

ОСОБЕННОСТИ ОПАСНЫХ ПО ГАЗУ ТУПИКОВЫХ ВЫРАБОТОК КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАЗГАЗИРОВАНИЯ

Канд. техн. наук МЕСТЕР И. М.

При длительном нарушении нормального проветривания опасной по газу тупиковой выработки, вызванном остановкой вентилятора главного или местного проветривания (ВМП), порывом трубопровода и т. п., возможно значительное скопление метана (загазование выработки), в связи с чем для восстановления нормального проветривания необходимо предварительно осуществить ее разгазирование [1].

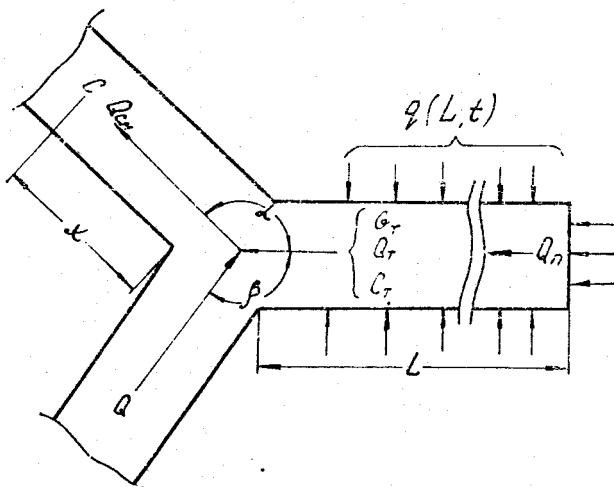


Рис. 1

Процесс разгазирования, осуществляемый вручную, является чрезвычайно опасным, так как неправильные действия обслуживающего персонала, связанные с несовершенством существующих методов контроля и регулирования процесса могут, обусловить появление на исходящей струе участка высоких концентраций метана. Для автоматизации опасного и сложного процесса разгазирования необходимо выявить специфические особенности объекта управления.

Не руководствуясь конкретным методом разгазирования [2, 3, 4], можно представить обобщенную модель процесса (рис. 1) как взаимодействие выталкиваемого из тупика длиной L метана G_t чистым воздухом Q , подаваемым на разбавление в условную зону смешения длиною x , через которую протекает газовая смесь $Q_{\text{см}}$. В зави-

симости от конкретных условий углы α и β могут изменяться в широких пределах. Измеряемая на расстоянии x от начала условной зоны смещения концентрация метана C является регулируемым параметром. Часть $Q_{\text{п}}$ общего потока Q , подаваемого ВМП для выталкивания метанового облака из тупика, представляет собой регулирующее воздействие.

Параметры G_t и Q следует рассматривать как внешние случайно изменяющиеся в процессе разгазирования возмущения.

При неизменном значении $Q_{\text{п}}$ параметр G_t является функцией общего количества G_0 выделившегося за время θ_0 нарушения про- ветривания метана и распределения последнего по длине x_t тупико- вой выработки

$$G_0(\theta, L) = \int_0^{\theta} \int_0^L q(\theta, x_t) dx_t d\theta \quad (1)$$

где $q(\theta, x_t)$ — погонное абсолютное газовыделение как функция длины тупиковой выработки и длительности загазирования, $\text{м}^3/\text{м} \cdot \text{сек}$.

Внутренний интеграл в выражении (1) представляет собой общее количество газа, выделяющегося в единицу времени, как функция θ $\text{м}^3/\text{сек}$:

$$f(\theta) = \int_0^L q(\theta, x_t) dx_t. \quad (2)$$

Функция $f(\theta)$ не может быть определена аналитически из-за невозможности прямого измерения величины $q(\theta, x_t)$.

