

6
А-39

Министерство угольной промышленности СССР
Академия наук СССР
Институт горного дела им. А.А.Скочинского

На правах рукописи

Канд. техн. наук Ф. С. КЛЕБАНОВ

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ГАЗОВЫМ РЕЖИМОМ В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ
СЕТЯХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Специальность 05.311 - "Подземная
разработка и эксплуатация
угольных, рудных и
нерудных месторождений"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва
1970

В В Е Д Е Н И Е

Основные технико-экономические направления развития угольной промышленности СССР на 1970-1975 гг. предусматривают значительное ускорение темпов технического прогресса и повышение эффективности производства в угольной промышленности страны. Главнейшие предпосылки для решения данной задачи включают в себя техническое перевооружение угольной промышленности на основе новой высокопроизводительной техники и прогрессивной технологии добычи угля, повышение производительности труда, дальнейшее улучшение условий труда и техники безопасности.

Улучшение условий труда и техники безопасности при подземной добыче угля в большой степени предопределяется повышением эффективности вентиляции. В настоящее время на вентиляцию приходится не менее 80-90% нагрузки по выносу из шахты избыточных количеств газа, пыли и тепла. Несмотря на развитие и совершенствование дегазации, способов борьбы с пылью и теплового кондиционирования воздуха, эта нагрузка и впредь будет достаточно высокой.

Однако с ростом интенсивности добычи угля и концентрации горных работ к вентиляции - этому испытанному и надежному способу нормализации атмосферных условий в подземных выработках - предъявляются качественно новые требования и в первую очередь в связи с проблемой метана. Большие дебиты газа и неравномерность его распределения в вентиляционной сети, ограниченная пропускная способность (по воздуху) наиболее газообильных выработок, огромные, уже в настоящее время, расходы воздуха и, следовательно, большие депрессии и расходы энергии на проветривание, а также ряд обстоятельств, связанных с пылевым и тепловым факторами, не позволяют решать задачу повышения эффективности проветривания наиболее простым путем - еще большей подачи воздуха в шахту.

I

Центральная научная
БИБЛИОТЕКА
Академии наук Киргизской ССР

Увеличение подачи воздуха оказывается нерациональным и по той причине, что общее количество воздуха, подаваемого в шахту, обычно вполне достаточно для разжижения общего дебита газа в среднем до допустимой величины.

В связи с этим в современных условиях и тем более в будущем суть шахтной вентиляции должна заключаться не столько в транспортировании воздуха, сколько в аэродинамическом управлении газовым уровнем в выработках на основе более детального учета характеристик источников газа и вентиляционной сети, а повышение эффективности проветривания должно направляться по пути изыскания надежных способов осуществления этого управления.

Такой подход к роли вентиляции диктуется также известными поисками путей преодоления "газового барьера" в шахтах в виде предложений об увеличении допустимых концентраций газа в вентиляционных струях, проектов создания закрытых забоев с инертной к взрывам атмосферой, разработки автоматизированных систем воздухораспределения.

Все изложенное приводит к необходимости более углубленного исследования аэрогазодинамики вентиляционных сетей угольных шахт. Систематизированный комплекс соответствующих задач образует новое направление (или этап) исследований в области шахтных вентиляционных сетей, которое может быть названо диффузионным и которое заключается в определении закономерностей формирования газового уровня в выработках большой протяженности в зависимости от вентиляционных факторов. Это направление исследований является естественным продолжением двух предшествующих этапов в развитии науки о шахтных вентиляционных сетях: энергетического (задачи об аэродинамических сопротивлениях) и топологического (задачи о распределении воздуха в разветвленной сети).

Исследования в диффузионном направлении необходимы как научная основа для изыскания и совершенствования способов аэродинамического управления газовыми режимами в разветвленной шахтной вентиляционной сети. Суть этих способов состоит в пространственном и временном перераспределении объемов газа, переносимых шахтными вентиляционными потоками. Оно может заключаться в осуществлении долговременных мероприятий в стабильных аэрогазодинамических условиях, а также в оперативном изменении вентиляционных параметров или в непрерывном автоматическом контроле и регулировании вентиляционного процесса. Последнее связано с внесением в вентиляционную сеть относительно частых аэродинамических

возмущений и возникновением в ней газовой нестационарности самого различного вида.

Основным процессом, определяющим установившиеся и нестационарные газовые режимы в разветвленной вентиляционной сети, является продольная турбулентная диффузия газа в воздушном потоке.

Механизм продольной диффузии примеси в ламинарном и турбулентном потоках впервые исследовался П.Алленом, Е.Тейлором и Дж.Тейлором. Применительно к воздуховодам типа горных выработок аналогичная задача решалась позднее Дж.Р.Ходкинсоном и С.Дж.Ли-чем, а также В.Маасом и Т.Вильдшуттом. Еще раньше распределение волны взрывных газов в проветриваемых тупиковых выработках экспериментально изучалось А.И.Ксенофонтовой. В.Н.Воронин исследовал изменение концентрации взрывных газов по длине тупиковых выработок, проветриваемых нагнетательным способом, и впервые сформулировал в общих чертах задачу об определении загазованности тупиковой выработки при непрерывном (во времени и по длине выработки) выделении газа. Кроме того, В.Н.Ворониным был детально исследован специальный вид газовой нестационарности, связанный с периодическим проветриванием камерообразных выработок от взрывных газов при постоянном расходе воздуха. В физико-химической гидромеханике известна задача о распределении импульса примеси в турбулентном потоке жидкости, движущейся в одиночной трубе.

Таким образом, можно отметить, что предшествующие исследования, во-первых, касались в той или иной мере только вопроса о механизме рассеяния примеси в единичном воздуховоде и, во-вторых, относились к стационарным режимам движения воздуха. Постановка и решение комплекса задач о нестационарности концентраций примеси в разветвленной сети при внесении в нее аэродинамических возмущений до последнего времени не были известны. В этом направлении исследовалась только частная задача - о газовой нестационарности в исходящей вентиляционной струе выемочного участка (Ф.А.Абрамов, В.А.Бойко, Г.Л.Пигида, Л.А.Пучков, А.С.Цырюльников, И.А.Рыженко, О.И.Касимов, Б.Е.Грецингер, Г.А.Шевелев, Л.П.Фельдман, В.А.Святный, Ю.М.Карбовский и др.) и задача о газовой нестационарности при реверсии вентиляции (С.Н.Осипов).

Газовая нестационарность в сетях выемочных участков шахт Кузбасса экспериментально исследовалась А.А.Мясниковым.

В последние годы изучалась также структура загазованности выработок вблизи от источников газа - так называемое "расслоение" газа (П.Бакке и С.Дж.Лич, А.И.Бобров, М.П.Кошелев и др.).

К.З.Ушаков впервые в комплексе исследовал локальные газодинамические эффекты в шахтной вентиляционной сети, доведя анализ до разработки метода расчета количества воздуха, необходимого для проветривания шахт по фактору указанных локальных эффектов.

С аэрогазодинамикой вентиляционных сетей тесно связан вопрос об источниках газа, действующих в выработках угольных шахт. Первым результатом в этом направлении было установление существенной нестационарности процесса выделения газа через обнаженную поверхность угля. Г.Д.Лидин предложил гиперболическую степенную формулу для описания замедления удельного дебита газа через обнаженную поверхность пласта. В дальнейшем А.Э.Петросян скорректировал эту формулу с целью избежать бесконечных значений функции в нулевой точке. Для описания изменения дебита газа из отбитого угля Г.Д.Лидин применил экспоненциальную зависимость, которая по сравнению с гиперболической степенной формулой является более общей и более обоснована для затухающих процессов, характеризующихся различным начальным уровнем и различной величиной замедления. В.Л.Божко для описания уменьшения дебита газа в подготовительных выработках также использовал экспоненциальную зависимость.

