

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 519.21

А.С.Сорокин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ И МЕТАНОВЗРЫВООПАСНОСТИ ШАХТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Высокое содержание метана в выработках газовых шахт угрожает безопасности условий работы и должно быть меньше нижнего предела взрывчатости метановоздушной смеси (5%). Возникает потребность предпринять меры для предупреждения критических скоплений метана в выработках, их воспламенения и взрывов.

Прежде всего, для этого необходимо исследовать метановзрывоопасность типовых схем проходки выработок различными способами (комбайнами, взрывным способом).

Чтобы оценить влияние взрывных работ и электрооборудования, применения АГЗ (автоматической газовой защиты) на метановзрывоопасность проведено математическое моделирование метановзрывоопасности с помощью алгоритмов и программ [1-3].

§ 1. Постановка задачи

Вопросы математического моделирования рудничной атмосферы находят свое отражение в работах Ф.А.Абрамова, Р.Б.Тяна [4-5], Г.И.Грицко, В.Н.Вылегжанина [6-8], А.Ф. Павлова, А.А. Мясникова, С.П.Казакова [9] и др.

Для определения статических характеристик объекта проветривания по данным активного эксперимента для условий исследований шахт Донбасса Ф.А.Абрамов, Р.Б.Тян [4] применяют методику корреляционного анализа.

В качестве статических характеристик рудничной атмосферы эти авторы принимают значения концентрации метана и дебита воздуха, представляя статическую характеристику объекта проветривания $C=f(Q)$ в виде $C=C_0 + K_{cQ} \cdot Q$, где C_0 - постоянный коэффициент, % CH_4 , K_{cQ} - коэффициент усиления объекта, который равен изменению концентрации метана при переходе из начального состояния в новое установившееся, вызванное единичным скачком дебита воздуха, $\text{мин}/\text{м}^3$. Ими построены алгоритмы управления воздухораспределением в вентиляционной сети, реализованные на ЭВМ, решен ряд топологических задач вентиляционных сетей.

В работе А.А.Мясникова, А.Ф.Павлова, С.П. Казакова [9] исследуются показатели проявлений ненадежности и опасности в угольных шахтах, даются алгоритмы оценки газовой опасности гор-

ных выработок выемочного участка, анализируется надежность и эффективность схем проветривания выемочных полей.

Вопросы моделирования и алгоритмизации процесса газовыделения в подготовительные и очистные выработки рассмотрены В.Н. Вылегжаниным [7]. Построены алгоритмы управления воздухораспределением при развитии горных работ, анализа устойчивости потоко-распределения в сети на квазистатический период состояния ее топологии и алгоритм численного определения надежности воздухораспределения в очистных забоях методом Монте-Карло, рассмотрена задача анализа производственных возможностей действующей шахты по фактору аэробиологии.

Исходя из оценки физической сущности состояния рудничной атмосферы, более естественно считать, что газодинамические переходные процессы в пределах выемочного участка характеризуются не менее чем двумя случайными процессами: изменением дебита воздуха и дебита метана во времени [10-17]. Так как концентрация метана является случайной функцией двух случайных потоков, то возникает необходимость исследования вероятности загазирования рудничной атмосферы в зависимости от статистических характеристик дебитов воздуха и метана. Необходимо выяснить, каким образом изменение среднего дебита воздуха и среднего метанопритока, а также колебания того и другого потоков влияют на появление концентрации метана, превосходящей некоторый предельный (пороговый) уровень η_n .

Для получения достаточно полного представления о состоянии рудничной атмосферы необходимо решить задачи в постановке [16].

1. Исследовать изменения вероятностей загазирования при одновременном увеличении средних значений дебита метана и дебита воздуха.

2. Исследовать поведение вероятностей загазирования при постоянных средних значениях дебита метана и дебита воздуха и возрастании их коэффициента корреляции.

3. Установить изменение вероятностей загазирования в предположениях задачи 1 и при возрастании коэффициента корреляции.

4. Определить влияние изменения коэффици-

ента вариации дебита метана (он возрастает) при постоянном коэффициенте вариации дебита воздуха на вероятность загазирования.

5. Проследить изменение вероятностей загазирования в предположениях задачи 4 и при возрастании коэффициента корреляции.

6. Исследовать влияние изменений коэффициента вариации дебита воздуха при постоянном коэффициенте вариации дебита метана на вероятность загазирования.

7. Исследовать изменение вероятностей загазирования для постоянного среднего метанопритока при возрастающем дебите воздуха, а также для постоянного дебита воздуха при изменяющемся среднем метанопритоке при условии, что величина среднего дебита метана и дебита воздуха не коррелируют ($r=0$).

