

## НОВЫЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 622.44:681.518.3

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ГАЗОВОЙ ЗАЩИТЫ

Л. А. Авдеев, И. В. Брейдо

*Карагандинский государственный технический университет,  
Бульвар Мира, 56, 100027, г. Караганда, Республика Казахстан*

Действующие Правила безопасности не учитывают динамику аэрогазовых режимов и их вероятностный характер, что приводит к тому, что возможности современных систем аэрогазового контроля на угольных шахтах используются в недостаточной степени. Предложены методы принятия решений с использованием статистических фильтров, основанные на оценке амплитуды и длительности выбросов. Определены зависимости для расчета рациональных интервалов дискретности опроса датчиков метана.

*Автоматизированные системы газовой защиты, статистические фильтры, амплитуда и длительность выбросов, двухпороговые элементы, интервалы опроса датчиков*

Эксплуатируемые в настоящее время на угольных шахтах автоматизированные системы контроля рудничной атмосферы на основе современных программно-аппаратных средств автоматизации обеспечивают непрерывный мониторинг состояния технологической среды, обработку и хранение значительных объемов информации.

В то же время возможности этих систем используются в недостаточной степени из-за детерминированных норм действующих Правил безопасности (ПБ), не учитывающих динамику аэрогазовых режимов и их вероятностный характер.

В [1] показано, что вероятность появления угрожающей ситуации пропорциональна площади выброса превышения процесса  $c(t)$ , в связи с чем идеальный метод принятия решения о срабатывании системы может быть основан на оценке величины этой площади, реализуемой с помощью непрерывного интегрирующего статистического фильтра (СФ).

Возможны и другие методы, основанные, например, на оценке амплитуды и длительности выброса или только его длительности, осуществляемые с помощью дискретных СФ, построенных на базе однотипных пороговых элементов и реле времени с различными настройками порогов и выдержек времени.

Принцип построения такого дискретного СФ иллюстрирует рис. 1. Вся область возможных ситуаций в интервале значений концентрации метана в защищаемой выработке от  $c_{\text{доп}}$  до  $c_{\text{пр}}$  разбивается на ряд подобластей. Для каждой подобласти устанавливается свой таймер с соот-

ветствующим пороговым элементом. Например, если  $c_{\text{доп}} < c < c_{\text{II}}$ , то срабатывает первая группа контактов с порогом  $c_{\text{доп}}$  и выдержкой времени на срабатывание  $\tau_P = \tau_0$ ; если  $c_{\text{II}} < c < c_{\text{III}}$ , то дополнительно срабатывает вторая группа контактов с порогом  $c_{\text{II}}$  и выдержкой  $\tau_P = \tau_1$  и т. д.