В большинстве случаев (за исключением восстающих выработок и выработок с суфлярными выделениями) можно считать $f(\theta)$ не- возрастающей функцией времени, например:

$$\left. \begin{array}{l} f_1(\theta) = f_0 e^{-a\theta} \\ \text{или} \\ f_2(\theta) = f_0 \frac{1}{1 + a\theta} \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Общее количество метана, выделившегося за время θ_0 с учетом формул (1) и (2), равно

$$G(\theta) = \int_0^{\theta_0} f(\theta) d\theta. \quad (4)$$

Если с момента $\theta = \theta_0$ начать разгазирование и предположить, что концентрация метана C будет при этом поддерживаться постоянной и равной допустимому значению $C_{\text{доп}}(\text{отн.един})$, то длительность разгазирования τ_p может быть определена из интегрального уравнения

$$C_{\text{доп}} Q \tau_p - \int_0^{\theta_0 + \tau_p} f(\theta) d\theta = 0. \quad (5)$$

CONCENTRATION CHARTS

Excessive

Normal

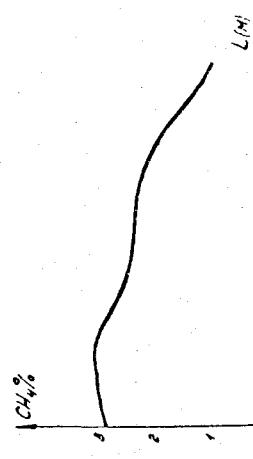
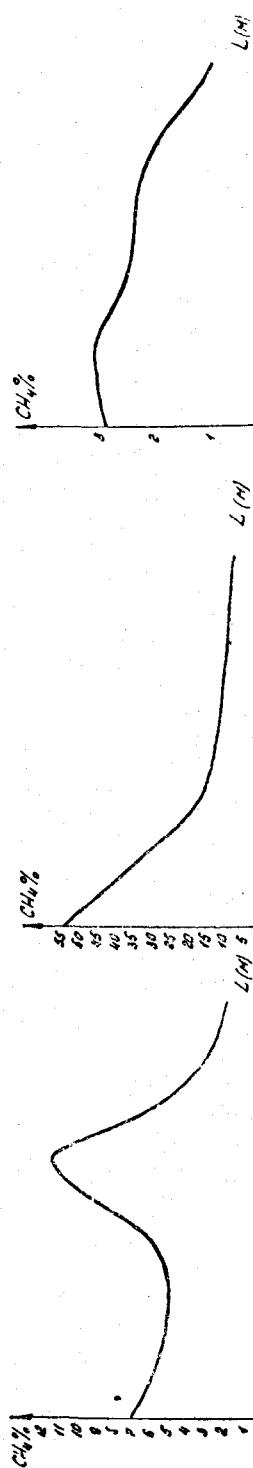
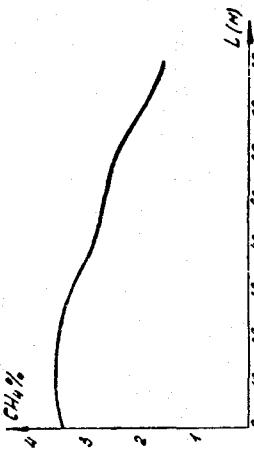
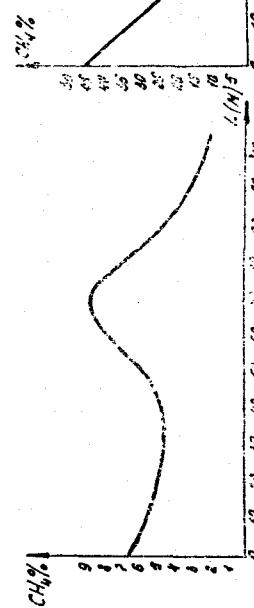
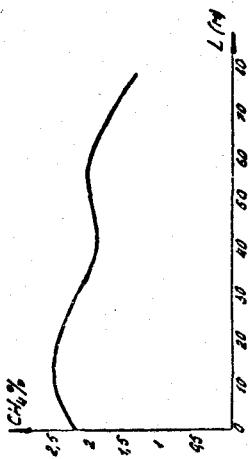
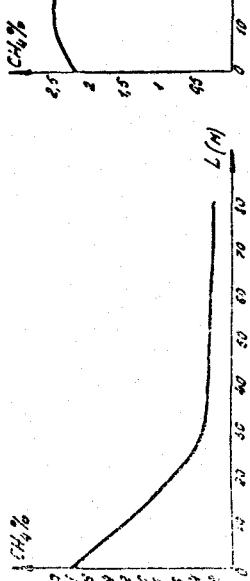
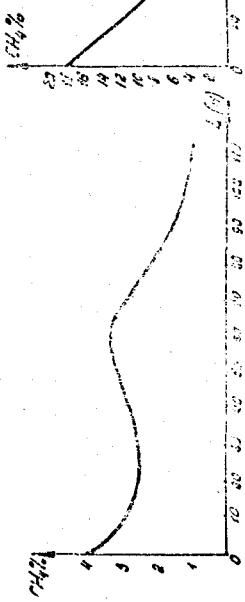


