

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ ШАХТ

А. А. Волков, В. П. Чуберкис

Задача повышения безопасности и улучшения условий труда в угольных шахтах при расширении фронта горных работ и усложнении вентиляционных сетей требует применения оптимальных систем управления проветриванием шахт с использованием управляющих вычислительных машин.

При разработке таких систем возникает задача определения аэродинамических характеристик участков вентиляционной сети [1]. Управляющая система должна вырабатывать сигналы управления, обеспечивающие оптимальные газодинамические процессы на участке.

Выработка такого сигнала невозможна без предварительных сведений о переходной характеристике объекта управления (имеется в виду газодинамический процесс участка, лавы).

Переходные характеристики добычных участков тщательно изучаются. Установлена природа «всплесков» дебита и концентрации метана, получены важные количественные соотношения. Однако в условиях автоматического управления проветриванием шахты необходимо получать сведения о переходных процессах автоматически, без непосредственной постановки опыта или предварительных расчетов. Сведения об этих процессах должны быть динамичными, т. е. должны изменяться и уточняться непрерывно в процессе изменения переходных характеристик.

В Харьковском институте горного машиностроения, автоматики и вычислительной техники получены определенные результаты, позволяющие судить о характеристике переходных процессов по основной информации, поступающей на управляющее устройство с объектов управления.

Для получения переходных газодинамических характеристик необходимо располагать сведениями об изменении во времени дебита воздуха $Q(t)$, дебита метана $q(t)$, концентрации метана $a(t)$ и о временной диаграмме работы добычного механизма.

Обработка этих сведений с указанной целью будет производиться цифровым вычислительным устройством, алгоритм которого получен на основании положений теории случайных функций и методов статистической динамики.

Причиной применения подобного математического аппарата является то, что процессы $Q(t)$, $a(t)$, $q(t)$ и временную диаграмму работы добычного механизма (комбайна) можно рассматривать как случайные стационарные. Представление об этих процессах дают многосуточные газовые съемки, проводимые на различных шахтах Донбасса. МакНИИ.

На рис. 1 представлены в виде графиков результаты одной из таких газовых съемок. Временной диаграмме работы комбайна поставлен в соответствие случайный процесс типа «телеграфный сигнал», в котором сту-

пеньки с положительной амплитудой $+1$ соответствуют рабочему состоянию машины, а ступеньки с отрицательной амплитудой -1 соответствуют простоям.

Этот процесс мы в дальнейшем будем обозначать через $B(t)$.

Соотношения, позволяющие определить по информации о процессах $Q(t)$, $q(t)$, $a(t)$, $B(t)$ газодинамические характеристики соответствующих участков или лав, приводятся в статистической динамике линейных систем [2, 3].

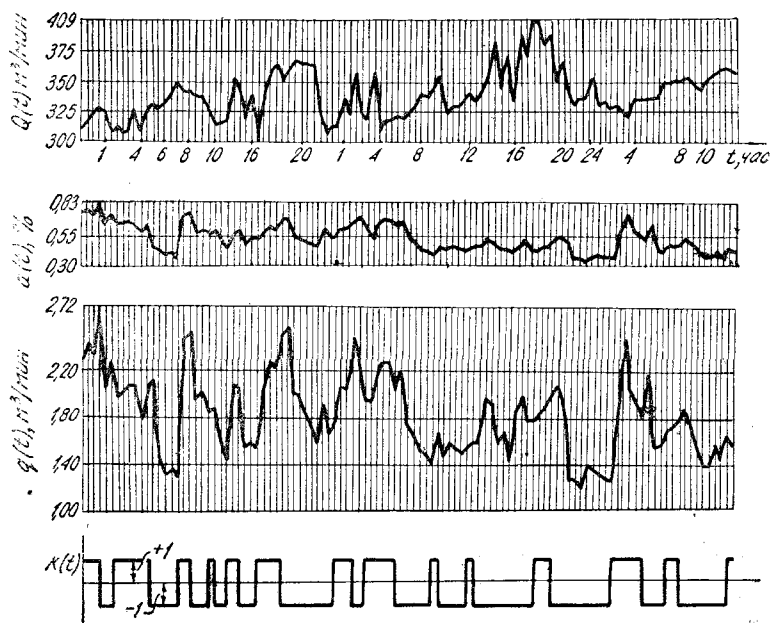


Рис. 1. Результаты наблюдений за метановыделением (2-я северная лава, пласт l_7 , ш. «Пролетарская-глубокая», тр. «Макеевуголь»).