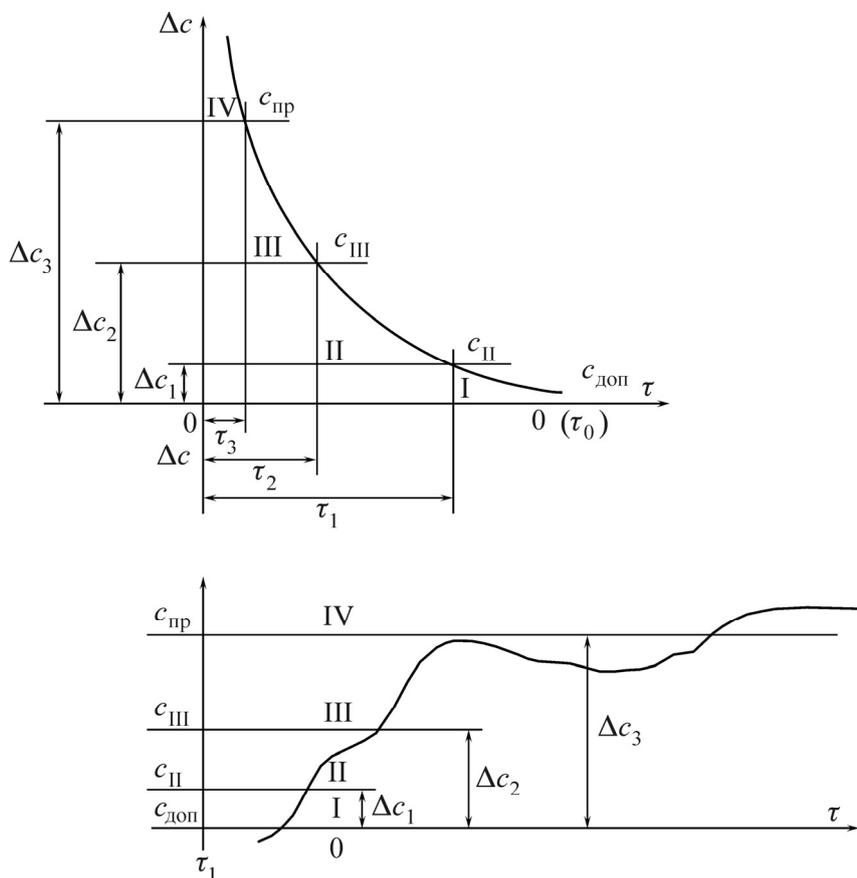


Рис. 1. Области настроек дискретной многопороговой защиты

Ввиду сравнительно небольшого диапазона изменения концентрации метана в интервале от  $c_{\text{доп}}$  до  $c_{\text{пр}}$ , практический интерес представляет двухпороговый вариант дискретного СФ, состоящего из порогового элемента на уровне  $c_{\text{доп}}$  с выдержкой времени на отключение и второго порогового элемента, обеспечивающего мгновенное срабатывание на уровне  $c_{\text{пр}}$ .

Для сравнения дискретных СФ с идеальным интегратором необходимы объективные критерии, которые могут быть получены на основании следующих рассуждений.

Любой метод вероятностной защиты характеризуется тем, что не позволяет избежать как ложных срабатываний защиты (исключений выбросов с площадью, меньшей  $S_{\text{кр}}$ ), так и опасных несрабатываний защиты (исключений опасных выбросов с площадью, большей  $S_{\text{кр}}$ ).

В первом случае срабатывание защиты приведет к уменьшению производительности технологического участка, во втором — несрабатывание защиты понижает уровень безопасности ведения горных работ.

В соответствии с этим эффективность вероятностной защиты предлагается оценивать с помощью соответствующего коэффициента:

$$K_3 = 1 - (n_{\text{лс}} + n_{\text{он}})n_0^{-1}, \quad (1)$$

где  $n_{\text{лс}}$  — количество ложных срабатываний защиты (отключений при выбросах превышения с площадью, меньшей  $S_{\text{кр}}$ );  $n_{\text{он}}$  — количество опасных неотключений (пропущенных при выбросах с площадью, большей  $S_{\text{кр}}$ );  $n_0$  — общее количество выбросов превышения.

При принятых ранее допущениях

$$n_0 = (\sqrt{2\pi})^{-1} \alpha_c \exp(-\gamma^2 / 2). \quad (2)$$

Так как величина  $K_3$  учитывает только количество выбросов, дополнительно введем еще коэффициент для учета простоев по фактору газовыделения при различных способах защиты — коэффициент простоев:

$$K_{\Pi} = 1 - T_3(T_{\Sigma})^{-1}, \quad (3)$$

где  $T_{\Sigma}$  — суммарное время простоев по фактору газовыделения при защите без выдержки времени;  $T_3$  — суммарное время простоев, предотвращенных при вероятностной защите с различными фильтрами.

Из зависимости (1) следует, что у интегрирующего СФ  $K_3 = 1$ . В случае двухпорогового СФ  $n_{\text{лс}}$  складывается из выбросов, у которых  $S_{\text{в}} < S_{\text{кр}} < \tau_{\text{в}} > \tau_{\text{кр}}$  и  $\Delta c_{\text{в}} < \Delta c_{\text{пр}}$  ( $\Delta c_{\text{пр}} = c_{\text{пр}} - c_{\text{доп}}$ ), а  $n_{\text{он}}$  соответствует количеству выбросов, для которых

$$S_{\text{в}} > S_{\text{кр}}, \quad \tau_{\text{в}} < \tau_{\text{кр}} \quad \text{и} \quad \Delta c_{\text{в}} < \Delta c_{\text{пр}}.$$

Для установления зависимости  $K_3$  двухпорогового СФ от различных значений уставок  $S_{\text{кр}}$ ,  $\tau_{\text{кр}}$  и  $c_{\text{пр}}$  в рамках принятых допущений необходимо иметь совместный закон распределения выбросов по параметрам  $S_{\text{в}}$ ,  $\tau_{\text{в}}$  и  $\Delta c_{\text{в}}$ . В связи со сложностью получения аналитических зависимостей для  $K_{\Pi}$ , сравнительный анализ по этому критерию выполнен методом статистического моделирования. При этом одновременно определялись и значения  $K_3$ .