§ 2. Требования к структуре алгоритмов математической модели рудничной атмосферы

При решении задач моделирования могут быть использованы следующие методы исследования: аналитический метод; численные приближенные методы вычислений с применением вычислительной техники; моделирование на вычислительных машинах непрерывного действия; моделирование на ЭВМ.

Так как в большинстве случаев при моделировании на ЭВМ приходится учитывать или имитировать случайные факторы, то такой метод называют методом стохастического моделирования. При стохастическом моделировании рудничной атмосферы на ЭВМ математическую модель необходимо преобразовать в специальный алгоритм. В соответствии с этим алгоритмом в машинерабатывается информация, описывающая отдельные элементарные явления исследуемого процесса с учетом связей и взаимных влияний этих явлений. В нашем случае первоначальная математическая модель исследуемого процесса допускает численное решение.

Стochasticное моделирование удобно при исследовании случайных процессов. Метод стохастического моделирования на практике реализуется в два этапа.

На первом этапе по имеющимся данным об исследуемом процессе (рудничной атмосфере) составляется моделирующий алгоритм, который служит основой для построения программы работы ЭВМ. На втором этапе моделирующий алгоритм воспроизводится на ЭВМ в виде программы и используется для решения задачи исследования. Алгоритмы стохастических моделей рудничной атмосферы реализованы автором на ЭВМ в математическом пакете DERIVE6.10.

§ 3. Синтез алгоритмов определения вероятности взрывоопасного состояния рудничной атмосферы

Пусть J - средний метаноприток в рудничную атмосферу ($\text{м}^3/\text{мин}$), Q - средний расход воздуха ($\text{м}^3/\text{мин}$) Тогда выражение

$$\eta = J/Q \quad (1)$$

определен концентрацию метана в рудничной атмосфере в относительных единицах.

Система положительных величин (J, Q) подчинена закону распределения с плотностью вероятности $f(J, Q)$. Найдем плотность распределения концентрации метана.

Зададимся некоторым значением η и построим на плоскости (q, i) прямую $\eta = i/q$, причем величины i, q положительные.

Обозначим D область, где $i < \eta q$. (рис.1.)

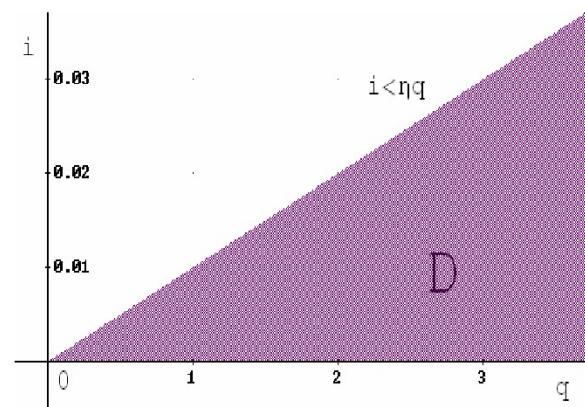


Рис. 1. Область допустимых значений.

Из [15] функция распределения величины η имеет вид

$$H(\eta) = P((J, Q) \subset D) = \iint_D f(i, q) didq = \int_0^\infty dq \int_0^{\eta q} f(i, q) di \quad (2)$$

Дифференцируя (2) по η , получим плотность распределения концентрации метана η

$$h(\eta) = \frac{\partial H}{\partial \eta} \int_0^\infty dq \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\int_0^{\eta q} f(i, q) di \right]. \quad (3)$$

Применяя к выражению в квадратных скобках теорему о дифференцируемости по параметру интеграла, получаем

$$h(\eta) = \int_0^\infty q f(q\eta, q) dq. \quad (4)$$

Отсюда, учитывая, что плотность распределения системы двух величин равна плотности распределения одной из величин, входящих в систему, умноженной на условную плотность распределения другой величины, вычисленной при условии, что первая величина приняла заданное значение [15], имеем

$$h(\eta) = \int_0^\infty q f_1(q\eta) f_{2i}(q) dq. \quad (5)$$

Вероятность появления концентрации метана, превышающей уровень η_n (вероятность загазования), определится из выражения

$$P\{\eta > \eta_n\} = \int_{\eta_n}^{\infty} \int_0^\infty Q f_1(Q\eta) f_{2J}(Q) dQ d\eta. \quad (6)$$

Выражение (6) представляет собой стохастическую модель, которая устанавливает связь между вероятностями появления концентраций метана, превышающих предельное значение η_n и статистическими характеристиками метановоздушных потоков.

Исследованиями ряда авторов установлено, что в большинстве случаев дебита метана хорошо аппроксимируются нормальным законом распределения и лишь при малых метанопритоках выравнивание не дает положительных результатов [17]. Так как величины дебита воздуха и метанопритока могут принимать только положительное значение, то распределение дебитов их может быть лишь усеченым нормальным.