Из натуральных и лабораторных экспериментов известен порядок величины начального удельного дебита газа из угля. Кроме того, И.В.Сергеевым и А.Э.Петросяном были предложены формулы для расчетного определения этой величины. Следовательно, при изучении вопроса о поступлении газа в вентиляционную струю внимание исследователей было сосредоточено в основном на определении удельного дебита газа и его уменьшении со временем. Общие же структурные связи между параметрами, характеризующими внешнюю динамику выделения газа из угля, не были установлены. Между тем, достаточно четкое представление об этих параметрах и связях между ними имеет большое значение в анализе аэрогазодинамики вентиляционных сетей угольных шахт.

В соответствии с изложенным общая цель настоящей работы заключается в изучении процессов распространения газа в вентиляционной сети угольной шахты в стационарных и нестационарных режимах проветривания и разработке научных основ аэродинамического управления газовым уровнем в выработках.

Содержание работы включает:

- анализ внешней динамики выделения газа из угля с целью

установления определяющих и предельных параметров этого процесса и связей между ними;

- исследование комплекса вопросов о газовой статике выработок, вентиляционных соединений и выемочных участков, характерных для условий угольных шахт;

- анализ газовой динамики выработок с различного вида источниками газа;

- разработка общей теории переходных газовых режимов, возникающих в разветвленной сети с квадратичными и линейными вентиляционными ветвями при внесении в нее резких (неплавных) аэродинамических возмущений;

- разработка общей теории переходных газовых режимов в вентиляционной сети с квадратичными вентиляционными ветвями при плавном изменении аэродинамических параметров;

- анализ некоторых новых способов управления газовым уровнем в выработках при помощи вентиляционных средств;

- рассмотрение связи между вопросами конструирования вентиляционных сетей и регулирования проветривания по газовому фактору;

- решение ряда задач, связанных с газовой нестационарностью.

Глава I. ИСТОЧНИКИ ГАЗА В ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

В настоящее время известны три группы оценок источников газа в угольных шахтах: общая оценка газообильности шахт и выработок (прогноз газообильности); исследование локальной газовой структуры вблизи обильных источников газа (так называемые местные и слоевые скопления газа); определение абсолютных параметров источников газа (дебит и его изменчивость во времени).

Каждая из этих групп имеет определенные границы исходных предпосылок и определенную область приложения.

При изучении аэрогазодинамики вентиляционных сетей, состоящих из выработок значительной протяженности и проветриваемых с большими скоростями воздуха, наибольшее значение имеет знание абсолютных детерминированных параметров источников газа, т.е. описание интенсивности и изменчивости выделения газа в вентиляционную струю.

Основой для анализа внешней динамики выделения газа через

поверхности обнажения угля служит формула, описывающая замедление удельного дебита газа со временем:

$$g(t) = g_0 \exp\left(-\frac{t}{T_*}\right), \quad (1)$$

где g_0 - начальный удельный дебит газа, t - текущее время, T_* - постоянная времени.

Числовое значение постоянной времени T_* равно $\sim 1/3$ того периода времени, в течение которого выделение газа через однажды обнаженную поверхность угля почти полностью (на 95-97%) прекращается.

Общее дифференциальное уравнение внешней динамики выделения газа из угля имеет вид:

$$T_* \frac{dG}{dt} + G = G_{max}, \quad (2)$$

где G_{max} - один из предельных параметров газовыделения: максимальный дебит газа, устанавливающийся при непрерывном увеличении площади газоотдающей поверхности, $m^3/\text{мин}$; G - текущее значение дебита газа, $m^3/\text{мин}$; U - скорость образования новой газоотдающей поверхности, $m^2/\text{мин}$.

Величина G_{max} определяется формулой

$$G_{max} = g_0 U T_*. \quad (3)$$

Формула (3) дает возможность ввести фактор времени в оценку газообильности выработок и шахт.

Вторым предельным параметром газовыделения является максимальный объем газа W_{max} (m^3), выделяющийся через поверхность обнажения угля за большой период времени:

$$W_{max} = g_0 S T_*, \quad (4)$$

где S - площадь газоотдающей поверхности.

Предельные параметры газовыделения связаны между собой соотношением

$$W_{max} = G_{max} \frac{S}{U}. \quad (5)$$

Анализ внешней динамики газовыделения применительно к условиям подготовительных выработок по углю приводит к следующей формуле для дебита газа:

$$G(t) = G_{max} \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_*}\right), & 0 \leq t \leq T \\ \left[1 - \exp\left(-\frac{T}{T_*}\right)\right] \exp\left(-\frac{t-T}{T_*}\right), & t \leq T \leq \infty, \end{cases}$$

где T - продолжительность проходки выработки.

Абсолютный объем газа, выделяющегося в подготовительной выработке, определяется формулой

$$W(t) = W_{max} \begin{cases} \frac{t}{T_*} - \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_*}\right)\right], & 0 \leq t \leq T \\ \frac{t}{T_*} - \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_*}\right)\right] \exp\left(-\frac{t-T}{T_*}\right), & T \leq t \leq \infty. \end{cases} \quad (6)$$

Формулы для предельных параметров газовыделения (2-5) могут быть использованы также для описания газовой динамики дегазационных скважин. В частности, используя величину постоянной времени (T_*), на основании формул (5) и (6) можно дать оценку интервала времени, в течение которого выработка или скважина выделяет $i\%$ максимального объема газа, выделившегося бы в ней за очень большое время:

$$t = T_* \ln \frac{100}{100-i}.$$

Одновременность процессов выделения газа через плоскость обнажения пласта и из отбиваемого угля делает практически невозможным прямое экспериментальное разделение этих двух составляющих газового дебита в лаве.

В работе показано, что соотношение между этими составляющими может быть определено на основе уравнений внешней динамики выделения газа и известных данных о числовых значениях газодинамических параметров плоскости обнажения пласта и отбитого угля.

Отношение дебита газа через плоскость обнажения пласта к дебиту газа через суммарную внешнюю поверхность кусков отбитого угля определяется формулой

$$i(A) = \frac{g_{01} S_1 T_{*1} a}{g_{02} S_2 T_{*2}} \frac{1 - \exp\left(-\frac{K}{T_{*1} A}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{K a}{T_{*2} A}\right)}, \quad (7)$$

где g_0, S, T_* - соответственно начальный удельный дебит газа, площадь газоотдающей поверхности и постоянная времени для плос-

кости обнажения пласта в лаве (индекс 1) и отбитого угля (индекс 2); A — нагрузка на лаву (тыс. т/сутки); a — отношение цикла пребывания отбитого угля в выработках на свежей вентиляционной струе (t_2) к циклу обнажения поверхности забоя в лаве (t_1): $t_2 = at_1$.

Коэффициент K в формуле (7) равен

$$K = \frac{24Lmb\gamma}{1000}$$

Глава П. ГАЗОВАЯ СТАТИКА ЭЛЕМЕНТОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Начальным этапом при решении вопроса о необходимости и возможности изменения газового уровня в выработке с помощью вентиляционных средств является анализ установившейся аэрогазодинамической обстановки. При установившемся режиме проветривания (и при условии постоянства дебита источников газа) в отдельных выработках и в шахтной вентиляционной сети в целом устанавливается динамическое равновесие между выделением газа и выносом его потоками воздуха. При этом эпюры концентраций газа в выработках стационарны и можно говорить о газовой статике вентиляционной сети. Анализ газовой статки сводится к определению эпюр концентрации газа в выработках при различных значениях аэрогазодинамических параметров.