Сравнительный анализ интегрирующих и дискретных СФ позволяет сделать следующие выводы:

1) зависимость  $K_3$  от  $\tau_{\text{кр}}$  дискретных СФ имеет явно выраженный максимум, амплитуда которого на 15–25 % меньше, чем  $K_3$  интегрирующего СФ;

2) оптимальное значение  $\tau_{\text{кр}}^0$ , соответствующее  $K_3^{\text{max}}$  дискретных СФ, уменьшается с уменьшением  $S_{\text{кр}}$  и увеличением  $\alpha_c$ ;

3) добавление второго повышенного порога мгновенного срабатывания практически мало влияет на эффективность дискретных СФ. Этот порог может служить в основном для повышения общей надежности СФ при условии, если он выполнен в схемном и конструктивном отношении, не зависимым от нижнего порога с выдержкой времени;

4) продолжительность простоев из-за срабатывания обычной газовой защиты в 1.5–2 раза больше, чем при вероятностной автоматической газовой защите (АГЗ), имеющей СФ;

5) значения  $K_{\Pi}$  интегрирующего и дискретных СФ одинаковы при оптимальной выдержке времени дискретных СФ;

6) повышение выдержки времени срабатывания  $\tau_{\text{кр}}$  у дискретных СФ приводит к сокращению простоев, однако при этом резко возрастает количество пропущенных (неотключаемых) опасных выбросов;

7) для оптимальной настройки интегрирующего СФ необходимо иметь лишь два параметра, в то время как для дискретных СФ следует дополнительно провести расчет оптимальной выдержки  $\tau_{\text{ср}}^0$ .

Полученные выводы свидетельствуют о том, что интегрирующий СФ ненамного эффективнее дискретных СФ, в отношении технической реализации на базе специализированных контроллеров они равноценны по надежности.

В связи с наличием у обоих вариантов СФ элемента выдержки времени, обеспечить простыми средствами автоматический самоконтроль устройства при отказах типа “обрыв” или “короткое замыкание” не удастся.

На первом этапе освоения вероятностной защиты целесообразно ограничиться установкой заранее рассчитанной выдержки времени в локальные контроллеры. В дальнейшем возможен расчет параметров защиты в поверхностном диспетчерском вычислительном комплексе с использованием базы данных о значениях концентрации метана для каждого объекта, что значительно повысит эффективность и безопасность производства.

Принцип вероятностной автоматической газовой защиты обеспечивает не только совершенствование методов и средств автоматического газового контроля и защиты.

Наличие СФ в аппаратуре автоматической газовой защиты, который исключает отключение электроэнергии при выбросах, обусловленных высокочастотной составляющей процессов  $c(t)$  и  $Q(t)$ , т. е. во время переходных процессов, значительно упрощает задачу автоматической стабилизации концентрации на исходящей благодаря снижению требуемого быстродействия системы регулирования. При оперативном безопасном управлении вероятностная защита необходима также для предотвращения неоправданных отключений в периоды прогнозирования выбросов, предшествующих очередному акту резкой “продувки” выработанного пространства.

Рассмотрим двумерную плотность распределения нарушений уставок аварийной защиты. При допущениях, принятых в [2],  $\tau_{\text{в}}$  и  $S_{\text{в}}$  являются функциями соответственно первой и второй производной процесса на уровне  $c_{\text{д}}$  [3]:

$$\tau_{\text{в}} = -2\dot{c}(\ddot{c})^{-1}; \quad S_{\text{в}} = \dot{c}^3(3\ddot{c}^2)^{-1}. \tag{4}$$

При этом первая  $\dot{c}$  и вторая  $\ddot{c}$  — производные случайного процесса  $c(t)$  — не коррелированы между собой в совпадающие моменты времени, следовательно:

$$\omega(\dot{c}/c_{\text{д}}, \ddot{c}/c_{\text{д}}) = \omega(\dot{c}/c_{\text{д}})\omega(\ddot{c}/c_{\text{д}}), \tag{5}$$

где, как известно,

$$\omega(\dot{c}/c_{\text{д}}) = \frac{\dot{c}}{R_2\sigma_c^2} \exp\left(-\frac{\dot{c}^2}{2R_2\sigma_c^2}\right), \tag{6}$$

$$\omega(\ddot{c}/c_{\text{д}}) = \left\{\sigma_c\sqrt{2\pi(R_4 - R_2^2)}\right\}^{-1} \exp\left[\frac{(\ddot{c} + R_2b)^2}{2\sigma_c^2(R_4 - R_2)^2}\right]. \tag{7}$$

Обратные функции  $\dot{c} = \varphi_1(\tau_{\text{в}}, S_{\text{в}})$  и  $\ddot{c} = \varphi_2(\tau_{\text{в}}, S_{\text{в}})$  имеют с учетом (4) следующий вид:

$$\dot{c} = \frac{6S_{\text{в}}}{\tau_{\text{в}}^2}, \quad \ddot{c} = -\frac{12S_{\text{в}}}{\tau_{\text{в}}^3}. \tag{8}$$