При вычислении вероятности загазования, исходим из предположения, что средний дебит воздуха Q и средний приток метана J имеют распределение по нормальному усеченному закону; обе величины коррелируют с коэффициентом корреляции r .

Расчеты приводились по формуле (6), принимая во внимание, что в ней

$$f_1(Q\eta) = \frac{A_1}{\sqrt{2\pi m_J V_J}} \exp\left(-\frac{(J - m_J)^2}{2m_J^2 V_J^2}\right), \quad (7)$$

$$f_{2J}(Q) = \frac{A_2}{\sqrt{2(1-r^2)m_Q V_Q}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-r^2)} \left(\frac{Q-m_Q}{m_Q V_Q} - r \frac{J-m_J}{m_J V_J} \right)^2\right). \quad (8)$$

Коэффициенты A_1 и A_2 определены из соотношений

$$\frac{1}{A_1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{1}{V_J}}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (9)$$

$$\frac{1}{A_2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\frac{1}{V_Q}}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (10)$$

и задаются в исходной информации к программе своими числовыми значениями.

В формулах (7-10) приняты обозначения:

$m_J = \bar{J}$, $m_Q = \bar{Q}$ - математические ожидания значений метанопритока J и дебита воздуха Q ;

V_J , V_Q - коэффициенты вариации метанопритока и дебита воздуха (J и Q);

$\sigma_J = m_J V_J$, $\sigma_Q = m_Q V_Q$ - среднеквадратичные отклонения метанопритока и дебита воздуха.

Помимо описанной выше модели для исследований применялась модель, предложенная В.П.Лавцевичем и А.С.Сорокиным [10, 11].

Вероятность загазования, т.е. вероятность того, что концентрация метана превысит некоторый предельный уровень η_n , определяется из выражения

$$P\{\eta > \eta_n\} = 1 - \int_0^{\eta_n} f(\eta) d\eta, \quad (11)$$

где для определения плотности распределения концентраций применялась приближенная формула:

$$f(\eta) = \frac{C_J C_Q B_1}{2\sqrt{\pi A_1} \sigma_J \sigma_Q \sqrt{1-r^2}} \exp\left(-\frac{B_1^2}{A_1} - C_1\right), \quad (12)$$

где

$$A_1 = \frac{\eta^2 \sigma_Q^2 - 2r\eta \sigma_J \sigma_Q + \sigma_J^2}{2(1-r^2)\sigma_J^2 \sigma_Q^2}, \quad (13)$$

$$B_1 = \frac{\eta J \sigma_Q^2 - r \sigma_J \sigma_Q (\eta Q + J) + Q \sigma_J^2}{2(1-r^2)\sigma_J^2 \sigma_Q^2}, \quad (14)$$

$$C_1 = \frac{J^2 \sigma_Q^2 - 2rJQ \sigma_J \sigma_Q + Q^2 \sigma_J^2}{2(1-r^2)\sigma_J^2 \sigma_Q^2}. \quad (15)$$

§ 4. Применение методов Монте-Карло при реализации на ЭВМ стохастической модели рудничной атмосферы

К методам Монте-Карло обычно относят численные методы решения математических задач при помощи моделирования случайных величин и статистической оценки их характеристик [18].

Исследуем вопрос о применении метода Монте-Карло для моделирования на ЭВМ рудничной атмосферы. Построим кривую плотности распределения, откладывая по оси ординат значение функции плотности распределения концентрации метана $f(\eta)$, по оси абсцисс - значение концентраций метана η (η_n - пороговое значение равно 0.01).

Таблица 1

$\eta_n = 0.01$					
$J \backslash Q$	0.5	1	2	4	6
0	0.0001	0.0004	0.0025	0.0156	0.0511
0.3	0	0.0001	0.0006	0.0043	0.027
0.8	0	0	0.0002	0.0008	0.0024

Величины метанопритока (J) и дебита воздуха (Q) считаем распределенными по нормальному усеченному закону. Вероятность превышения концентрацией метана предельного (порогового) уровня на графике представлена площадью, ограниченной осью абсцисс, кривой плотности распределения и ординатой, соответствующей $\eta = \eta_n$. Значения вероятностей загазования (J - средний метаноприток в рудничную атмосферу, r - коэффициент корреляции) (рис. 2.).

В табл. 1 приведены значения вероятностей загазования (превышения концентрацией метана порогового уровня) для различных значений метанопритока и корреляционных связей различной тесноты, полученные моделированием на ЭВМ.

В табл. 2 приведены результаты статистических испытаний (число попаданий на 10 000 испытаний) для $\eta < \eta_n$.