В работе рассмотрены вопросы газовой статки сквозных единичных выработок, последовательного и параллельного соединения выработок, тупиковых выработок, газовой статки выемочных участков. В самом общем виде задачи газовой статки сквозных выработок сводятся к определению в явном виде функции $C(x)$ на основе выражения

$$C(x) \left[Q_0 + \int q_1(x) dx - \int q_2(x) dx \right] = \int q(x) dx + \int C_1(x) q_1(x) dx - \int C(x) q_2(x) dx, \quad (8)$$

где $q(x)$ — функция, характеризующая изменение удельного дебита газа по длине выработки; $q_1(x)$ — изменение удельного притока воздуха в выработке, м³/мин·м; $q_2(x)$ — изменение удельных утечек воздуха в выработке, м³/мин·м; $C_1(x)$ — изменение концентрации газа в потоке воздуха, притекающем в выработку; Q_0 — расход воздуха в начальном сечении выработки; x — координата, отсчитываемая по длине выработки.

Для условий лавы, по длине которой происходят утечки воздуха в выработанное пространство, из формулы (8) при $q_1(x) = 0$, $q_2(x) = q = const$, $q(x) = q = const$ получено следующее дифференциальное уравнение, описывающее продольную загазованность выработки:

$$\frac{dC}{1-C} = \frac{q dx}{Q_0 - (q-g)x} \quad (9)$$

Решение уравнения (9) дает аналитическое выражение для эпюры концентрации газа в лаве при наличии утечек воздуха в выработанное пространство:

$$C(x) = 1 - (1 - C_0) \left(1 - \frac{q-g}{Q_0} x \right)^{Q_0/(q-g)} \quad (10)$$

При очень малой величине утечек ($q \approx g$) из уравнения (9) следует

$$C(x) = 1 - (1 - C_0) \exp\left(-\frac{qx}{Q_0}\right).$$

Формула (10) дает объяснение распространенному явлению повышенной концентрации газа вблизи сопряжения лавы с вентиляционным штреком и хорошо описывает соответствующую эпюру концентрации газа — относительно плавное изменение концентраций на большей части лавы с характерным крутым нарастанием в конце лавы. Причиной этого, как следует из выражения (10), является недостаток воздуха в сочетании со значительным количеством газа, принятого вентиляционной струей при движении ее вдоль лавы.

Газовая статика тупиковых газообильных выработок рассмотрена для четырех характерных случаев: а) нагнетательного проветривания при отсутствии утечек в воздухопроводе; б) нагнетательного проветривания при неплотном воздухопроводе; в) всасывающего проветривания при помощи плотного воздухопровода; г) всасывающего проветривания при помощи неплотного воздухопровода.

Закон изменения интенсивности газовыделения по длине выработки принят в соответствии с формулой (1). Установлено, что в случаях "б" и "г" эпюры концентрации газа имеют максимум на некотором расстоянии от забоя выработки. При одинаковом количестве воздуха, поступающего к забоям выработки, последняя оказывается менее загазованной в случае "б", чем в случае "а". Показано также, что, если исходить из одной и той же производительности вентиляторов, то утечки воздуха через неплотности в воз-

духопроводе в случае "б" являются полезными, лишь начиная с некоторого расстояния от забоя, которое может быть определено по приведенной в работе формуле. В случаях "в" и "г" неплотность воздухопровода полезна (в отношении газовой обстановки) также только на определенной длине от устья выработки.

Новой является задача о газовой статике широко распространенного вида вентиляционного соединения — параллельного соединения двух струй. В работе дан анализ этого вопроса для двух случаев: когда соединения состоит только из пассивных ветвей и когда в одну из двух параллельных ветвей включен вентилятор.

Показано, что многообразие различных начальных газовых ситуаций для соединения из двух пассивных ветвей полностью исчерпывается следующими пятью соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} C_{III} > d_{II} > C_{2II}, & C_{2II} > d_{II} > C_{III} \\ C_{III} = d_{II} = C_{2II}, & C_{III} > d_{II} > C_{2II} = 0 \\ C_{2II} > d_{II} > C_{III} = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (II)$$

а для соединения с одной активной ветвью — тремя соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} C_{2II} > d_{II} > C_{III}, & C_{2II} = d_{II} > C_{III} \\ C_{2II} > d_{II} = C_{III} \end{aligned} \right\}, \quad (I2)$$

где C_{III} , C_{2II} — концентрации газа в ветвях I и 2 соответственно; d_{II} — концентрация газа в общей исходящей струе соединения.

Анализ газовой статике выемочных участков включает в себя целый комплекс вопросов, в значительной мере определяющихся направлением потока утечек воздуха в выработанном пространстве.

Основные условия, от которых зависит это направление, таковы:

— при $R_1 > R_3$ утечки воздуха поступают как на вентиляционный штрек, так и в лаву;

— при $R_1 = R_3$ утечки направляются в основном на вентиляционный штрек;

— при $R_1 < R_3$ утечки направляются с откаточного штрека на вентиляционный и из лавы на вентиляционный штрек (R_1, R_3 — удельные аэродинамические сопротивления соответственно откаточного и вентиляционного штреков).

Показано, что газовая статика выемочных участков характеризуется в первую очередь соотношениями (II), в которых C_{III} означает концентрацию газа в выработанном пространстве, d_{II} — в исходящей струе участка, C_{2II} — в исходящей струе лавы.

Ввиду того, что вентиляционная сеть выемочного участка включает в себя выработанное пространство, разделение составляющих газового дебита на участке в случае утечек воздуха из лавы в выработанное пространство (или, наоборот, приток воздуха в лаву из выработанного пространства) представляет определенные трудности. Обычно эта задача решается при помощи так называемых поперечных газовых съемок, методическая основа которых не бесспорна, а проведение сопряжено с большими трудностями.

В работе решена задача о разделении составляющих газового дебита участка (при различных схемах проветривания) по результатам легко осуществимых измерений расхода воздуха и концентрации газа в нескольких пунктах вентиляционной сети.

В частности, для схемы с трехсторонним примыканием выработанного пространства к вентиляционной струе и притоком воздуха в лаву из выработанного пространства получена формула

$$G_{II} = G_{II} \frac{(1 + \rho i_1) \varphi - (1 + \rho) i_1}{(1 - i_1)(1 + \rho)},$$

где G_{II} — дебит газа в лаве; G_{II} — дебит газа на участке; ρ — коэффициент утечек для участка; i_1 — коэффициент, характеризующий приток воздуха в лаву из выработанного пространства; φ — отношение величин концентраций газа на выходе из лавы (C_{II}) — и в исходящей струе участка (C_{II}).

Коэффициенты ρ и i_1 определяются по измеренным расходам воздуха — подаваемого на участок (Q_{II}), достигающего лавы (Q_{II}) и в струе на выходе из лавы (Q_{II}):

$$\rho = \frac{Q_{II} - Q_{II}}{Q_{II}}, \quad i_1 = \frac{Q_{II} - Q_{II}}{Q_{II} - Q_{II}}.$$

Глава III. ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ

Две причины могут определять газовую нестационарность в выработках: нестационарность источников газа и изменение условий проветривания (аэродинамическая нестационарность).

Нестационарность источников газа определяется изменением во времени их интенсивности или геометрии.

При изменении условий проветривания отдельных выработок или шахты в целом нарушается динамическое равновесие между выделением газа и выносом его вентиляционными струями. Статическая (квазистатическая) картина распределения газа в вентиляционной сети сменяется на более или менее длительный период неустановившейся (переходной) картиной распределения концентрации газа в проветриваемых объемах выработок. Ввиду значительной протяженности шахтных выработок и большой разветвленности шахтной вентиляционной сети газовая нестационарность, во-первых, может сохраняться в течение продолжительного времени и, во-вторых, принимать весьма разнообразный вид.

Достаточная определенность в анализе газовой нестационарности может быть получена на основе зависимостей, описывающих процесс распространения газообразной примеси в потоке воздуха.