При параболической аппроксимации выбросов процесса  $c(t)$ , когда  $\dot{c} > 0$ , а  $\ddot{c} < 0$ , функции (4) и (8) соответственно взаимнооднозначны:

$$\omega(\tau_B, S_B) = J(\tau_B, S_B) \omega(\dot{c}/c_d, \ddot{c}/c_d), \quad (9)$$

где  $J(\tau_B, S_B)$  — якобиан преобразования переменных  $\dot{c}$  и  $\ddot{c}$  в переменные  $\tau_B$  и  $S_B$ :

$$J(\tau_B, S_B) = \frac{\partial(\dot{c}/c_d, \ddot{c}/c_d)}{\partial(\tau_B, S_B)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \dot{c}}{\partial S_B} & \frac{\partial \dot{c}}{\partial \tau_B} \\ \frac{\partial \ddot{c}}{\partial S_B} & \frac{\partial \ddot{c}}{\partial \tau_B} \end{vmatrix}. \quad (10)$$

Учитывая (8), получаем

$$J(\tau_B, S_B) = 72 S_B (\tau_B)^{-1}. \quad (11)$$

Выполняя в (9) замену переменных и учитывая зависимости (5)–(7) и (11), находим окончательно:

$$\omega(\tau_B, S_B) = A \frac{S_B}{\tau_B^2} \exp\left(-\frac{BS_B^2 + CS_B^2 \tau^2 + D\tau_B^2 - E\tau_B^3 S_B}{M\tau_B^6}\right), \quad (12)$$

где  $A = \frac{432}{\sigma_c^2 R_2 \sqrt{2\pi\sigma_c^2 (R_4 - R_2^2)}}$ ;  $B = 144R_2$ ;  $C = 36(R_4 - R_2^2)$ ;  $D = R_2^2 B^2$ ;  $E = 24R_2^2$ ;

$$M = 2\sigma_c^2 R_2 (R_4 - R_2^2); \quad R_2 = \frac{\int_0^\infty \omega^2 S_c(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S_c(\omega) d\omega} = 2\alpha_c^2; \quad R_4 = \frac{\int_0^\infty \omega^4 S_c(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S_c(\omega) d\omega} = 12\alpha_c^4.$$

Используя соотношение между  $S_B$ ,  $\tau_B$  и  $c$  и величинами  $\dot{c}$  и  $\ddot{c}$ , получаем на основании (4), а также связи между  $\Delta c$  и  $\dot{c}$ ,  $\ddot{c}$ :

$$\Delta c = -\frac{\dot{c}^2}{2\ddot{c}}. \quad (13)$$

Из (4) и (13) устанавливаем, что амплитуда  $\Delta c$  выброса связана с его площадью  $S_B$  и длительностью  $\tau_B$  детерминированной функциональной зависимостью

$$\Delta c = 1.5 \frac{S_B}{\tau_B}. \quad (14)$$

Благодаря этому обстоятельству, можно, не имея трехмерного закона совместного распределения  $S_B$ ,  $\tau_B$  и  $\Delta c$ , определять интересующие нас значения  $n_{лс}$  и  $n_{он}$  с помощью найденного двумерного закона совместного распределения  $\omega(\tau_B, S_B)$  при соответствующем подборе пределов и двукратном интегрировании по  $S_B$  и  $\tau_B$  с учетом (14). С этой целью рассмотрим соответствующие области интегрирования.

Исследуем сначала случай, когда

$$\tau_{ср} = \tau_{в.кр} = 1.5 S_{в.пр} (\Delta c_{пр})^{-1}. \quad (15)$$

Зависимость (15) означает, что время срабатывания  $\tau_{ср}$  мы приняли с таким расчетом, чтобы оно соответствовало длительности выброса, имеющего предельную площадь  $S_{пр}$  и предельно допустимую амплитуду  $\Delta c_{пр}$ .