Таблица 2

$r \backslash J$	0.5	1	2	4	6
0	9999	9996	9975	9854	9489
0.3	10000	9999	9994	9957	9730
0.8	10000	10000	9998	9992	9976

*Число попаданий на 10000 испытаний для $\eta_n < 0.01$.

Видно, что большая часть площади, ограниченной осями координат, кривой и ординатой $\eta = \eta_n$, представляет собой вероятность появления концентрации метана, меньшей предельного уровня.

Для вероятного состояния загазования η

$> \eta_n$ число попаданий на 10 000 испытаний представлено в табл. 3.

Таблица 3

$r \backslash J$	0.5	1	2	4	6
0	1	4	25	156	511
0.3	0	1	6	43	270
0.8	0	0	2	8	24

*Число попаданий на 10000 испытаний для $\eta_n > 0.01$. (Для вероятного состояния загазирования).

Например, для $J=1 \text{ м}^3/\text{мин}$ и $r=0.3$ на 10000 испытаний приходится лишь одно попадание. Известно, что если нас интересуют события, редко происходящие в реальной системе, они также редко будут происходить в моделирующей системе, и огромный объем вычислений даст мало ценной информации [2].

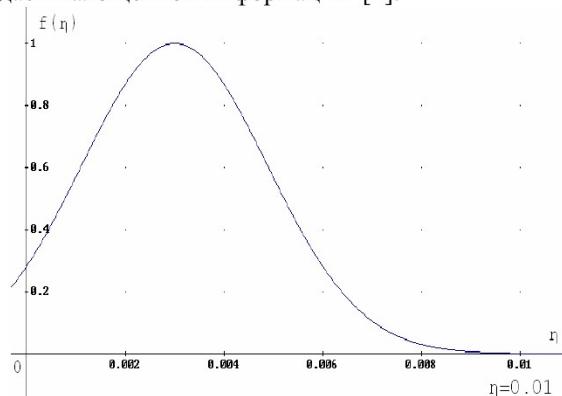


Рис. 2. Плотность распределения концентрации метана. ($\eta_n = 0.01$)

В данном случае выборка оказалась не-

Таблица 4

$\eta_n = 0.01$							
$r = 0$							
J	0.5	1	2	4	6	8	10
V_J	0.65	0.47	0.31	0.21	0.19	0.18	0.17
Q	220	300	420	630	820	1000	1160
V_Q	0.19	0.17	0.14	0.11	0.09	0.075	0.07
$P(\eta > \eta_n)$	0	0	0.003	0.016	0.05	0.108	0.197
	0	-	-	-	-	-	0.198
$r = 0.3$							
J	0.5	1	2	4	6	8	10
V_J	0.65	0.47	0.31	0.21	0.19	0.18	0.17
Q	220	300	420	630	820	1000	1160
V_Q	0.19	0.17	0.14	0.11	0.09	0.075	0.07
$P(\eta > \eta_n)$	0	0	0	0.0043	0.027	0.077	0.165
	0	-	-	-	-	-	0.166
$r = 0.8$							
J	0.5	1	2	4	6	8	10
V_J	0.65	0.47	0.31	0.21	0.19	0.18	0.17
Q	220	300	420	630	820	1000	1160
V_Q	0.19	0.17	0.14	0.11	0.09	0.075	0.07
$P(\eta > \eta_n)$	0	0	0	0.0008	0.002	0.016	0.082
	0	-	-	-	-	-	0.083

Таблица № 5

$$\eta_n = 0.01$$

$r = 0 \quad V_Q = 0.1$ $J = 4 \quad Q=630$		$r = 0 \quad V_Q = 0.1$ $J = 10 \quad Q=1160$		$r = 0 \quad V_Q = 0.1$ $J = 1 \quad Q=300$	
V_J	P	V_J	P	V_J	P
0.05	0	0.05	0.10396	0.05	0
0.1	0.0005	0.1	0.14938	0.1	0
0.15	0.0036	0.15	0.2006	0.15	0
0.2	0.0115	0.2	0.24576	0.2	0
0.3	0.0448	0.3	0.31114	0.3	0.0001
0.4	0.0890	0.4	0.3527	0.4	0.00036
0.5	0.1401	0.5	0.38831	0.5	0.0006
0.6	0.1856	0.6	0.4178	0.6	0.0007
0.7	0.2222	0.7	0.4463	0.7	0.0024
0.8	0.2677	0.8	0.47188	0.8	0.0042