Известно, что основной характеристикой произвольной динамической линейной системы в области вещественного переменного t (время) является импульсная переходная характеристика, т. е. реакция системы на воздействие в виде δ -функции. Обычно эта характеристика обозначается через $K(t)$. Не менее важной характеристикой является единичная переходная функция $h(t)$, представляющая собой реакцию системы на единичное ступенчатое воздействие.

Таким образом, пользуясь терминологией динамики линейных систем, полученные газодинамические характеристики лавы или участка можно назвать переходными характеристиками этих объектов.

Единичная переходная и импульсная переходная характеристики находятся между собой в следующем соотношении:

$$\left. \begin{aligned} K(t) &= \frac{dh(t)}{dt} \\ h(t) &= \int_0^t K(t) dt \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Если на вход линейной динамической системы поступает несколько воздействий-причин $y_1(t)$, $y_2(t)$... $y_n(t)$ (рис. 2), то реакция этой системы на входные воздействия $x(t)$ (следствие) находится из соотношения

$$x(t) = \int_0^{\infty} y_1(t-\theta) K_1(\theta) d\theta + \dots + \int_0^{\infty} y_n(t-\theta) K_n(\theta) d\theta, \quad (2)$$

где $K_k(t)$ — импульсная переходная характеристика линейного объекта по отношению к соответствующему воздействию.

При стационарных случайных возмущениях на входе системы из соотношения (2) получается и система n линейных интегральных уравнений для n импульсных переходных характеристик:

$$\left. \begin{aligned} R_{y_1 x}(\tau) &= \int_0^{\infty} R_{y_1}(\tau-\theta) K_1(\theta) d\theta \\ &\dots \dots \dots \\ R_{y_n x}(\tau) &= \int_0^{\infty} R_{y_n}(\tau-\theta) K_n(\theta) d\theta \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Уравнения этой системы не связаны и не зависят друг от друга, так как предполагается, что случайные воздействия на входе $y_1(t)$, $y_2(t)$... $y_n(t)$ не коррелированы, т. е. не зависят друг от друга.

В системе уравнений (3) $R_{y_h}(\tau)$ — корреляционная функция соответствующего стационарного случайного воздействия на входе системы, $R_{y_h x}(\tau)$ — взаимно-корреляционная функция между случайным воздействием на входе системы (причиной) и выходом системы (следствием).

Применение указанных соотношений к определению газодинамических переходных характеристик лавы (участка) производится с учетом и на основании следующего.

1. Стационарный случайный процесс $q(t)$ рассматривается как следствие двух стационарных случайных процессов $Q(t)$ и $B(t)$. Считается, что процессы $Q(t)$ и $B(t)$ некоррелированы.

2. Объект регулирования — лава, участок — предполагается линейным динамическим объектом по отношению к воздействиям $Q(t)$ и $B(t)$. Действительно, статистическая характеристика $q = j(Q)$ линейна, хотя по поводу этой зависимости в настоящее время нет единого мнения.

Так, по данным работ, проведенных в ИГД им. Скопинского [1], следует считать, что после переходного газодинамического процесса, вызванного ступенчатым изменением дебита воздуха, дебит метана устанавливается на прежнем уровне, а концентрация метана уменьшается. Такому положению соответствует характеристика $q = j(Q)$, представляющая собой прямую линию, параллельную оси абсцисс Q .

По другим данным (в частности, по данным работ кафедры вентиляции ХИГМАВТа), дебит метана после переходного процесса устанавли-

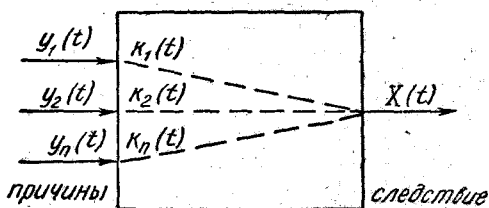


Рис. 2. Объект с n входами и одним выходом.

ливается на более высоком уровне, зависящем линейно от величины скачка дебита воздуха. Другими словами, в этом случае статическая характеристика $q = j(Q)$ представляет собой прямую с некоторым наклоном к оси абсцисс Q . Существенно, что наклон этой характеристики меньше 45° .