В работе рассмотрены краевые условия и определяющие параметры процесса, определены наиболее характерные черты этого процесса. Дан анализ упрощенной модели механизма распространения газа вдоль единичной выработки с сосредоточенными источниками газа при скачкообразном изменении расхода воздуха. Упрощение состоит в пренебрежении зоной плавного перехода концентрации газа от начального установившегося уровня к новому уровню. Это упрощение тем менее существенно, чем большие длины выработок имеются в рассмотрении.

Изменение концентрации газа во времени в пункте, отстоящем от источника на расстоянии λ , описывается формулой

$$C(\tau) = \begin{cases} \frac{G}{Q_1} & \tau < \frac{\lambda}{v_1} \\ \frac{G}{Q_2} & \tau \geq \frac{\lambda}{v_2} \end{cases}$$

где Q_1, Q_2 - начальный и измененный расходы воздуха в выработке; v_1, v_2 - соответствующие скорости воздуха.

Приращение концентрации газа, вызванное уменьшением расхода воздуха от величины Q_1 до величины Q_2 ,

$$\Delta C = C_1 \left(\frac{Q_1}{Q_2} - 1 \right).$$

Такое же приращение концентрации вызвал бы дополнительный (фиктивный) источник газа с дебитом

$$G' = \Delta C \cdot Q_1 > 0,$$

где C_1 - начальная установившаяся концентрация газа в выработке.

Увеличение расхода воздуха ($Q_2 > Q_1$) эквивалентно прекращению действия источника газа ($G' < 0$). Отсюда следует, что аэродинамическая нестационарность может быть формально сведена к нестационарности источников газа. По отношению к газовой обстановке в выработках нестационарность источников газа и аэродинамическая нестационарность могут рассматриваться, в известном смысле, как эквивалентные друг другу.

В работе показано, что наличие нескольких источников газа усложняет вид газовой нестационарности: кроме начального и конечного установившихся уровней, концентрация газа проходит некоторые промежуточные значения, число которых растет с числом источников газа: при двух источниках газа - один промежуточный уровень, при трех - три и т.д.

При действии в выработке двух источников газа, отстоящих друг от друга на расстояние a , концентрация газа в пункте, удаленном от второго источника на расстояние λ , описывается формулой

$$C(\tau) = \begin{cases} \frac{G_1 + G_2}{Q_1} & 0 < \tau < \frac{a}{v_2} \\ C_H + \frac{G_2}{Q_2} & \frac{a}{v_2} < \tau < \frac{a + \lambda}{v_2} \\ \frac{G_1 + G_2}{Q_2} & \tau \geq \frac{a + \lambda}{v_2} \end{cases}$$

С целью определения критериев, оценивающих степень соответствия упрощенного представления о механизме распространения газа действительной картине, рассмотрено точное решение задачи о распространении газовой волны вдоль выработки.

Уравнение, описывающее изменение по оси x концентрации газа C в выработке, имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (13)$$

где K - коэффициент продольной турбулентной диффузии, $m^2/сек.$

В работе рассмотрены решения уравнения (13) для нескольких видов краевых условий:

$$C(x, 0) = \begin{cases} C_2 & \text{при } x < 0 \\ 0 & \text{при } x > 0 \end{cases}; \quad (14)$$

$$C(x, 0) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < 0 \\ C_1 & \text{при } x > 0 \end{cases}; \quad (15) \quad C(x, 0) = \begin{cases} C_2 & \text{при } x < 0 \\ C_1 & \text{при } x > 0 \end{cases}. \quad (16)$$

Соответствующие условиям (I5) и (I6) решения уравнения (I4) таковы:

$$C(x, t) = \frac{C_1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{kt}} \right) \right]; \quad (I7)$$

$$C(x, t) = \frac{C_2 - C_1}{2} \left[1 - \Phi \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{kt}} \right) \right] + C_1; \quad C_2 > C_1; \quad (I8)$$

$$C(x, t) = \frac{C_1 - C_2}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{kt}} \right) \right] + C_2; \quad C_2 < C_1. \quad (I9)$$

На основании формул (I7-I9) определены длина зоны переменной концентрации газа L и период T полного прохождения зоны через сечение, отстоящее от начального на расстояние X :

$$L = m\sqrt{kt} = m\sqrt{\frac{KX}{v}}; \quad (20) \quad T = m\sqrt{\frac{KX}{v_3}},$$

где $m = 7,2$ при точности расчета 1% и $m = 5$ при точности 10%.

Чтобы не пользоваться табличными значениями функции Φ , входящей в выражения (I7-I9), выведены следующие приближенные формулы:

$$C(x, t) = C_1 + (C_2 - C_1) \left(\frac{x - vt}{L} + \frac{1}{2} \right);$$

$$C(x, t) = C_2 + (C_1 - C_2) \left(\frac{x - vt}{L} + \frac{1}{2} \right),$$

где величина L определяется по формуле (20).

Приведенные выше зависимости являются основой для аналитического решения целого ряда задач о распределении газа в потоке, в котором действуют источники газа различного вида.

Например, для мгновенного неподвижного точечного источника

$$C(x, t) = \frac{G}{2S\sqrt{\pi kt}} \exp \left[-\frac{(x - vt)^2}{4kt} \right],$$

для импульсного неподвижного источника

$$C(x, t) = \frac{g}{2Sv} \left\{ \Phi \left[\frac{x - v(t - t_0)}{2\sqrt{k(t - t_0)}} \right] - \Phi \left(\frac{x - vt}{2\sqrt{kt}} \right) \right\} \quad \text{и т.д.}$$

Получены формулы, описывающие газовую динамику выработки, в которой действует подвижный источник газа. В этом случае при движении источника по потоку средняя концентрация газа перед источником выше, чем за источником, движущимся против потока, причем отношение этих величин равно $\frac{v+u}{v-u}$ (v - скорость вентиляционной струи, u - скорость источника газа). При значениях u , соизмеримых со скоростью воздуха v , например, при струговой выемке, это отношение может составлять большую величину (1,5-2,0).

В работе дан также общий анализ газовой динамики камерообразных выработок для случая резкого (неплавного) изменения расхода воздуха, поступающего в камеру, в которой непрерывно с постоянной интенсивностью выделяется газообразная примесь. Показано, что в этом случае нестационарный процесс проветривания камеры в период после изменения расхода воздуха описывается формулой

$$C(t) = (C_1 - C_2)e^{-t/T_*} + C_2, \quad (21)$$

где C_1, C_2 - начальная и конечная установившиеся концентрации газа в камере (при подаче количеств воздуха Q_1 и Q_2 , соответственно), t - текущее время, T_* - постоянная времени.

Постоянная времени в формуле (21) характеризует интенсивность воздухообмена в камере при подаче в нее воздуха в количестве Q_2 :

$$T_* = \frac{W_n}{Q_2} = \frac{W}{KQ_2},$$

где W_n - приведенный проветриваемый объем камеры, W - геометрический объем камеры, K - коэффициент турбулентной диффузии по В.Н.Воронину.

Глава IV. ПЕРЕХОДНЫЕ ГАЗОВЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ РЕЗКОМ (НЕПЛАВНОМ) ИЗМЕНЕНИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЕТВЕЙ С ОДИНАКОВЫМ (КВАДРАТИЧНЫМ) ЗАКОНОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В шахтных вентиляционных сетях весьма распространены параллельные соединения двух и более выработок. Они являются основой развития (разветвления) сети. По этой причине, а также ввиду

того, что газовая нестационарность в исходящих струях параллельных соединений может принимать самый различный (а иногда даже парадоксальный) вид, необходимо исчерпывающее исследование нестационарных газовых режимов, свойственных этому виду вентиляционного соединения.