$r = 0.3 \quad V_Q = 0.1$ $J = 4 \quad Q=630$		$r = 0.3 \quad V_Q = 0.1$ $J = 10 \quad Q=1160$		$r = 0.3 \quad V_Q = 0.1$ $J = 1 \quad Q=300$	
V_J	P	V_J	P	V_J	P
0.05	0	0.05	0.057156	0.05	0
0.1	0.0003	0.1	0.10766	0.1	0
0.15	0.0018	0.15	0.1595	0.15	0
0.2	0.00319	0.2	0.21172	0.2	0.000077
0.3	0.0252	0.3	0.29026	0.3	0.0003
0.4	0.0651	0.4	0.33924	0.4	0.0008
0.5	0.1173	0.5	0.37895	0.5	0.0014
0.6	0.1653	0.6	0.41081	0.6	0.0016
0.7	0.2117	0.7	0.44084	0.7	0.0054
0.8	0.2527	0.8	0.46742	0.8	0.0099

представительной, при большом объеме вычислений (10000 расчетов) практически отсутствует информация об исследуемом объекте - рудничной атмосфере. Поэтому для вычислений при моделировании рудничной атмосферы были выбраны другие приближенные методы (в математическом пакете DERIVE6.10 - метод численного интегрирования по Гауссу, в математическом пакете MAPLE10.0 - квадратура по Симпсону).

§ 5. Стохастическое моделирование рудничной атмосферы

Для полного исследования состояния рудничной атмосферы и ее изменений в зависимости от колебаний метанопритока и дебита воздуха, а также тесноты корреляционной связи между ними, модели, разработанные в § 3, алгоритмизированы для реализации их на ЭВМ. Для моделей (6) и (11) для наглядности алгоритма, его строгого представления и облегчения программирования составлены блок-схемы, а по ним программы для ЭВМ. Для реализации на ЭВМ стохастических моделей рудничной атмосферы выбран метод численного интегрирования по Гауссу.

Предпочтение этому методу отдано в связи с быстрой его сходимостью. При многократном проигрывании модели на ЭВМ определены вероятности загазования рудничной атмосфе-

ры для предельной концентрации метана $\eta_n = 0.01$; значениях коэффициента корреляции $r = 0; 0.3; 0.8$; а также при варьировании средних значений метанопритока и дебита воздуха. (см. табл. 4 - 7).

Модель (11) была реализована на ЭВМ и при программировании использован метод численного интегрирования Симпсона в математическом пакете DERIVE6.10 и метод Гаусса в математическом пакете MAPLE10.0.

Результаты моделирования приведены в таблицах № 4 - № 7.

На рис. 3 представлена зависимость вероятности загазования от среднего метанопритока при различных коэффициентах корреляции.

Аналитически эти зависимости изображаются логистическими кривыми с несимметрией.

Таким образом, математические модели вероятности загазования будут иметь следующий вид:

при $r = 0$

$$P = \frac{1}{1 + \frac{2500}{9J^2 - 30J}},$$

при $r = 0.3$

Таблица 6

$$\eta_n = 0.01 ;$$

$r = 0 \quad V_J = 0.2$ $J = 4 \quad Q = 630$		$r = 0 \quad V_J = 0.2$ $J = 10 \quad Q = 1160$		$r = 0 \quad V_J = 0.2$ $J = 1 \quad Q = 300$	
V_Q	P	V_Q	P	V_Q	P
0.05	0.00164	0.05	0.2179	0.05	0
0.1	0.0114	0.1	0.245776	0.1	0.000077
0.15	0.0311	0.15	0.27272	0.15	0.00039
0.2	0.0612	0.2	0.300504	0.2	0.00071
0.3	0.1308	0.3	0.344808	0.3	0.0145
0.4	0.1853	0.4	0.370468	0.4	0.0420
0.5	0.221681	0.5	0.382933	0.5	0.0727
0.6	0.239238	0.6	0.282874	0.6	0.09362
0.7	0.246457	0.7	0.3766	0.7	0.1032
0.8	0.245524	0.8	0.365291	0.8	0.1079

$r = 0.3 \quad V_J = 0.2$ $J = 4 \quad Q = 630$		$r = 0.3 \quad V_J = 0.2$ $J = 10 \quad Q = 1160$		$r = 0.3 \quad V_J = 0.2$ $J = 1 \quad Q = 300$	
V_Q	P	V_Q	P	V_Q	P
0.05	0.00014	0.05	0.18487	0.05	0
0.1	0.00319	0.1	0.21172	0.1	0
0.15	0.0129	0.15	0.238403	0.15	0
0.2	0.0350	0.2	0.266455	0.2	0.00016
0.3	0.1025	0.3	0.321339	0.3	0.0096
0.4	0.1623	0.4	0.35472	0.4	0.0336
0.5	0.2048	0.5	0.37191	0.5	0.0636
0.6	0.2254	0.6	0.37472	0.6	0.084479
0.7	0.2354	0.7	0.3702991	0.7	0.0955
0.8	0.2365	0.8	0.360162	0.8	0.1011

$$P = \frac{1}{1 + \frac{10000}{37J^2 - 160J}},$$

при $r = 0.8$

$$P = \frac{1}{1 + \frac{5000}{9J^2 - 50J}}.$$

На рис. 4 представлена зависимость вероятности загазирования от среднего метанопритока и коэффициента корреляции. Аналитически эта зависимость изображается логистической поверхностью с несимметрией.