Однако для нашего случая важен лишь факт линейности, конкретный вид статической характеристики $q = j(Q)$ не имеет принципиального значения. Что касается линейности объекта по отношению к воздействию $B(t)$, то в ИГД им. Скочинского получены зависимости увеличения дебита метана от времени работы комбайна [4], которые соответствуют типичным переходным характеристикам линейного инерционного объекта.

Обозначим импульсную переходную характеристику участка (лавы) по отношению к воздействию $Q(t)$ через $K_Q(t)$, а эту же характеристику по отношению к воздействию $B(t)$ через $K_B(t)$. Тогда задача об отыскании переходных характеристик участка (лавы) сводится к решению двух интегральных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} R_{Qq}(\tau) &= \int_0^\infty R_Q(\tau - \theta) K_Q(\theta) d\theta \\ R_{Bq}(\tau) &= \int_0^\infty R_B(\tau - \theta) K_B(\theta) d\theta \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

В этих уравнениях

$R_{Qq}(\tau)$ — взаимно-корреляционная функция между дебитом воздуха и дебитом метана;

$R_{Bq}(\tau)$ — то же для процесса $B(t)$, поставленного в соответствие работе добычного механизма, и дебита метана;

$R_Q(\tau)$ — корреляционная функция для дебита воздуха;

$R_B(\tau)$ — корреляционная функция для процесса $B(t)$ (корреляционная функция работы комбайна).

Данные о случайных процессах $Q(t)$, $q(t)$, $a(t)$, $B(t)$ содержатся в трех суточных газовых съемках, где эти процессы представлены в квантовом по времени виде с шагом квантования $\Delta t = 30$ мин (см. рис. 1). Тогда корреляционные и взаимно-корреляционные функции необходимо вычислять по следующим формулам [2, 3]:

$$R_x(m \Delta \tau) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} (x_i - m_x)(x_{i+m} - m_x); \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{yx}(m \Delta \tau) &= \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} (y_i - m_y)(x_{i+m} - m_x), \quad \tau > 0 \\ R_{yx}(m \Delta \tau) &= \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} (y_{i+m} - m_y)(x_i - m_x), \quad \tau < 0 \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где

n — число ординат квантованного случайного процесса;

m — номер вычисляемой ординаты корреляционной функции (обычно $m = 0, 1, 2 \dots 15$);

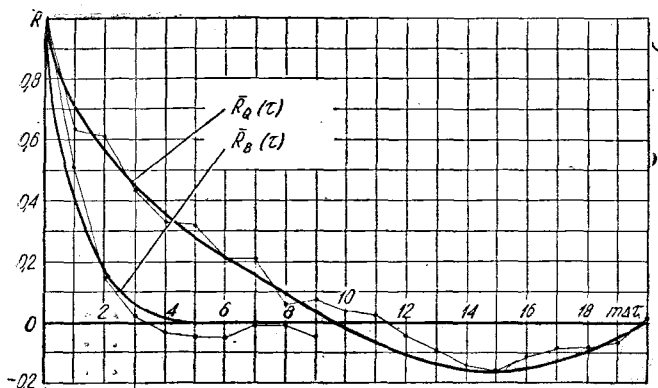
$\Delta \tau$ — шаг следования во времени ординат корреляционной и взаимно-корреляционной функций ($\Delta \tau = \Delta t = 30$ мин);

$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ — математическое ожидание (среднее) случайного процесса

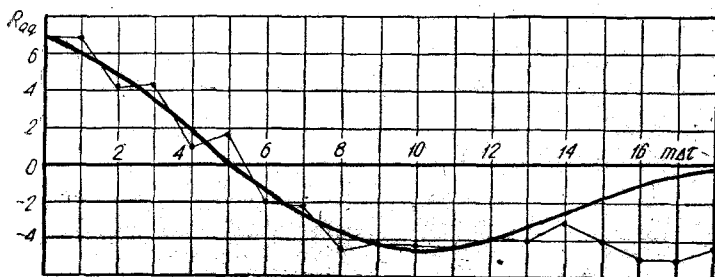
$x(t)$;

m_y — то же для случайного процесса $y(t)$.

