывоопасность увеличивается тем резче, чем меньше сечение выработки (рис. 2).

На рис.13 представлена зависимость метановзрывоопасности от коэффициента загазованности при работе комбайна - логистические кривые с несимметрией:

без АГЗ

$$Q(T)=\frac{4.17 \cdot 10^{-5} (P_M)^{0.56}}{\exp(0.0019 \ln^3(P_M) + 0.0056 \ln^2(P_M))},$$

с АГЗ

$$Q(T)=\frac{3.16 \cdot 10^{-8} (P_M)^{0.6}}{\exp(0.0032 \ln^3(P_M) + 0.0069 \ln^2(P_M))}.$$

Независимо от величины сечения выработки, возрастание дебита воздуха влечет за собой уменьшение метановзрывоопасности.

С увеличением площади сечения выработки метановзрывоопасность возрастает, причем при проведении выработок взрывным способом темпы роста выше (рис. 6, 8).

С ростом коэффициента загазованности P_M резко увеличивается метановзрывоопасность, наиболее характерно это выражено при проведении выработок взрывным способом (рис. 13, 14).

Исследования показали, что зависимости метановзрывоопасности от величины метанопритока, дебита воздуха, сечения выработки, близки к экспоненциальному.

Учитывая, что предельно допустимый нормативный уровень метановзрывоопасности 10^{-7} , проведение выработок взрывным способом АГЗ целесообразно применять для метанопритоков до $1.5 \text{ м}^3/\text{мин}$. комбайновую проходку штреков с АГЗ для метанопритоков $2.5-3 \text{ м}^3/\text{мин}$.

На рис.14 представлена зависимость метановзрывоопасности от коэффициента загазованности при взрывных работах - логистическая

кривая с несимметрией:

$$Q(T) = \frac{8 \cdot 10^{-8} (P_M)^{-5.3}}{\exp(0.08 L n^3 (P_M) + 1.4 L n^2 (P_M))}.$$

Проведение выработок сечением 7, 9, 12.1 м² взрывным способом с АГЗ безопасно для пластов с природной метаноносностью до 12 м³/т. Комбайновая проходка выработок сечением 5, 7.1 м² без АГЗ безопасна для пластов с природной метаноносностью до 18 м³/т и с АГЗ более чем до 30 м³/т. Влияние увеличения дебита воздуха на метановзрывоопасность при комбайновой проходке и взрывных работах одинаково. При взрывных работах интенсивность проветривания должна быть не менее 150 м³/мин.

Выводы

1. Ориентируясь на применение математических пакетов DERIVE6.10, MAPLE10.0, МАТЕМАТИКА5.2, MATLAB7.0, разработаны алгоритмы и программы оценки метановзрывоопасности от электрооборудования и взрывных работ.

2. Выполненные на моделях с помощью ЭВМ исследования полностью подтверждают рабочую способность алгоритмов и широкие возможности составленных нами программ.

3. Рабочая методика оценки метановзрывоопасности апробирована на основе данных шахт ОАО "Южкузбассуголь" и "Прокопьевскуголь" и освоена для практического использования в ИВЦ этих ОАО.

4. Методика оценки метановзрывоопасности шахтных технологических систем основана на определении вероятности совместной реализации событий появления взрывоопасной концентрации, возникновения воспламеняющего агента и отказа контрольного процесса.

5. Проведенное моделирование метановзрывоопасности для шахт Кузбасса: "Зыряновская", шахты №12 ОАО "Прокопьевскуголь" показало, что при буровзрывной технологии ведения проходческих работ на пластах с природной метаноносностью более 8 м³/т метановзрывоопасность оценивается вероятностью воспламенения метана, превышающей нормативный предельно допустимый уровень, равный 10⁻⁷.

6. Метановзрывоопасность при комбайновой проходке штреков значительно ниже, чем при взрывном способе проведения (не превышает предельно допустимый нормативный уровень 10⁻⁷ на пластах с метаноносностью 25-30 м³/т).

7. Проведение выработок взрывным способом с АГЗ (автоматической газовой защитой) целесообразно для метанопритоков до 1.5 м³/мин., комбайновая проходка с АГЗ для метанопритоков 2.5 – 3 м³/мин.

8. При взрывных работах интенсивность проветривания должна быть не менее 150 м³/мин.

9. Применение автоматической газовой защиты снижает метановзрывоопасность при проведении штреков примерно на 4 порядка.