Рассмотрим теперь рис. 2а, на котором приведены соответствующие этому случаю области интегрирования. Область I соответствует выбросам с площадью, большей  $S_{пр}$ , и временем,

меньшим  $\tau_{\text{ср}}$ . Из формул (14) и (15) следует, что в этом случае всегда  $\Delta c \geq \Delta c_{\text{пр}}$ . Если принять однопороговый СФ с фиксированной, заранее выбранной выдержкой времени  $\tau_{\text{ср}} = \tau_{\text{в.пр}}$ , то область I будет соответствовать опасным неотключенным выбросам, число которых равно

$$n_{\text{он}} = n_0 \int_{\tau_{\text{в.пр}}}^{\tau_{\text{ср}}} \int_{S_{\text{пр}}}^{\varphi(\tau_{\text{в}})} \omega(\tau_{\text{в}}, S_{\text{в}}) dS_{\text{в}} d\tau_{\text{в}}. \quad (16)$$

В случае двухпорогового СФ отключение выбросов, принадлежащих этой области, произойдет уже не за счет реле времени, а за счет порогового элемента, отключающего АГЗ мгновенно при  $\Delta c = \Delta c_{\text{пр}}$ .

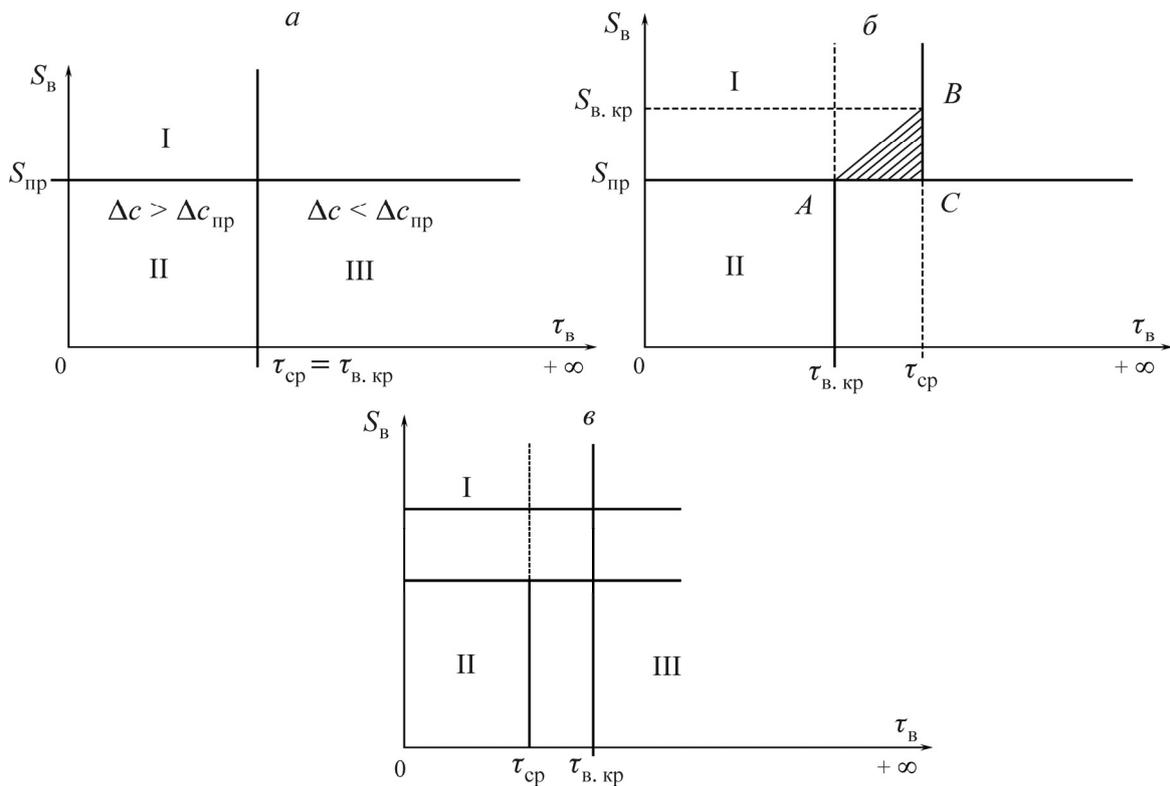


Рис. 2. Области интегрирования СФ

Область II соответствует маловероятным выбросам, у которых амплитуда может иногда достичь второго порога ( $\Delta c_{\text{пр}}$ ), хотя площадь  $S_{\text{в}} < S_{\text{пр}}$ .

В соответствии с выражением (15) вероятность появления таких выбросов меньше 5 %, но и в этом случае они отключаются рассматриваемым СФ с помощью второго порогового элемента. Область III соответствует ложноотключаемым неопасным выбросам, у которых  $S_{\text{в}} < S_{\text{пр}}$ ,  $\tau_{\text{в}} > \tau_{\text{ср}}$ ,  $\Delta c < \Delta c_{\text{пр}}$ . Последнее неравенство вытекает непосредственно из формул (14) и (15).