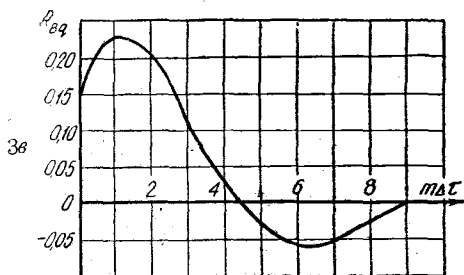
Формулы (5), (6) особенно удобны при определении статистических характеристик случайных процессов на дискретных вычислительных машинах с большим быстродействием.



3a



3б



3в

Рис. 3. Статистические характеристики случайных процессов:

а — нормированные корреляционные функции для дебита воздуха и работы комбайна ($mQ = 339,2$; $DQ = 459$; $mB = 0$; $DB = 1$); б — взаимнокорреляционная функция между дебитом воздуха и дебитом метана, $\tau > 0$; в — взаимнокорреляционная функция между работой комбайна и дебитом метана, $\tau > 0$.

В результате статистической обработки данных одной газовой съемки для определения переходных газодинамических характеристик вычислялись следующие функции: $R_Q(m\Delta\tau)$, $R_B(m\Delta\tau)$, а также $R_{Qq}(m\Delta\tau)$ и $R_{Bq}(m\Delta\tau)$.

Всего было обработано 18 газовых съемок для шахт Донбасса со сплошной системой разработки, но различными паспортами крепления лав, газоносностью и условиями залегания угольных пластов.

На рис. 3 а, б, в приведены указанные корреляционные и взаимно-корреляционные функции, полученные в результате обработки данных газовой съемки, показанных в виде графиков на рис. 1.

Эти характеристики послужили исходным материалом для определения переходных газодинамических процессов участка (лавы).

Если корреляционные и взаимно-корреляционные функции случайных процессов на входе и выходе динамической системы заданы в виде последовательности ординат, следующих друг за другом через дискретные отрезки времени $\Delta\tau$, и аналитические выражения результирующих графиков неизвестны, то решение каждого из интегральных уравнений системы (4) сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений с числом уравнений и неизвестных, равным количеству вычисленных ординат статистических характеристик [3]. Это решение в матричном виде записывается так:

$$AC = D, \quad (7)$$

где

A — квадратная симметричная матрица, составленная из значений корреляционной функции случайного процесса на входе системы.

$$A = \begin{vmatrix} R_y(0) & R_y(\Delta\tau) & R_y(2\Delta\tau) & \dots & R_y[(m-1)\Delta\tau] \\ R_y(\Delta\tau) & R_y(0) & R_y(\Delta\tau) & \dots & R_y[(m-2)\Delta\tau] \\ R_y(2\Delta\tau) & R_y(\Delta\tau) & R_y(0) & \dots & R_y[(m-3)\Delta\tau] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_y[(m-1)\Delta\tau] & R_y[(m-2)\Delta\tau] & R_y[(m-3)\Delta\tau] & \dots & R_y(0) \end{vmatrix}$$

C — матрица-столбец, составленная из значений импульсной переходной характеристики объекта, следующих друг за другом через время, равное $\Delta\tau$.

$$C = \begin{vmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \vdots \\ K_m \end{vmatrix}$$

Значение переходной характеристики для $t = 0$ принимается равным 0 ($K_0 = 0$).

D — матрица-столбец, составленная из значений взаимно-корреляционной функции для $\tau > 0$, следующих друг за другом с тем же шагом времени $\Delta\tau$.

$$D = \begin{vmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_m \end{vmatrix}, \quad \text{где } d_i = \frac{P_{yx}(i \Delta\tau)}{\Delta\tau}.$$

Для решения системы уравнений (7) могут быть использованы как точные методы, так и итерационные. Система уравнений удобно решается на дискретной вычислительной машине. В нашем случае решение производилось на машинах «Урал-4» и «Минск-14» точным методом (Гаусса) и итерационным (Гаусса — Зейделя). Получено хорошее совпадение результатов при разных методах и разных вычислительных машинах.

Поскольку корреляционная функция работы комбайна $R_B(\tau)$ и взаимно-корреляционная функция $R_{Bq}(\tau)$ затухают значительно быстрее соответствующих характеристик для дебита воздуха (практически на 9—10-й ординате), то для определения характеристики $K_B(t)$ приходилось решать

систему из 9—10 алгебраических уравнений, в то время как для определения характеристики $K_Q(t)$ необходимо было решать систему из 20—25 алгебраических уравнений. Ясно, что с ростом порядка системы (7) применение ЭЦВМ для определения переходных характеристик необходимо.