Глава IV посвящена аналитическому исследованию газовой нестационарности, которая возникает в параллельном соединении из двух квадратичных вентиляционных струй при резком (неплавном) изменении аэродинамических параметров.

Показано, что первым шагом на этом пути является рациональный выбор определяющих параметров. В качестве таких параметров приняты общий расход воздуха в соединении Q_i и один из коэффициентов, определяемых отношением аэродинамических сопротивлений ветвей - K_{1j} или K_{2j} :

$$Q_i = (1 + K_{1j}) q_{1ij} = (1 + K_{2j}) q_{2ij};$$

$$K_{1j} = \sqrt{\frac{R_{1j}}{R_{2j}}}; \quad K_{2j} = \sqrt{\frac{R_{2j}}{R_{1j}}},$$

где R_{1j} , R_{2j} - сопротивления ветвей I и 2; q_{1ij} , q_{2ij} - расходы воздуха в ветвях I и 2; индекс i соответствует расходу воздуха, индекс j - сопротивлению; индексы i и j могут принимать всего два значения: I - при неизменности соответствующих параметров и 2 - при их изменении.

В работе установлено, что вслед за резким изменением аэродинамических параметров концентрация газа в исходящей струе параллельного соединения последовательно принимает четыре характерных значения: начальное установившееся d_H , первое пиковое A_{ij} , второе пиковое B_{ij} или B_{2ij} и конечное установившееся d_{ij} .

Общая формула, описывающая переходный газовый режим, имеет вид

$$d(t) = \begin{cases} d_H & 0 \geq t \\ \frac{C_{11j} + C_{21j} K_{1j}}{1 + K_{1j}} & 0 \leq t \leq T_{1ij} \\ \frac{C_{1ij} + C_{2ij} K_{1j}}{1 + K_{1j}} & T_{1ij} \leq t \leq T_{2ij} \\ \frac{C_{1ij} + C_{2ij} K_{1j}}{1 + K_{1j}} & t \geq T_{2j} \end{cases} \quad (22)$$

формула (22) дает решение прямой задачи о переходных газовых режимах.

Более сложной в теории переходных газовых режимов является обратная задача. Суть ее состоит в том, чтобы, во-первых, выявить все качественно различные виды переходных газовых режимов и, во-вторых, установить соответствие между областью изменения определяющих аэродинамических параметров и сопряженным с этой областью видом переходных газовых режимов.

Решение обратной задачи складывается из следующих этапов:

I. Определяется множество несимметричных взаимно исключаящих соотношений между четырьмя величинами (по числу характерных концентраций газа в переходных режимах). В работе показано, что таких соотношений насчитывается 37. Каждое из них характеризует определенный вид переходного газового режима, т.е. возможное соотношение между концентрациями газа.

2. Устанавливаются условия, определяющие вид переходного газового режима для каждой из возможных начальных газовых ситуаций, описываемых уравнениями (II). Например, для ситуации $C_{11j} > d_H > C_{21j}$ эти условия имеют вид, приведенный в табл. I.

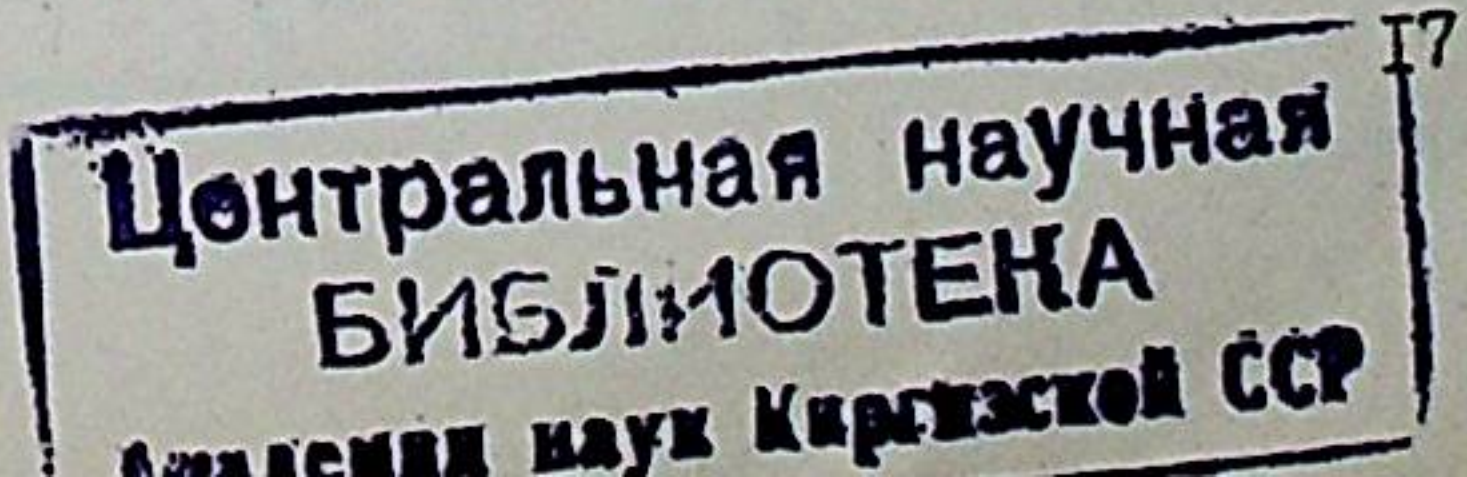
Таблица I

	d_H	A_{ij}	B_{ij}	d_{ij}
$d_H \leq$		$\varepsilon_1 \leq 1$	$\varepsilon_1 \geq \psi$	$\alpha_1 \geq 1$
$A_{ij} \leq$	$\varepsilon_1 \geq 1$		$\varepsilon_1 \geq \beta$	$\varepsilon_1 \geq \varphi$
$B_{ij} \leq$	$\varepsilon_1 \leq \psi$	$\varepsilon_1 \leq \beta$		$\varepsilon_1 \leq \gamma$
$d_{ij} \leq$	$\alpha \leq 1$	$\varepsilon_1 \leq \varphi$	$\varepsilon_1 \geq \gamma$	

Соответствующие тому или иному соотношению между характерными величинами концентраций газа условия находятся на пересечении вертикальных столбцов и горизонтальных строк табл. I: $d_H \geq A_{ij}$ при $\varepsilon_1 \geq 1$, $A_{ij} \geq B_{ij}$ при $\varepsilon_1 \leq \beta$ и т.д.

Указанные в табл. I безразмерные параметры $\varepsilon_1, \alpha, \beta, \gamma, \varphi, \psi$ определяются формулами

$$\varepsilon_1 = \frac{K_{1j}}{K_H}; \quad (23) \quad \alpha = \frac{Q_1}{Q_i}; \quad (24) \quad \beta = \frac{Q_i - q_{11j}}{q_{21j}}. \quad (25)$$



$$\gamma = \frac{q_{II}}{Q_i - q_{2II}}; \quad (26) \quad \psi = \frac{G - \alpha G_1}{K_H [Q_1 (C_{2II} - d_H) + \alpha G_1]}; \quad (27)$$

$$\varphi = \frac{G - Q_i C_{II}}{K_H (Q_i C_{2II} - G)}. \quad (28)$$

Здесь G , G_1 и G_2 - дебиты газа, соответственно суммарный, в ветви 1 и в ветви 2.

3. При помощи таблиц, подобных табл. 1, определяются возможные виды переходных режимов для каждой начальной газовой ситуации. Этот анализ сводится к графоаналитическому определению совместности систем, состоящих из шести соотношений (неравенств и равенств). Например, возможность переходного режима вида $d_1 > A > B > d_2$ устанавливается путем определения совместности следующей системы неравенств:

$$d_1 > A, \quad A > B, \quad B > d_2, \quad d_1 > B, \quad d_1 > d_2, \quad A > d_2.$$

В результате анализа установлена вся гамма возможных видов переходных газовых режимов (табл. 2). Многие виды переходных режимов сопровождаются всплесками концентрации газа при увеличении расхода воздуха. Это обстоятельство вызывает необходимость проверки при анализе явления переходных газовых режимов соблюдения закона сохранения массы. В работе выполнена эта проверка и показано, что основные зависимости не только не противоречат указанному закону, но, более того, могут быть выведены из него.