Следовательно, если принять для рассматриваемого СФ  $\tau_{\text{ср}} = \tau_{\text{пр}}$ , то из выполненного анализа следует, что

$$n_{\text{от}} = 0, \quad n_{\text{лс}} = n_0 \int_{\tau_{\text{в.пр}}}^{\infty} \int_0^{S_{\text{пр}}} \omega(\tau_{\text{в}}, S_{\text{в}}) dS_{\text{в}} d\tau_{\text{в}}. \quad (17)$$

Рассмотрим теперь случай, когда  $\tau_{\text{ср}} > \tau_{\text{пр}}$  (рис. 2б); здесь

$$S_{\text{в.кр}} = \frac{\Delta c_{\text{пр}}}{1.5} \tau_{\text{ср}}. \quad (18)$$

При этом условии заштрихованная область соответствует опасно неотключаемым выбросам. Прямая  $AB$  соответствует границе, на которой  $\Delta c = \Delta c_{\text{пр}}$ . Все выбросы, соответствующие области, расположенной выше этой линии, имеют амплитуду  $\Delta c > \Delta c_{\text{пр}}$ . Следовательно, рассматриваемый упрощенный СФ срабатывает, хотя  $\tau_{\text{в}} < \tau_{\text{ср}}$ .

Все выбросы, соответствующие области, расположенной в треугольнике  $ABC$ , как это видно из рис. 2б и формул (14) и (15), хотя и являются опасными, не приведут к срабатыванию, так как у них  $\tau_{\text{в}} < \tau_{\text{ср}}$  и  $\Delta c > \Delta c_{\text{пр}}$ . Значит, область интегрирования  $ABC$  соответствует опасным неотключаемым выбросам, количество которых определяется из формулы (16), в которой  $\varphi(\tau_{\text{в}})$  — уравнение прямой, проходящей через точки  $A$  и  $B$ . С учетом (15) и (18) всегда  $\Delta c \geq \Delta c_{\text{пр}}$ . Что касается отключаемых неопасных выбросов, то их количество меньше, чем в рассмотренном выше случае, и составляет

$$n_{\text{лс}} = n_0 \int_{\tau_{\text{ср}}}^{\infty} \int_0^{S_{\text{пр}}} \omega(\tau_{\text{в}}, S_{\text{в}}) dS_{\text{в}} d\tau_{\text{в}}. \quad (19)$$

Рассмотрим последний случай, когда  $\tau_{\text{ср}} < \tau_{\text{в пр}}$ . Из рис. 2в непосредственно следует, что  $n_{\text{он}} = 0$ , а количество отключаемых неопасных выбросов больше, чем в рассмотренных выше случаях:

$$n_{\text{лс}} = n_0 \int_0^{\tau_{\text{ср}}} \int_0^{S_{\text{пр}}} \omega(\tau_{\text{в}}, S_{\text{в}}) dS_{\text{в}} d\tau_{\text{в}}. \quad (20)$$

Выбор рационального интервала  $T_0$  дискретности имеет принципиально важное значение, поскольку чем он больше, тем больше датчиков можно успеть опросить за один цикл, но с другой стороны, при этом увеличивается вероятность несвоевременного обнаружения недопустимого превышения концентрации метана предельных значений.

Исследуем подробнее этот вопрос для АГЗ с двухпороговым СФ (рис. 3).

Допустим, что в момент  $t_0$  процесс  $c(t)$  вырастает линейно со скоростью  $\dot{c}(t)$  (на уровне  $c_{\text{доп}}$ ) и достигнет через  $\tau_{\text{в}}$  предельного значения  $c_{\text{пр}}$ .

Чем больше  $\dot{c}(t)$ , тем меньше  $\tau_{\text{в}}$  при данном значении  $\Delta c_{\text{пр}}$ . Естественно, что в системе циклического опроса всегда имеется определенная вероятность несвоевременного обнаружения недопустимого превышения. Эта вероятность будет тем меньше, чем меньше  $T_0$ .

Если задаться допустимым превышением  $\varepsilon c_{\text{пр}}$  ( $\varepsilon \ll 1$ ), обусловленным дискретностью опроса, то из рис. 3 следует очевидное соотношение для максимально допустимого значения  $T_{0\text{max}}$ :

$$T_{0\text{max}} = \frac{\varepsilon c_{\text{пр}}}{\dot{c}(t)_{\text{max}}}, \quad (21)$$

где  $\dot{c}(t)_{\text{max}}$  — максимально ожидаемое для данных горно-геологических и производственно-технических условий значение скорости нарастания концентрации метана на уровне  $c_{\text{доп}}$ .