Характеристики $K_Q(t)$ и $K_B(t)$ приведены на рис. 4,а, а интегралы от них, представляющие искомые ступенчатые переходные характеристики объекта, показаны на рис. 4,б.

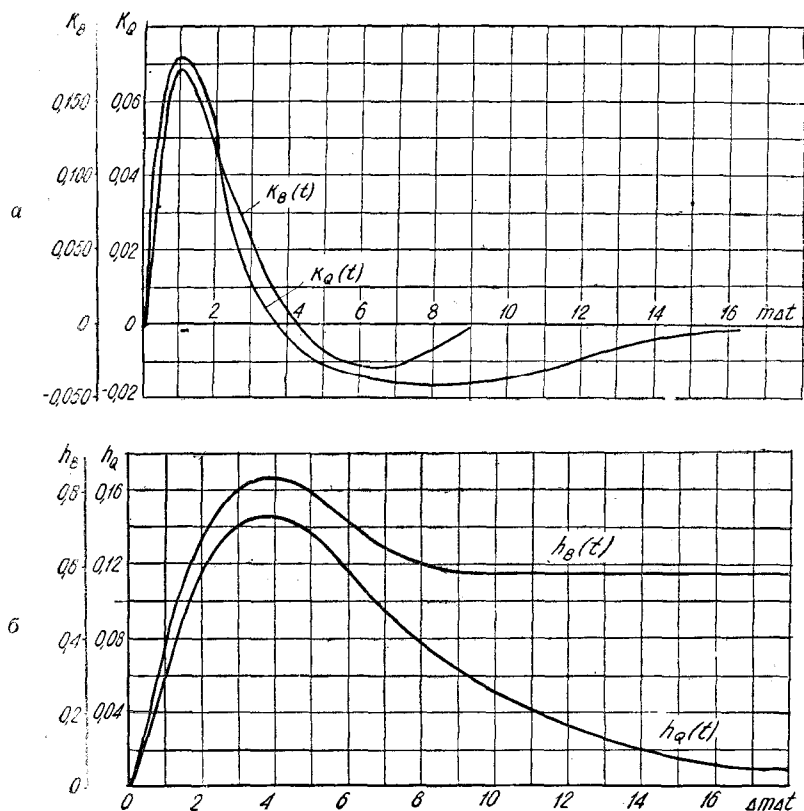


Рис. 4. Переходные характеристики участка:

а — характеристики $K_Q(t)$ и $K_B(t)$; б — переходные характеристики для работы комбайна и ступенчатого изменения дебита воздуха.

Характеристику $h_Q(t)$ следует понимать как изменение во времени дебита метана $q \text{ м}^3/\text{мин}$ при единичном скачке дебита воздуха, поступающего на участок. Если скачок дебита отличен от 1, то ординаты характеристики $h_Q(t)$ необходимо умножить на величину скачка. Это является следствием линейности системы (участка, лавы) по отношению к воздействию $Q(t)$.

Если величина скачка Q выходит за пределы линейности статической характеристики $q = j(Q)$, то необходимо учитывать вид этой зависимости за пределами линейности. Однако управляющий сигнал практически не может выходить за пределы линейности статической характеристики, так как управление концентрацией метана в исходящей струе чрезмерными (положим, двукратными или трехкратными) изменениями дебита воздуха

маловероятно и неэффективно. Ввиду этого пользование полученной переходной характеристикой упрощается. Зная характеристику $h_Q(t)$, весьма просто получить изменение концентрации метана в исходящей струе участка.

Характеристику $h_B(t)$ следует понимать как изменение во времени дебита метана (или его концентрации) с момента начала работы комбайна. Прочие условия (изменение дебита воздуха, барометрического давления и т. д.) считаются неизменными при непосредственной постановке эксперимента. Переходная характеристика $h_Q(t)$, полученная после статистической обработки результатов газовой съемки, хорошо отражает сущность процесса и согласуется с видом этой зависимости, полученным при непосредственной постановке эксперимента [1].