10. Применение водораспылительных завес при ведении взрывных работ понижает метановзрывоопасность на 3 порядка.

11. При взрывном способе проходки снижение метанопритока в большей степени влияет на уменьшение метановзрывоопасности, чем соответствующее возрастание притока воздуха.

12. Комбайновая проходка выработок без АГЗ целесообразна для пластов с природной метаноносностью до 18 м³/т и с АГЗ – более чем до 30 м³/т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин А.С. Применение методов теории вероятностей к исследованию некоторых процессов производства. // 4-ая междунар. конф. «Кибернетика и технологии XXI века». Воронеж, 2003. с. 312-323.
2. Сорокин А.С. Алгоритм решения систем уравнений Колмогорова (оценка качества системы). II всероссийская научная конференция "Проектирование научных и инженерных приложений в среде Matlab", М.: 2004 . . с. 389 – 397.
3. Абрамов Ф.А., Тян Р.Б. Методы и алгоритмы централизованного контроля и управления проветриванием шахт. Киев, Наукова Думка, 1973. -331с.
4. Абрамов Ф.А., Тян Р.Б. Применение ЭВМ для расчета вентиляционных сетей и управления проветриванием шахт. В кн. Математические методы и вычислительная техника в горном деле. М., Недра, 1966. -253с.
5. Абрамов Ф.А., Тян Р.Б. Разработка алгоритмов оптимального управления проветриванием шахт. Реферативная информация о законченных работах в Вузах в 1965-1966гг. вып.1, изд. ДПИ, 1967. с. 57.
6. Вылегжсанин В.Н. Алгоритмы прогноза газовыделения в подготовительную выработку. // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых, №5, 1973. с. 23-29.
7. Вылегжсанин В.Н. О математическом моделировании геометрии пластовых месторождений полезных ископаемых. // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. №5, 1972. с.25-28.
8. Грицко Г.И., Вылегжсанин В.Н. О математической модели прогноза эндогенной пожароопасности. // Физико - техн. проблемы разработки полезных ископаемых. №3, 1973. с. 19-22.
9. Мясников А.А., Павлов А.Ф., Казаков С.П. Повышение надежности и эффективности проветрива-

- ния выемочных полей газообильных шахт. ЦНИЭИуголь. М., 1974. с. 14.
10. *Лавцевич В.П.* Исследование и оценка метановзрывоопасности шахтных технологических систем. Дисс. ...докт. техн. наук. Новосибирск, 1974. - 359с.
11. *Сорокин А.С.* Вероятностная оценка временного фактора, необходимого для обеспечения заданного объёма добычи.//Труды ВНИИГидроугля, вып. 26, Новокузнецк, 1972. с. 18 – 21.
12. *Сорокин А.С., Лавцевич В.П., Сорокина М.К., Костовецкий С.П.* Оптимизация технологических схем очистной выемки угля на гидрошахтах Кузбасса, разрабатывающих крутые пласти.//Труды ВНИИГидроугля, вып. 35, Новокузнецк, 1975. с. 8 – 15.
13. *Сорокин А.С., Гонтов А.Е.* Оптимизация технологических схем очистной выемки угля на гидрошахтах Кузбасса, разрабатывающих пологие пласти средней мощности. // Труды ВНИИГидроугля, вып. 37, Новокузнецк, 1977. с. 8 – 15.
14. *Лавцевич В.П., Сорокина М.К.* Оценка метановзрывоопасности подготовительных забоев ЦНИЭИуголь, сб. "Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело", №6, 1974. с.8.
15. *Лавцевич В.П., Сорокина М.К.* Алгоритмы и стохастического моделирования рудничной атмосферы. Информационная карта №44, серия 13. М., 1974.
16. *Лавцевич В.П., Сорокина М.К.* Методическое руководство для расчета метановзрывоопасности шахтных технологических систем. ЦНИЭИуголь. Серия 18, карта № 129. М., 1974.
17. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Физматгиз, 1962. -447с.
18. Краснощеков П.С., Петров А.А. Принципы построения моделей. М.: МГУ, 1983. -264 с.
19. Арис Р. Дискретное динамическое программирование. М., 1969. -87с.
20. Лихтенштейн В.Е. Дискретность и случайность в экономико-математических задачах. М., 1973. -93с.

□Автор статьи:

Сорокин
Андрей Семенович
- канд. физ.-мат.наук, доцент,
ст.н.с. (филиал КузГТУ в г. Новокузнецке)