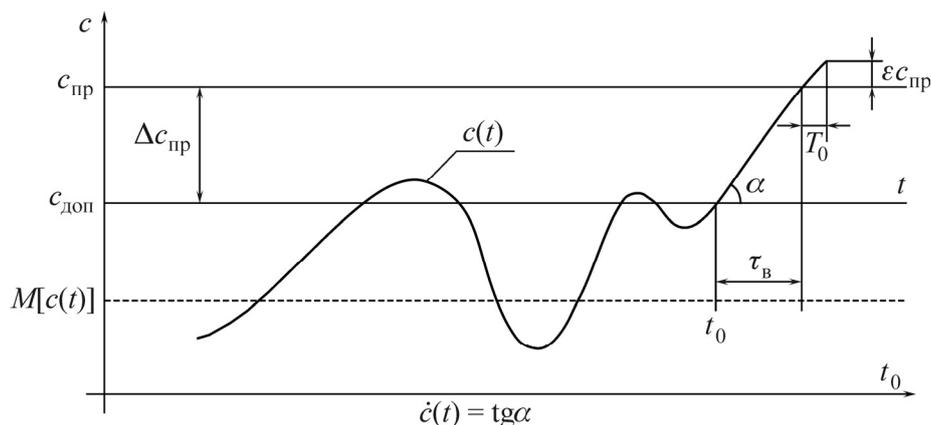


Рис. 3. График изменения концентрации метана

Далее рассмотрим два возможных подхода в определении  $\dot{c}(t)_{\max}$  — аналитический, основанный на применении ряда положений статистической радиотехники для теории выбросов, и экспериментальный, основанный на непосредственном численном (с помощью ЭВМ) анализе ряда реализаций процессов  $c(t)$ , полученных с помощью установленных на карагандинских шахтах АО “АрселорМиттал Темиртау” подсистем аэрогазового контроля, входящих в АСУ “Безопасность” [4].

Аналитический приближенный метод определения  $\dot{c}(t)_{\max}$  основан на теории случайных выбросов.

Анализ известных литературных источников по статистической теории выбросов [5, 6] показывает, что обозримые и приемлемые с точки зрения точности результаты могут быть получены при следующих допущениях относительно анализируемого случайного процесса изменения во времени концентрации метана (см. рис. 3):

1) случайный процесс  $c(t)$  считаем строго стационарным, нормальным с дважды дифференцируемой среднеквадратичной функцией;

2) автокорреляционная функция  $K_c$  процесса  $c(t)$  должна быть дифференцируемой в нуле и иметь конечную вторую производную;

3) выбросы превышения аппроксимируются параболой, полученной разложением в ряд до третьего члена процесса  $c(t)$  в окрестности момента времени  $t_0$ :

$$c(t) = c(t_0) + \dot{c}(t_0)\tau_в + \frac{1}{2}c''(t_0)\tau_в^2, \tag{22}$$

где  $\tau_в = t - t_0$  — длительность выброса;  $\dot{c}(t_0)$  и  $c''(t_0)$  — соответственно первая и вторая производные процесса  $c(t)$  в момент  $t_0$  начала выброса на уровне  $c_d$ ;

4) уровень “ $\epsilon$ ” отсчета выбросов превышения

$$\epsilon = c_d - M[c(t)] \tag{23}$$

должен удовлетворять условию

$$\gamma = \frac{\epsilon}{\sigma_c} > 1, \tag{24}$$

где  $M[c(t)]$  и  $\sigma_c$  — соответственно математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение процесса  $c(t)$ .

На рис. 3 приведен примерный вид реализации процесса  $c(t)$  с обозначением длительности  $\tau_b$  и площади  $S_b$  одного из выбросов превышения над допустимым значением  $c_d$ .

При принятых допущениях искомое значение  $\dot{c}_{\max}$  может быть получено на основании следующих соображений.

В соответствии с [5] условная плотность вероятности процесса  $c(t)$  на уровне  $c_d$  в момент начала выброса при указанных выше условиях равна:

$$\omega(\dot{c}/c_d) = \frac{c}{\alpha^2 \sigma_c^2} \exp\left[-\frac{c^2}{4\alpha^2 \sigma_c^2}\right], \quad (25)$$

где  $\alpha$  — коэффициент нормированной автокорреляционной функции

$$R_C(\tau) = e^{-(\alpha\tau)^2}. \quad (26)$$

Соответствующая интегральная функция распределения имеет следующий вид:

$$F[\dot{c}(t)/c_d] = 1 - \exp\left\{-\frac{[\dot{c}(t)]^2}{4\alpha^2 \sigma_c^2}\right\}. \quad (27)$$

Задавшись вероятностью того, что  $\delta = F[\dot{c}(t)_{\max}/c_d]$ , где величина  $\dot{c}(t)$  не превышает  $\dot{c}(t)_{\max}$ , получаем из (27)

$$\dot{c}(t)_{\max} = 2\sigma_c \sqrt{\ln \frac{1}{1-\delta}}. \quad (28)$$

Имея значения  $\sigma_c$  и  $\alpha$  для того или иного процесса  $c(t)$  или для группы процессов, можно определить на основании (28) соответствующие значения  $\dot{c}(t)_{\max}$ , однако достоверность результатов будет зависеть от приемлемости сформулированных выше ограничений и точности определения при этих условиях  $\alpha$  и  $\sigma_c$ .