FIG. 9

Если предположить, что за время разгазирования $f(\theta) = f_0 = \text{const}$, то выражение (5) упрощается, при этом

$$\tau_p = \frac{f_0 \theta_0}{C_{\text{доп}} Q - f_0}. \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) следует, что при $Q = \text{const}$ расчетное значение τ_p представляет собой оптимальную (минимально возможную) длительность процесса разгазирования.

Если при прочих равных условиях осуществить разгазирование за время, меньшее τ_p , то концентрация на исходящей будет превышать допустимое значение $C_{\text{доп}}$, что недопустимо; наоборот, поддержание на исходящей более низкой концентрации, чем $C_{\text{доп}}$, приводит к резкому возрастанию длительности разгазирования, что также нежелательно.

Из приведенных зависимостей следует, что количество G_t метана, подаваемого в зону смешения, зависит от трех параметров

$$G_t = \varphi [q(\theta, x_t) Q_u]. \quad (7)$$

При неизменном значении Q_u с Q_{u0} зависимость $G_t(\tau)$ отсчитываемая с момента начала разгазирования воспроизводит в определенном масштабе, зависящем от значения Q_{u0} , функцию $q(x_t) |_{\theta=0}$.

При определенных допущениях можно считать, что усредненно по сечению тупиковой выработки значение концентрации метана в функции ее длины x_t воспроизводит в определенном масштабе зависимость $q(x_t) |_{\theta=0}$.

На рис. 2 приводятся экспериментальные кривые $C_t = f(x_t) |_{\theta=0}$, полученные путем соответствующей обработки данных, приведенных в работе [5]. Кривые показывают распределение концентрации метана по длине тупиковой выработки при различной длительности θ загазирования.

Из анализа кривых следует, что концентрация метана увеличивается от устья выработки к забою, что подтверждается данными, приведенным в работе [6]. Наиболее высокий градиент изменения концентрации $df(x_t)/dx_t$ имеет место в восстающих выработках, наименьший — в наклонных. Отдельные всплески кривой свидетельствуют о наличии местного суфлярного выделения в районе того сечения выработки, которому соответствует максимум всплеска кривой $f(x_t)$.

Данные, приведенные в работе [6], также свидетельствуют о том, что параметр G_t является переменным во времени, а максимальная скорость его изменения во времени при прочих равных условиях тем больше, чем больше длительность загазирования θ_0 . В связи с тем, что концентрация нарастает от устья к груди забоя тупиковой выработки, при разгазировании с постоянной скоростью выталкивания (постоянная производительность вентилятора местного проветривания) параметр G_t сначала возрастает, доходя до своего максимального значения, соответствующего однократному обмену возду-

ха в объеме тупиковой выработки, затем спадает из-за разбавления заднего фронта метанового облака выталкивающим воздухом до установленного значения, соответствующего режиму нормального проветривания.

При автоматической стабилизации концентрации C на исходящей величине Q_n , как видно из формулы (7), должна изменяться во времени по закону, обратному зависимости $C_t = f(x_t)$, что необходимо для обеспечения постоянства * величины G_t в течение процесса разгазирования и, следовательно, минимальной его длительности.