Переходная характеристика $h_B(t)$ хорошо согласуется с основными положениями теории фильтрации. Она отражает тот факт, что при перемещении груди забоя (с началом работы комбайна) кривая газового давления в пласте увеличивает свою крутизну у стенки забоя, благодаря чему выделение метана в первый момент резко возрастает [4]. Выполаживание со временем этой кривой приводит к замедлению скорости фильтрации метана из пласта, и это соответствует тому, что характеристика $h_B(t)$ стремится к установившемуся значению дебита метана (и его концентрации).

Установившемуся значению дебита метана при непрерывной работе комбайна соответствует состояние динамического равновесия между скоростью подвигания стенки забоя и изменением крутизны эпюры газового давления в пласте. Это значение может быть максимальным на кривой $h_B(t)$ или несколько меньше максимального (после перерегулирования), что объясняется различной скоростью изменения крутизны эпюры газового давления во времени.

Безусловно, приведенная схема весьма упрощена, в действительности следует учитывать и дебит метана из отбитого и раздробленного угля, который непрерывно перемещается в лаве. Но выделение метана из отбитого угля также происходит по законам фильтрации и в общем повторяет ту же картину, что и выделение метана из угольного массива. Поэтому вид результирующей кривой $h_B(t)$ достаточно объясняется несколько упрощенной физической картиной процесса.

Полученные статистическим методом характеристики $h_B(t)$ и $h_Q(t)$ следует рассматривать как качественные результаты, которые подтверждают лишь правомочность применения приведенного математического аппарата к исследованию газодинамических процессов.

Ограниченный срок наблюдений процессов $Q(t)$, $a(t)$, $q(t)$, $B(t)$ и большой шаг их квантования ($\Delta t = 30$ мин) приводят к значительным погрешностям при вычислении статистических характеристик. В виду этого результаты обработки статистическими методами лишь одной газовой съемки были бы сомнительными. Однако недостаточность данных, содержащихся в каждой съемке, компенсировалась количеством обработанных съемок. Это позволило сделать некоторые обобщения и выводы, приведенные в настоящей статье. Кроме того, предварительный статистический анализ метановыделения имел своей целью лишь подтверждение формальных соотношений статистической динамики и теории случайных функций по отношению к рассматриваемому вопросу, что и было достигнуто.

Важным следствием подобного рассмотрения является то, что появилась возможность обосновать алгоритм управляющего дискретного уст-

ройства для регулирования проветривания отдельного участка (а следовательно, и шахты), так как последовательность обработки рабочей информации и основные соотношения для получения переходных характеристик известны.

Теория случайных функций позволяет определить время наблюдения процесса и время его квантования, сообразуясь с требованиями точности и достоверности статистических характеристик этих процессов. При этом необходимо знать точные корреляционные функции случайных процессов и точные математические ожидания. Ввиду этого предполагается проведение детализированных газовых съемок по нескольким типовым объектам. Время наблюдения возрастает до 10—15 суток (вместо трех суток), шаг квантования принимается минимально возможным по техническим соображениям ($\Delta t = 15 \text{ мин}$). Предполагается статистические характеристики детализированных съемок принять за точные и затем обосновать оптимальное время наблюдения и время квантования процессов $Q(t)$, $a(t)$, $q(t)$, $B(t)$.

Предлагаемая методика обработки результатов газовых съемок имеет, кроме того, самостоятельное значение. Действительно, при широком внедрении ЭЦВМ в практику научно-исследовательских институтов возможно на основании газовых съемок получить гораздо больше информации о проветривании участков (лав), чем получается в настоящее время. Аппарат теории случайных функций позволит уточнить и методу проведения самой газовой съемки с тем, чтобы при обработке ее результатов статистическими методами на ЭЦВМ получать достоверные характеристики.

Результаты данной работы могут быть использованы при разработке алгоритма цифрового управляющего устройства с учетом газового фактора, так как приводятся основные соотношения и порядок обработки основной информации о состоянии проветривания участка (лавы) для определения переходных газодинамических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. С. Клебанов, А. Т. Айруни. Зависимость метанообильности участка от количества подаваемого воздуха. «Уголь», № 1, 1963.
2. В. В. Солодовников. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. Физматгиз, 1960.
3. В. В. Солодовников и др. Вычислительная техника в применении к статистическим исследованиям в автоматике. Машгиз, 1963.
4. В. В. Ходот и др. Решение некоторых задач фильтрации газа в угольных пластах методом гидравлических аналогий. Сб. IV тезисов докладов и сообщений на сессии ученого совета ИГД им. Скопинского. М., 1962.