Глава У. ПЕРЕХОДНЫЕ ГАЗОВЫЕ РЕЖИМЫ
ПРИ РЕЗКОМ (НЕПЛАВНОМ) ИЗМЕНЕНИИ
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЕТВЕЙ
С РАЗЛИЧНЫМИ ЗАКОНАМИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Связь между аэродинамическими параметрами параллельного соединения в данном случае такова:

$$Q_i = q_{2ij} + K_j q_{2ij}^2; \quad K_j = \frac{R_{2m}}{R_{1n}},$$

Таблица 2

№ п.п.	Соотношения между величинами концентраций газа в переходных газовых режимах	График переходного процесса	Начальные газовые ситуации				
			$C_{II} > d_{2II}$	$C_{2II} > C_{II}$	$C_{II} = d_{2II}$	$C_{II} > d_{2II} = 0$	$C_{2II} > C_{II} = 0$
1	2	3	4	5	6	7	8
I	$d_1 > A > B > d_2$		+	+	-	-	-
2	$A > d_1 > B > d_2$		+	+	-	-	-
3	$A > B > d_1 > d_2$		-	+	-	-	-
4	$d_1 > B > A > d_2$		+	-	-	-	-
5	$B > d_1 > A > d_2$		+	-	-	-	-
6	$B > A > d_1 > d_2$		-	+	-	-	-
7	$d_1 > d_2 > A > B$		-	+	-	-	-
8	$d_1 > d_2 > B > A$		-	-	-	-	-
9	$A > d_1 > d_2 > B$		+	-	-	-	-
10	$d_1 > A > d_2 > B$		+	-	-	-	-
II	$d_1 = A > B > d_2$		+	-	-	-	-
I2	$A = B > d_1 > d_2$		-	+	-	-	-
I3	$d_1 = B > A > d_2$		+	-	-	-	-

Продолжение табл. 2

I	2	3	4	5	6	7	8
I4	$d_1 = A = B > d_2$		+	-	-	-	+
I5	$B > d_1 > d_2 > A$		+	-	-	-	-
I6	$d_1 > B > d_2 > A$		+	-	-	-	-
I7	$A > d_1 = B > d_2$		-	+	-	-	-
I8	$B_{121} > d_1 = A_{21} > d_2$		-	-	+	-	-
I9	$d_1 > A > B = d_2$		-	+	-	+	-
20	$A > d_1 > B = d_2$		+	-	-	+	-
21	$A = B > d_1 = d_2$		-	-	-	-	-
22	$d_1 > B > A = d_2$		-	-	-	-	-
23	$B > d_1 > A = d_2$		+	-	-	-	-
24	$B_{112} > A_{12} > d_1 = d_2$		-	+	-	-	-
25	$d_1 > A = d_2 > B$		-	+	-	-	-
26	$A_{12} > d_1 = d_2 > B$		+	+	-	-	-
27	$d_1 > d_2 = B > A$		-	-	-	+	-
28	$d_1 > d_2 > A = B$		-	-	-	-	+

Продолжение табл. 2

I	2	3	4	5	6	7	8
29	$B > d_1 > d_2 > A$		+	-	-	-	-
30	$A_{21} = d_1 > d_2 > B_{121}$		-	-	+	-	-
31	$d_1 > A = B = d_2$		-	-	-	+	+
32	$d_1 = A_{21} > B_{121} > d_2$		-	-	+	+	-
33	$d_1 = A_{21} = B_{121} > d_2$		-	-	+	-	+
34	$d_1 = B > A = d_2$		-	-	-	-	-
35	$d_1 = d_2 > A_{12} = B_{112}$		-	-	-	-	+
36	$d_1 = B_{112} = d_2 > A_{12}$		-	-	-	+	-
37	$d_1 = A_{12} = d_2 > B_{112}$ $d_1 = A_{21} = d_2 > B_{121}$		-	-	+	-	-

Примечание. Знак "+" означает возможность, знак "-" невозможность возникновения того или иного вида ПР для данной начальной газовой ситуации.

где индексы m и n могут принимать значения I или 2 в зависимости от того, изменена или нет данная величина аэродинамического сопротивления.

Значения пиковых концентраций газа в переходном режиме определяются в данном случае формулами

$$A_{ij} = \frac{C_{2m} + C_{1n} K_j Q_{2ij}}{1 + K_j Q_{2ij}};$$

$$B_{ij} \equiv B_{2ij} = \frac{C_{2ij} + C_{1n} K_j Q_{2ij}}{1 + K_j Q_{2ij}}.$$

Условия, определяющие соотношения между характерными величинами концентраций газа в переходном режиме для начальной газовой ситуации $C_{1H} > d_H > C_{2H}$, указаны в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

	d_H	A_{ij}	B_{ij}	d_{ij}
$d_H \leq$		$\varepsilon \geq \alpha$	$\varepsilon \geq \delta$	$\alpha \geq 1$
$A_{ij} \leq$	$\varepsilon \leq \alpha$		$\varepsilon \geq \beta$	$\varepsilon \leq \xi$
$B_{ij} \leq$	$\varepsilon \leq \delta$	$\varepsilon \leq \beta$		$\varepsilon \leq \gamma^2$
$d_{ij} \leq$	$\alpha \geq 1$	$\varepsilon \geq \xi$	$\varepsilon \geq \gamma^2$	

Безразмерные параметры, входящие в табл. 3, определяются формулами

$$\varepsilon = \frac{K_j}{K_1}, \quad \delta = \frac{(d_H Q_i - G_1) C_{1H}}{K_1 [Q(C_{1H} - d_H) + G_1]^2};$$

$$\xi = \frac{(C_{1H} - C_{2H})(G - C_{2H} Q_i)}{K_1 (C_{1H} Q_i - G)^2}$$

Параметры α , β и γ определяются по формулам, приведенным в гл. IV.

Результаты анализа показывают, что в соединениях из разнородных (по закону сопротивления) ветвей возможно возникновение большого числа переходных режимов различного вида.

Г л а в а VI. ПЕРЕХОДНЫЕ ГАЗОВЫЕ РЕЖИМЫ ПРИ ПЛАВНОМ ИЗМЕНЕНИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Анализ ПГ-режимов, вызванных плавным изменением аэродинамических параметров, значительно сложнее, чем анализ этого явления для случая резкого изменения параметров.

В диссертации разработана теория ПГ-режимов для двух случаев изменения определяющих параметров: расход воздуха плавно изменяется при постоянстве сопротивления ветвей; аэродинамическое сопротивление ветвей плавно изменяется при постоянстве расхода воздуха. При этом любая из трех величин - Q , q_1 и q_2 (Q - общий

расход воздуха, q_1 и q_2 - расходы воздуха в ветвях параллельного соединения) - может быть принята в качестве параметра-аргумента, зависящего от времени. Простейшим, но достаточно общим законом изменения параметра-аргумента, является линейный:

$$q_1(\tau) = q_{1H} + m\tau, \quad q_2(\tau) = q_{2H} + n\tau, \quad Q(\tau) = Q_1 + p\tau.$$

При анализе ПГ-режимов, вызываемых плавным изменением аэродинамических параметров, большое значение имеет правильное определение временных характеристик и в первую очередь периода однократного обмена воздуха в объеме ветви. Необходимо различать период первого однократного обмена воздуха в объеме ветви и последующие периоды. Период первого однократного обмена является некоторой фиксированной величиной, периоды последующего обмена - переменные величины, зависящие от времени.