Ввиду невозможности достаточно точного определения функции $C_t = f(x_t)$, а также из-за случайного характера изменения во времени количества воздуха Q стабилизация величины C должна осуществляться с помощью замкнутой системы автоматического регулирования (САР).

Основным элементом САР является объект управления, представляющий собой два последовательно включенных звена: тупиковую выработку (ТВ) и зону смешения (ЗС).

Входной величиной звена ТВ является количество подаваемого на выталкивание воздуха Q_n , выходной — количество G_t выталкиваемого газа. Расчеты, выполненные на основании данных, приведенных в работе [7], показывают, что длительность переходных аэродинамических процессов в реальных условиях подготовительных выработок составляет доли секунды и ими можно пренебречь.

Так как при одной и той же величине управляющего воздействия выходная величина может быть различной, в зависимости от распределения концентрации по длине тупиковой выработки, то звено ТВ можно приближенно рассматривать как безынерционный усилитель с переменным коэффициентом усиления. Как известно [8], системы с переменными параметрами описываются математическими с помощью параметрической импульсной переходной функции $W(\tau, \varepsilon)$ от двух параметров — текущего времени τ и момента ε наступления возмущения. Для звена ТВ

$$w(\tau, \varepsilon) = \frac{G_t(\tau)}{Q_n(\tau)} = \delta(\tau - \varepsilon) = C_t(\tau) \delta(\tau - \varepsilon). \quad (8)$$

Для математического описания зоны смешения применяются различные по сложности модели: идеального выталкивания, идеального смешения, одно- и двухпараметрической [9] диффузии.

Если принять однопараметрическую диффузационную модель, то следя работе [10] можно представить параметрическую импульсную переходную функцию объекта (тупиковая выработка и зона смешения) как его реакцию по концентрации метана, замеренную на расстоянии x от начала зоны смешения, на возмущение в виде единичного импульса по параметру $Q_n(\tau)$. С учетом формулы (8) получим

* Рассматривается наиболее тяжелый случай, когда $C_t \gg C = C_{\text{доп}}$.

$$w(x, \tau, \varepsilon) = \frac{C_t(\varepsilon)}{2} \sqrt{\frac{P_e}{\pi \lambda}} \exp \left[-\frac{P_e(1-\lambda)^2}{4\lambda} \right], \quad (9)$$

где $P_e = \frac{Q_{cm}x}{SD}$ — критерий Пекле; D — коэффициент продольной турбулентной диффузии; $\lambda = \frac{\tau Q_{cm}}{Sx}$ — безразмерное время; S — поперечное сечение зоны смешения.

Так как ЗС рассматривается как объект с распределенными параметрами, то в отличие от объектов с сосредоточенными переменными параметрами здесь параметрическая импульсная переходная функция $W(x, \tau, \varepsilon)$ является функцией не двух, а трех параметров: текущего времени протекания процессов τ , момента нанесения возмущения ε и расстояния x от точки нанесения возмущения до точки замера выходной координаты.

Ввиду отсутствия достаточно эффективных методов исследования объектов рассматриваемого класса с переменными распределенными параметрами, когда объект описывается параболическим дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных, для упрощения анализа и синтеза САР целесообразно перейти к модели идеального смешения.

Для технологической схемы разгазирования, соответствующей рис. 1 (регулирование концентрации C на исходящей осуществляется регулированием производительности ВМП), динамика рассматриваемого объекта при принятых допущениях описывается следующим уравнением:

$$V \frac{dc}{dt} = G - Q_{cm} C. \quad (10)$$

С учетом следующих очевидных соотношений:

$$\left. \begin{array}{l} G_t + Q_t = Q_u \\ G_t = Q_u C_t \\ Q_t = Q_u (1 - C_t) \\ Q_{cm} = Q_u + Q \end{array} \right\} \quad (11)$$

получаем

$$V \frac{dc}{dt} = Q_u C_t - (Q + Q_u) C, \quad (12)$$

где V — объем зоны смешения.