Таким образом, математическая модель вероятности загазирования будет иметь вид:

$$P = \frac{1}{1 + \frac{2500}{10J^2 - 6J^2 r + 9r - 35}}.$$

На рис. 6 представлена зависимость вероятности загазирования от степени изменчивости метанопритока. Аналитически эти зависимости изображаются логистическими кривыми с несимметрией.

Таким образом, математические модели вероятности загазирования будут иметь следующий вид.

Для I (при $J=10, V_Q=0.1$)

$$P = \frac{1}{1 + \frac{50}{10V_J^2 + 61V_J}},$$

Для II (при $J=4, V_Q=0.1$)

$$P = \frac{1}{1 + \frac{100}{42V_J^2 + 11V_J}},$$

Для III (при $J=1, V_Q=0.1$)

$$P = \frac{1}{1 + \frac{1000}{67V_J^2 - 30V_J}}.$$

На рис. 5 представлена зависимость вероятности загазирования от степени изменчивости дебита воздуха. Аналитически эти зависимости изображаются логистическими кривыми с несимметрией.

Таким образом, математические модели вероятности загазирования будут иметь следующий вид.

Для I (при $J=10, Q=1160, V_J = 0.2$)

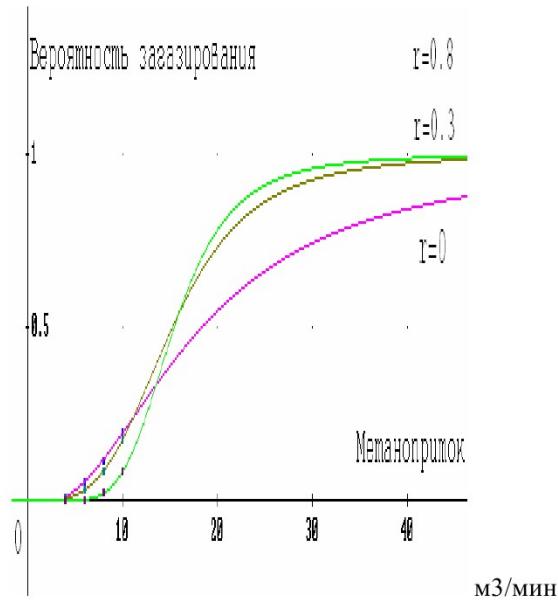


Рис.3. Вероятность загазирования в зависимости от среднего метанопритока (r -коэффициент корреляции).

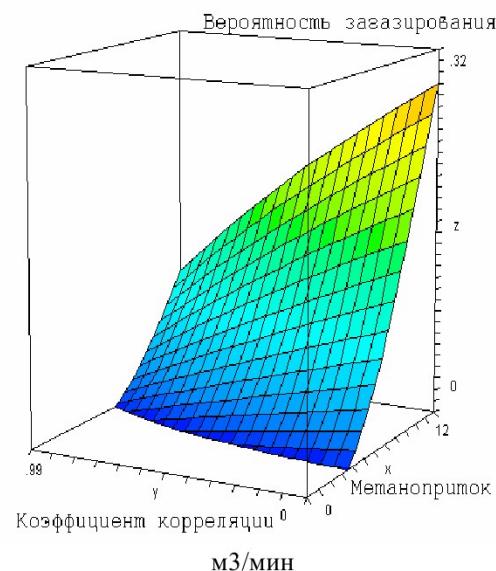


Рис. 4. Вероятность загазирования в зависимости от среднего метанопритока и от коэффициента корреляции.

$$P = \frac{1}{1 + \frac{50}{V_Q^2 + 51V_Q}}.$$

Для II (при $J=4$, $Q=630$, $V_J=0.2$)

$$P = \frac{1}{1 + \frac{100}{42V_Q^2 + 11V_Q}}.$$

Для III (при $J=1$, $Q=300$, $V_J=0.2$)

$$P = \frac{1}{1 + \frac{1000}{67V_Q^2 - 3V_Q}}.$$

В табл. 4 показаны значения вероятностей загазирования для различных величин метанопритока и дебита воздуха и изменяющихся корреляционных связях. Например, при $J=4$; $V_J=0.21$; $Q=630$; $V_Q=0.11$ и $r=0$ имеем вероятность загазирования 0.0157, а для тех же значений метанопритока и дебита воздуха при $r=0.3$ вероятность загазирования будет 0.0043.