Первый однократный обмен воздуха в ветви I (объем W_1) определяется формулой

$$T_1 = \frac{1}{\rho} \left[\sqrt{Q + 2\rho(1 + \kappa_H)W_1} - Q_1 \right],$$

а в ветви 2 (объем W_2) - формулой

$$T_2 = \frac{1}{n} \left(\sqrt{q_{2H}^2 + 2nW_2} - q_{2H} \right).$$

Формулы ПГ-режимов, возникающих при плавном изменении расхода воздуха, имеют довольно сложный вид:

$$d(\tau) = \frac{1}{Q(\tau_*)} \begin{cases} d_H Q(\tau) & 0 \leq \tau \leq \tau_3 \\ \frac{G_1 q_1(\tau)}{q_1[(\tau - \tau_3)]} + C_{2H} q_2(\tau) & \tau_3 \leq \tau \leq \tau_4 \\ G_1 + C_{2H} q_2(\tau_*) & \tau_4 \leq \tau \leq \tau_5 \\ G_1 + \frac{G_2 q_2(\tau_*)}{q_2[(\tau - \tau_5)]} & \tau_5 \leq \tau \leq T \\ G_1 + G_2 & \tau \geq T \end{cases}$$

где τ_* - момент прекращения изменения расхода воздуха ($\tau_* < T_1$), τ_3, τ_4, τ_5 - характерные промежуточные моменты времени, T - момент окончания переходного газового режима.

Анализ явления ПГ-режимов для случая плавного изменения аэродинамического сопротивления показывает, что существующие зависимости принимают наиболее простой вид в том случае, когда сопро-

тивления ветвей параллельного соединения изменяются по гиперболическим законам:

$$K_1(\tau) = \frac{Q_{2H} + m\tau}{Q_{1H} - m\tau}; \quad K_2(\tau) = \frac{Q_{1H} - m\tau}{Q_{2H} + m\tau}.$$

При этом расходы воздуха в ветвях изменяются по законам

$$Q_1(\tau) = Q_{1H} - m\tau; \quad Q_2(\tau) = Q_{2H} + m\tau; \quad Q = const.$$

При плавном изменении аэродинамических параметров в исходящей струе параллельного соединения возникают ПГ-режимы, качественный вид которых совпадает с видом ПГ-режимов, возникающих при резком изменении условий проветривания; отличие состоит только в том, что первые имеют больший период и большую плавность изменения концентрации газа.

Глава УП. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель экспериментов заключалась в получении опытных графиков ПГ-режимов и в проверке соответствия между видами ПГ-режимов, наблюдаемыми в эксперименте, и результатами теоретического анализа.

Кроме того, натурные эксперименты доставляют материал, подтверждающий исходные представления о процессе продольной турбулентной диффузии газа в воздуховодах большой протяженности.

Натурные эксперименты были проведены на газообильных участках с линейным и квадратичным законами сопротивления выработанного пространства. Эксперименты проводились в ремонтные смены и состояли в определении начальной (установившейся) газовой ситуации на участке и переходного газового режима, возникающего вслед за изменением условий проветривания.

Интервал между смежными измерениями скорости воздуха составлял 10 мин. Интервал между смежными измерениями концентрации газа в начале переходного газового режима был равен 1-2 мин, а затем увеличился до 5 мин. Эксперименты включали определение закона сопротивления выработанного пространства по результатам измерения расходов воздуха и утечек через выработанное пространство в двух режимах проветривания.

Показатель степени в законе сопротивления определяется по формуле $n = \frac{2}{n_1}$.

где

$$n_1 = \frac{\lg Q_2/Q_1}{\lg Q_{12}/Q_{11}},$$

Q_{11}, Q_{12} - количества воздуха, поступающего в лаву в двух различных режимах проветривания; Q_1, Q_2 - соответствующие утечки через выработанное пространство.

Эксперименты во всех случаях показали хорошее качественное совпадение с результатами теоретического анализа: экспериментально наблюдавшиеся виды переходных газовых режимов полностью соответствуют тем видам переходных режимов, которые были выявлены аналитически.

В количественном отношении наилучшее совпадение с теоретическим анализом показало измерение второй пиковой концентрации газа в переходных газовых режимах.

Результаты шахтных экспериментов на участках с обратным ходом отработки пласта также качественно (т.е. по виду режимов) совпадают с результатами теоретического анализа.

Наблюдения за переходными газовыми режимами дают возможность, кроме того, косвенно определить пустотность аэродинамически активной части выработанного пространства:

$$\delta = \frac{T_{2ij} Q_{2ij}}{V},$$

где T_{2ij} - продолжительность однократного обмена воздуха в выработанном пространстве после изменения условий проветривания участка; Q_{2ij} - утечки воздуха через выработанное пространство при измененном режиме проветривания; V - геометрический объем аэродинамически активной части выработанного пространства.

Результаты экспериментов показывают, что определенная описанным методом пустотность выработанного пространства $\delta \approx 0,15 \div 0,20$.

В главе УП описаны также методика и результаты опытов на гидромодели с использованием анилиновой краски для имитации примеси.

Лабораторные эксперименты (на гидромодели) дополнительно подтвердили соответствие между результатами теоретического анализа переходных газовых режимов и наблюдаемыми в физическом опыте реализациями этого явления.

В опытах на гидромодели были осуществлены следующие комбинации изменений расхода Q и сопротивления R :

$$Q = \text{var} ; \quad Q = \text{const} ; \quad Q = \text{var} ; \\ R = \text{const} ; \quad R = \text{var} ; \quad R = \text{var} .$$

Это дало возможность наблюдать в опытах на гидромодели более широкую гамму видов переходных газовых режимов, чем в натуральных экспериментах.

Глава УШ. НЕКОТОРЫЕ ЧАСТНЫЕ ЗАДАЧИ

Аэрогазодинамика вентиляционных сетей угольных шахт содержит множество разнообразных задач. Главная цель настоящего исследования состояла в разработке общего подхода к постановке и решению наиболее характерных из этих задач.

Рассмотрение отдельных задач об аэрогазодинамике вентиляционной сети угольной шахты не ограничивается только анализом типовых ситуаций, но, вместе с тем, дает возможность сделать более направленными и поиски соответствующего синтеза, т.е. способов активного управления газовым уровнем в выработках при помощи вентиляционных средств. Кроме того, с аэрогазодинамикой тесно связаны некоторые общие вопросы конструирования рациональных вентиляционных сетей, анализ газовых условий в шахте в аварийных ситуациях, а также разработка новых методов экспериментального определения аэродинамических параметров выработок.

Глава УШ посвящена рассмотрению следующих вопросов.

1. Комбинированное проветривание лавы (за счет общешахтной депрессии в сочетании с установками частичного проветривания). Этот способ дает возможность увеличить интенсивность воздухообмена в призабойном пространстве без необходимости чрезмерного увеличения продольной скорости воздуха. Он состоит в том, что дополнительно к основной вентиляционной струе, направляемой в лаву за счет общешахтной депрессии, для проветривания лавы предлагается использовать две установки частичного проветривания: отсасывающую с вентилятором на вентиляционном штреке и нагнетательную с вентилятором на откаточном штреке. Отсасывающий и нагнетательный воздухопроводы должны прокладываться на всю длину лавы и иметь в стенках распределенные отверстия.