Так как G_t и Q являются функциями времени, то рассматриваемый объект, даже при принятых упрощениях, описывается нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка с переменными параметрами.

Возможность отнесения рассматриваемого объекта к классу систем с медленно изменяющимися параметрами зависит от характера

изменения во времени усредненного значения концентрации C_t метана в газовой смеси, выталкиваемой в зону смещения в процессе разгазирования.

Очевидно, что

$$C_t(\tau) = \varphi_{C_t}(x_t), \quad (13)$$

где $\varphi_{C_t}(x_t)$ — функция, описывающая распределение параметра вдоль длины тупиковой выработки в процессе разгазирования.

Если пренебречь для упрощения выкладок диффузионными явлениями в процессе разгазирования, то можно считать, что

$$X_t = \frac{1}{S_t} \int Q_u(\tau) d\tau + x_t^0, \quad (14)$$

где x_t^0 — путь, пройденный газовым облаком с начала разгазирования; S_t — сечение тупиковой выработки.

Если предположить, что САР процесса разгазирования функционирует нормально и обеспечивает качественную стабилизацию концентрации на уровне $C_{\text{доп}}$ за счет поддержания соответствующего значения G_t^0 , то можно считать, что в любой момент времени выполняется условие

$$Q_u(\tau) C_t(\tau) = G_t^0 = \text{const}. \quad (15)$$

Учитывая формулы (14) и (15), получим окончательно

$$\varphi_{C_t} \left\{ \frac{G_t^0}{S_t} \int \frac{d\tau}{c(\tau)} + x_t^0 \right\} - C_t(\tau) = 0. \quad (16)$$

Решение интегрального уравнения (16) с целью получения в явном виде функции $C_t(\tau)$ весьма затруднительно в общем виде, однако в частном случае, когда φ_{C_t} является линейной функцией x_t , например

$$\varphi_{C_t}(x_t) = C_t^0 + dx_t, \quad (17)$$

уравнение (16) сводится к дифференциальному уравнению

$$C_t(\tau) \frac{dC_t(\tau)}{d\tau} = a \frac{G_t^0}{S_t}, \quad (18)$$

решение которого

$$C_t(\tau) = \sqrt{\frac{2aG_t^0}{S_t} + (C_t^0)^2}, \quad (19)$$

где a — градиент изменения $C_t(x_t)$ вдоль длины тупиковой выработки.

Можно показать, что скорость изменения концентрации $C_t^*(\tau)$ в процессе разгазирования при постоянной скорости выталкивания

$$Q_{ii} = Q_{i\max} = \frac{G_t^0}{C_t(0)} \quad (20)$$

всегда больше, чем при соблюдении условия (15), при этом зависимость

$$C_t^*(\tau) = \varphi_{C_t}(x_t)|_{Q_{ii}=Q_{i\max}} = \varphi_{C_t}\left(\frac{G_t^0 \tau}{S_t C_t^0}\right) \quad (21)$$

может рассматриваться как оценка сверху истинного значения функции $C_t(\tau)$, соответствующей решению уравнения (16).

В случае линейной зависимости (17), получаем:

$$\dot{C}_t^*(\tau) = \frac{dC_t^*(\tau)}{d\tau} = \frac{aG_t^0}{S_t G_t^0} = \frac{aC_{\text{доп}} Q_{\text{см}}}{S_t C_t^0}; \quad (22)$$

$$\dot{C}_t(\tau) = \frac{dC_t(\tau)}{d\tau} = \frac{aG_t^0}{S_t \sqrt{\frac{2a}{S_t} G_t^0 \tau + (C_t^0)^2}}. \quad (23)$$

Сравнивая формулу (22) с формулой (23) убеждаемся, что всегда $C_t^*(\tau) \geq \dot{C}_t(\tau)$, причем их равенство имеет место только при $\tau=0$.

Скорость изменения во времени концентрации метана C_t , как показано выше, равна скорости изменения во времени коэффициента усиления рассматриваемого объекта и является, следовательно, важным параметром при идентификации объекта.