Отсюда вывод: при прочих равных условиях с возрастанием тесноты корреляционной связи резко падает вероятность загазирования (см. табл. 4).

В табл. 5 приводятся результаты моделирования случаев, когда при постоянном дебите воздуха и его постоянных статистических параметрах изменяется коэффициент вариации метанопритока. На основе полученных результатов можно утверждать, что возрастание вариации метано-

притока влечет за собой рост вероятности загазирования.

Результаты влияния вариации среднего воздушного потока на вероятность загазирования рудничной атмосферы видны из табл. 6. Проведя сравнительный анализ полученных результатов моделирования (табл. 5 и 6), можно сделать выводы о степени влияния вариаций метанопритока и дебита воздуха на вероятность загазирования рудничной атмосферы.

Из анализа данных табл. 7 можно судить о влиянии возрастающего среднего метанопритока при постоянном дебите воздуха, и возрастающего дебита воздуха при постоянном метанопритоке на вероятность превышения концентрацией метана порогового уровня, то есть вероятность загазирования. Графически результаты моделирования, приведенные в таблицах № 4 – № 7 представлены на рис. 3, 4.

При моделировании на ЭВМ было рассмотрено более 250 различных состояний рудничной атмосферы. В определенной последовательности подвергались изменением в различных сочетаниях значения среднего метанопритока, дебита воздуха и их коэффициентов вариации, а также коэффициента корреляции. Основываясь на результатах моделирования, можно утверждать следующее.

I. При постоянных средних значениях дебита воздуха и метанопритока и их статистических характеристиках увеличение корреляционной зависимости (возрастание коэффициента корреляции) между ними влечет за собой существенное уменьшение вероятности загазирования (рис. 5, табл. 4).

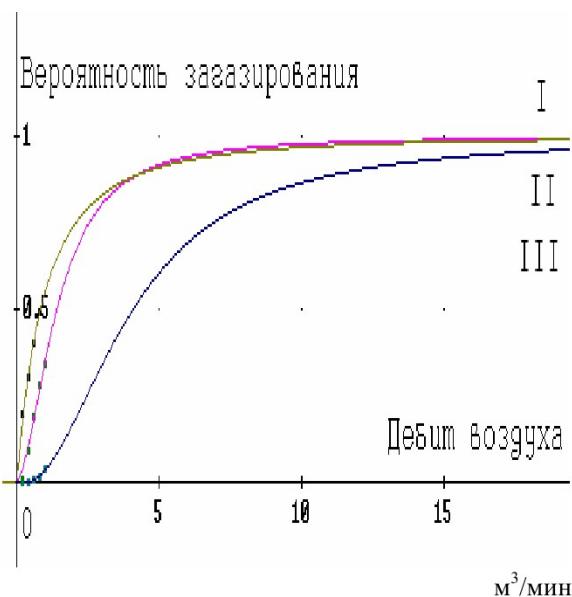


Рис. 5. Изменение вероятности загазирования в зависимости от степени изменчивости дебита воздуха.

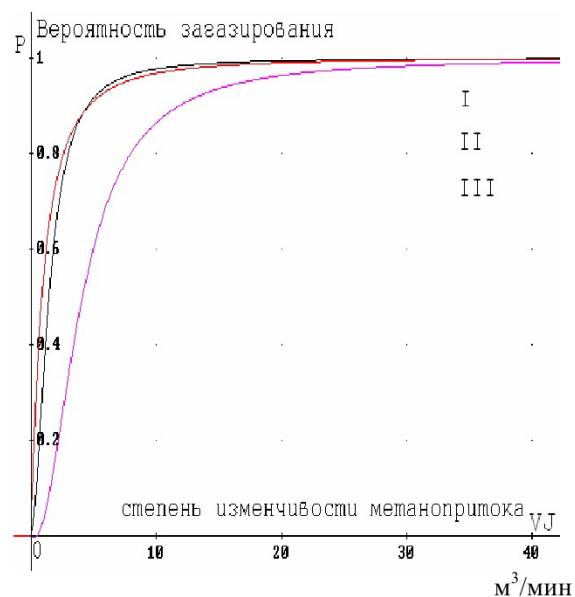


Рис. 6. Изменение вероятности загазирования в зависимости от степени изменчивости метанопритока.

2. Вероятность загазирования возрастает при одновременном возрастании средних значений дебита воздуха и метанопритока и одновременном уменьшении их коэффициентов вариации (рис. 6, табл. 4).

3. При одновременном возрастании средних значений дебита воздуха и метанопритока и одновременном уменьшении их коэффициентов вариации, а также при увеличении коэффициента корреляции вероятность опасного состояния уменьшается.

4. При постоянных средних значениях метанопритока, дебита воздуха и коэффициента вариации дебита воздуха увеличение коэффициента вариации метанопритока влечет за собой возрастание вероятности загазирования (табл. 5).