Экспериментальный путь решения задачи заключается в определении по данным автоматизированных систем контроля интересующих нас значений  $\dot{c}(t)$  на уровне  $c_d$  с последующим отбором максимального значения. Результаты контроля представляют собой последовательность ординат, следующих друг за другом с интервалом в 1 мин. Алгоритм обработки информации следующий:

1) последовательным перебором ординат определяется первая из них, равная или превышающая  $c_{пр}$ , при этом фиксируется номер шага, равный  $z_1$ ;

2) последовательным возвратным перебором находим ближайшее значение  $c(t)$ , равное или меньше  $c_d$ , при этом фиксируется номер шага  $z_2$ ;

3) определяется и фиксируется  $\dot{c}_1(t)$  по формуле

$$\dot{c}_1(t) = \frac{c_{пр} - c_d}{(z_1 - z_2)\Delta t}, \quad (29)$$

где  $\Delta t$  — величина в единицах времени одного интервала отчета;

4) возвращаемся к интервалу  $z_1$  и начиная с ординаты  $z_1 + 1$  анализируем значение каждой очередной ординаты по условию первого пересечения процессом  $c(t)$  прямой  $c(t) \leq c_d$ ; как только такая ордината находится, возвращаемся к первому шагу и начинаем новый цикл поиска очередного значения  $\dot{c}_i(t)$ .

Когда все имеющиеся ординаты проанализированы, применяем к полученному множеству значений  $\dot{c}_i(t)$  прием попарного перебора и устанавливаем искомое наибольшее значение  $\dot{c}(t)_{\max}$ .

Достоинством такого подхода является его наглядность и полное соответствие фактическим условиям эксплуатации.

Недостаток заключается в громоздкости, трудоемкости и неопределенности получаемого результата, так как в каждой новой записи процесса  $c(t)$  может содержаться очередное значение  $\dot{c}(t)_{\max}$ , большее, чем ранее установленные значения.

По ряду реализаций процессов  $c(t)$ , полученных при эксплуатации АСУ “Безопасность” в соответствии с описанной выше методикой, значения  $\dot{c}(t)$  составили около 0.04 % СН<sub>4</sub> в минуту [4].

## ВЫВОДЫ

Возможности современных систем аэрогазового контроля на угольных шахтах используются в недостаточной степени. Действующие “Правила безопасности...” устанавливают детерминированные нормы, которые не учитывают динамические процессы изменения аэрогазовых режимов и их вероятностный характер.

Исследованы методы принятия решения с использованием статистических фильтров, построенных на базе однотипных пороговых элементов и реле времени с различными настройками порогов и выдержек времени, основанные на оценке амплитуды и длительности выбросов концентрации метана.

Получены зависимости для определения максимально ожидаемой для данных горно-геологических и производственно-технических условий скорости нарастания концентрации метана в зоне допустимых значений. При этом применены аналитические статистические методы и экспериментальные исследования, базирующиеся на численном анализе реализаций процессов изменения концентраций метана, полученных с помощью установленных на шахтах подсистем аэрогазового контроля.

Определены зависимости для расчета рациональных интервалов дискретности опроса датчиков метана, обеспечивающие приемлемый уровень безопасности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев Л. А., Шильникова А. А. Вероятностный подход к повышению эффективности функционирования автоматических систем контроля и защиты // Труды КарГТУ. — Караганда, 2008. — № 4.
2. Авдеев Л. А. Сравнительный анализ различных методов принятия решений в автоматизированных системах газовой защиты // Автоматика. Информатика. — Караганда, 2012. — № 2.
3. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. — М.: Наука, 1981.
4. Авдеев Л. А. Вероятностный анализ режимов работы автоматизированных систем контроля рудничной атмосферы // Труды КарГТУ. — Караганда, 2012. — № 1.
5. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — Кн. 2. — М.: Сов. радио, 1968.
6. Стретеневич Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — Кн. 1. — М.: Сов. радио, 1961.

*Поступила в редакцию 24/IV 2013*