Верхняя оценка этого параметра, как следует из приведенных выше соображений, может быть получена непосредственно по данным активного эксперимента — разгазирования с максимальной производительностью ВМП, равной $Q_{i\max}$ [6] без выполнения сложных замеров распределения концентрации по длине тупиковой выработки.

Нетрудно убедиться в том, что искомая верхняя оценка

$$\mu = S_{\text{шр}} \frac{dC_t(\tau)}{d\tau} = \frac{dC_t(\tau)}{d\tau} \Big|_{\max} = \frac{1}{Q_{i\max}} \frac{dG_t \tau}{d\tau} \Big|_{\tau=0}. \quad (24)$$

Графически она может быть определена по тангенсу угла между касательной и экспериментально полученной кривой $G_t(\tau)$ в точке $\tau=0$, $G_t=G_t^0$ и проходящей через эту точку горизонтальной линией.

Численные значения параметра η , полученные по экспериментальным данным, не превышают $0,1 \div 0,2\% \text{ CH}_4/\text{мин}$, что позволяет отнести объект к классу систем с медленно изменяющимися параметрами, допускающих применение классического метода линеаризации.

Линеаризируя выражение (12), получаем

$$V \frac{d\Delta C}{d\tau} + (Q^0 + Q_n^0) \Delta C = (C_t^0 - C_{\text{доп}}^0) \Delta Q_n + Q_n^0 \Delta C_t. \quad (25)$$

Пренебрегая величиной $C_{\text{доп}}$ по сравнению с C_t^0 и полагая, что при правильно выбранных параметрах САР за время переходного процесса величина C_t изменяется незначительно ($\Delta C_t \approx 0$), получим окончательно в операторной записи упрощенное математическое описание объекта в приращениях

$$(T_{\text{об}} p + 1) \Delta C = K_{\text{об}} \Delta Q_n, \quad (26)$$

где

$$T_{\text{об}} = \frac{V}{Q^0}; \quad (27)$$

$$K_{\text{об}} = \frac{C_t^0}{Q^0}. \quad (28)$$

Так как в процессе разгазирования параметры Q и C_t могут изменяться (с учетом аварийных режимов) в широких пределах — от 0 до максимального конечного значения, то непосредственно из выражений (25) и (26) видно, что как постоянная времени $T_{\text{об}}$, так и коэффициент усиления $K_{\text{об}}$ могут при этом изменяться теоретически от минимального, конечного, значения и до бесконечности; практически диапазон изменения этих параметров хотя и конечный, но весьма широкий, что должно в первую очередь учитываться при разработке систем автоматического управления процессом разгазирования опасных по газу тупиковых выработок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Местер И. М. и др. Надежность проветривания подготовительных забоев. «Безопасность труда в промышленности», 1971, № 1.
2. Времениес руководство по проектированию и организации проветривания угольных шахт восточных бассейнов страны. Кемерово, ВостНИИ, 1969.
3. Устинов А. М. и др. Повышение надежности газовой защиты и автоматизации разгазирования подготовительного участка. «Безопасность труда в промышленности», 1971, № 5.
4. Bruyet B. Accumulation de grisou dans les traçages et élimination de cette accumulation. «Revue de l'industrie minérale», 1968, janvier.
5. Подпалый В. Н. и др. Распределение метана в непроветриваемых тупиковых выработках. «Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело», 1968, № 10.
6. Устинов А. М. и др. Разгазирование тупиковых подготовительных выработок. «Известия вузов. Горный журнал», 1971, № 4.
7. Местер И. М. Математическая модель горной выработки. «Горные машины и автоматика», 1971, № 1.
8. Техническая кибернетика. Т. 3. Под ред. В. В. Солодовникова. М., «Машиностроение», 1969.
9. Бояриков А. И., Нафаров В. В. Методы оптимизации в химической технологии. М., «Химия», 1969.
10. Клебанов Ф. С., Мартынюк Г. К. Распределение примиси в вентиляционной струе от точечных и линейных источников. Научные сообщения ИГД им. А. А. Скочинского, № 77. М., 1970.