5. Вероятность опасного состояния рудничной атмосферы убывает незначительно при постоянных средних значениях метанопритока, дебита воздуха и их статистических характеристиках и возрастании коэффициента корреляции (табл. 5).

6. Увеличение коэффициента вариации дебита воздуха при постоянных значениях средних значений метанопритока, его коэффициента вариации и дебита воздуха влечет за собой постепенное возрастание вероятности загазирования (табл. 6).

7. Вероятность загазирования убывает с возрастанием притока воздуха при постоянном среднем метанопритоке и его статистических характеристиках.

8. При постоянном дебите воздуха и его статистических характеристиках возрастание метанопритока приводит к резкому возрастанию вероятности взрывоопасного состояния рудничной атмосферы (табл. 7).

Сравнение результатов моделирования на двух моделях (6) и (11) при одинаковых исходных значениях метанопритока, дебита воздуха и их статистических характеристиках показало, что они отличаются лишь четвертым или пятым знаком после запятой. Это практически не влияет на восприятие результата и дает возможность

Таблица 7

$$\eta_n = 0.01 ; r=0$$

$J=10, V_J=0.17$			$J=4, V_J=0.21$		
Q	V_O	P	Q	V_O	P
580	0.11	0.9896362	315	0.16	0.8071789
928	0.08	0.65097	504	0.125	0.0814838
1044	0.075	0.4069949	567	0.115	0.057921
1160	0.07	0.1976581	630	0.11	0.01710754
1276	0.07	0.0759203	693	0.1	0.0054582
1392	0.07	0.0225076	756	0.08	0.004002
1740	0.07	0.003481	945	0.08	0.00374581

Таблица 7 (продолжение)

Q=1160, $V_Q = 0.07$			Q=630, $V_Q = 0.11$		
J	V_J	P	J	V_J	P
5	0.2	0.00496170	2	0.31	0.001855
8	0.18	0.1446798	3.2	0.25	0.0037768
9	0.175	0.07091536	3.6	0.23	0.0085087
10	0.17	0.1976581	4	0.21	0.01710754
11	0.17	0.384103	4.4	0.205	0.04719249
12	0.17	0.5721767	4.8	0.2	0.1023606
15	0.17	0.8980283	6	0.19	0.4108691

говорить о правомерности применения обеих моделей для исследования состояния рудничной атмосферы.

Выводы

1. Разработана и принята в качестве объекта исследования математическая модель рудничной атмосферы, позволяющая для любых значений метанопритока и дебита воздуха, а также любой тесноты корреляционной связи этих потоков, определить вероятность превышения концентрацией метана порогового уровня (η_n).

2. Созданы программы для реализации алгоритмов математической модели рудничной атмосферы для ЭВМ.

3. Основываясь на результатах моделирования (табл. 1 - 4), получены такие зависимости:

а) вероятность загазирования возрастает с возрастанием метанопритока весьма резко, темпы нарастания тем больше, чем слабее

корреляционная связь между дебитом метана и расходом воздуха;

б) на изменение вероятностей появления высокой концентрации метана колебание расхода воздуха оказывает более существенное влияние, чем изменчивость метанопритока;

в) с возрастанием количества метана вероятность загазирования при постоянном притоке воздуха резко возрастает;

г) с возрастанием среднего дебита воздуха вероятность загазирования резко падает при постоянном среднем метанопритоке;

д) на снижение вероятности загазирования более существенное влияние оказывает увеличение среднего расхода воздуха, нежели уменьшение средней величины метанопритока.

4. Моделирование на ЭВМ с помощью методов Монте-Карло не дает удовлетворительных результатов при реализации модели, определяющей превышение концентрацией метана порогового уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокин А.С. Математическое моделирование метановзрывоопасности шахтных технологических систем // Вестн. КузГТУ. №2, Кемерово, 2007. с. 3-15.
2. 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.
3. 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.
4. Абрамов Ф.А., Тян Р.Б. Методы и алгоритмы централизованного контроля и управления проветриванием шахт. -Киев, Наукова Думка, 1973. -331с.
5. 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
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 разр. полезных ископаемых. №3, 1973. с. 19-22.
9. Мясников А.А., Павлов А.Ф., Казаков С.П. Повышение надежности и эффективности проветривания 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., Гонцов 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 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. Жаблон К., Симон Ж.-К. Применение ЭВМ для численного моделирования в физике. М., 1983. – 236с.
19. Березин И.С., Жидков Н.Г. Методы вычислений. Том 1. М.: Физматгиз, 1974. -464с.
20. Основы современных компьютерных технологий. Под ред. Хомененко А.Д. СПб., 1998. - 446 с.

Автор статьи:

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