Эффект от осуществления комбинированного способа проветривания газообильной лавы оценивается на основе общего уравнения (8),

которое для $q_1(x) = q_1 = \text{const}$, $q_2(x) = q_2 = \text{const}$ и $g(x) = g = \text{const}$ приводит к следующему дифференциальному уравнению, описывающему эпюру продольной загазованности лавы:

$$\frac{dc}{dx} + \frac{Ac}{Q_0 + Bx} = \frac{g}{Q_0 + Bx} . \quad (29)$$

Общее решение уравнения (29) имеет вид

$$c(x) = \frac{g}{A} + \left(c_0 - \frac{g}{A} \right) \left(1 - \frac{Bx}{Q_0} \right)^{-A/B} ,$$

где $A = q_1 + g$; $B = g + q_1 - q_2$; q_1 - количество чистого воздуха, поступающего в лаву по нагнетательному воздухопроводу на каждом метре его длины, м³/мин·м; q_2 - количество газовой смеси, отбираемой отсасывающим воздухопроводом на каждом метре длины, м³/мин·м.

Если отсасывающий трубопровод расположить в такой зоне поперечного сечения, в которой концентрация в K раз отличается от средней концентрации газа в данном сечении, то формула для эпюры концентрации газа принимает вид

$$c(x) = M + (c - M) \left(1 + \frac{Bx}{Q_0} \right)^{-\alpha} ,$$

где

$$M = \frac{g}{A + (K-1)q_2} ; \quad \alpha = \frac{g}{BM} .$$

Чем больше, при прочих равных условиях, величина коэффициента K , тем эффективнее будет способ комбинированной вентиляции лавы.

При $q_1(x) = q_2(x) = \text{const}$ эпюра загазованности лавы, проветриваемой по комбинированному способу, может быть описана экспоненциальной формулой

$$c(x) = \frac{g}{Kq} \left(1 - e^{-x/\chi_*} \right) , \quad (30)$$

где $\chi_* = \frac{Q_0}{Kq}$ - константа расстояния, м.

Формула (30) удобна для оценки эффективности и расчета параметров комбинированного способа проветривания лавы.

2. Управление газовым режимом в лаве путем регулирования скорости подачи выемочной машины. В тех случаях, когда количество воздуха в лаве вследствие утечек в выработанное пространство постепенно уменьшается по ее длине от величины $Q_{лн}$ (внизу лавы) до величины $Q_{лв}$ (вверху лавы), определенного эффекта в

снижении концентрации газа в исходящей вентиляционной струе лавы можно достигнуть путем регулирования скорости подачи выемочной машины.

В работе показано, что для поддержания количества газа в исходящей струе лавы на минимальном уровне необходимо движение машины в направлении снизу вверх (по струе) сделать равнозамедленным, а в обратном направлении - равноускоренным. При этом необходимые скорости подачи машины в нижнем v_n и верхнем v_b положениях в лаве определяются по формулам:

$$v_n = \frac{2\bar{v}}{2-i};$$

$$v_b = \frac{2(1-i)\bar{v}}{2-i},$$

где \bar{v} - средняя скорость подачи выемочной машины, определяемая по заданной производительности машины; i - коэффициент утечек, определяемый по формуле

$$i = \frac{Q_{лн} - Q_{лв}}{Q_{лв}}.$$

Величина необходимого замедления (и соответственно ускорения при движении сверху вниз)

$$w = \frac{i(2-i)v_n^2}{2L},$$

где L - длина лавы.

Снижение количества газа в исходящей струе лавы, которого можно достигнуть в результате осуществления данного способа регулирования работы выемочной машины (без снижения ее производительности), определяется относительной величиной:

$$\delta = \frac{i}{2-i}.$$

3. Проектирование переходного газового режима заданного вида. В результате совершенствования организации работ и повышения надежности шахтных машин и механизмов увеличивается коэффициент машинного времени забойных машин. Это сопровождается увеличением длительности периодов повышенного газовыделения в лавах и возрастанием концентрации газа в ветвях шахтной вентиляционной

сети. В таких условиях большое значение приобретает возможность гибкого управления газовым уровнем в выработках путем периодического регулирования вентиляции и перераспределения воздуха в шахтной вентиляционной сети.

Полное представление о возможных видах переходных газовых режимов и условиях, необходимых и достаточных для их возникновения, позволяет решать задачу о направленном аэродинамическом управлении газовым уровнем в выработках выемочного участка путем осуществления переходных газовых режимов заданного вида и длительности. В работе дан метод решения этой задачи, который заключается в следующем. Сначала экспериментально определяется начальная газовая ситуация и вычисляются безразмерные параметры β , γ , ψ и φ по формулам (25-28). Затем из набора видов переходных режимов, соответствующего установленной начальной газовой ситуации, выбирается вид режима (табл. 2), позволяющий изменить заданным образом концентрацию газа в исходящей струе участка. Как было показано, каждому из видов переходных режимов соответствует своя область изменения параметров α и ε_1 . Если бы задача состояла только в воспроизведении качественного вида переходного режима, то задачу можно было считать решенной после того, как выявлена область изменения параметров α и ε_1 , сопряженная с данным видом переходного режима. Однако представляет интерес также и длительность переходного режима, задание которой равносильно установлению определенной связи между параметрами α и ε_1 :

$$Q_1 = \alpha q_{1ij} (1 + K_{11} \varepsilon_1). \quad (31)$$

Если кривая, определяемая формулой (31), проходит в плоскости (α, ε_1) через область, соответствующую выбранному виду переходного режима, то это означает, что возможно осуществление выбранного режима с заданной длительностью.

Задача о проектировании переходных газовых режимов допускает однозначное решение, если наряду с длительностью режима задать также величину второй пиковой концентрации газа:

$$B_{2ij} = \frac{G_1}{1 + K_{11} \varepsilon_1} + \frac{\delta_2 \alpha}{Q_1}. \quad (32)$$

При заданной величине B_{2ij} уравнению (32) соответствует в плоскости (α, ε_1) единственная кривая, которая в пересечении с линией (31) дает точку, соответствующую заданной продолжитель-

ности переходного режима и заданному уровню изменения концентрации газа.

4. Переходные газовые режимы при реверсии вентиляционной струи. Специальным видом изменения условий проветривания является реверсирование вентиляционной струи в аварийных ситуациях на шахте.

Подобно любому изменению аэродинамических параметров реверсия вызывает возникновение переходного газового режима в исходящих вентиляционных струях. Концентрация газа в реверсивной струе участка в переходном режиме проходит через три характерные величины: первую пиковую A , вторую пиковую B и установившуюся α .

В работе показано, что при квадратичном законе сопротивления выработанного пространства первая пиковая концентрация газа в реверсивной струе тождественна начальной установившейся концентрации газа в исходящей струе участка при нормальном режиме проветривания C_H , т.е. $A \equiv C_H$.

Вторая пиковая концентрация может быть определена по формуле

$$B = \frac{G_1}{Q_p} + \frac{G_2}{Q_H}$$

Установившаяся концентрация

$$d = \frac{G_1 + G_2}{Q_p}$$

где Q_H , Q_p — расходы воздуха в нормальном и реверсивном режимах проветривания.

Расчеты по приведенным формулам показывают хорошую сходимость с экспериментом (2-15%).

5. Связь между вопросами конструирования вентиляционных сетей и регулирования проветривания по газовому фактору. Проблема управления проветриванием горных выработок по газовому фактору тесно связана с вопросом конструирования рациональных вентиляционных сетей.

Задача регулирования проветривания по фактору "примесь" (газ и т.п.) в условиях разветвленной вентиляционной сети связана с установлением однозначного различия между долговременными изменениями в газовой обстановке, требующими регулирования вентиляционного процесса, и теми изменениями, которые являются следствием аэродинамической нестационарности и сохраняются относительно непродолжительное время.

При решении данной задачи в первую очередь определяется начальная аэрогазодинамическая ситуация в ветвях вентиляционной сети и соотношения между величинами, характеризующими эту начальную ситуацию в различных ветвях. Определение начальной газовой ситуации в вентиляционной сети является основой для системного подхода к проблеме регулирования проветривания по газовому фактору, своего рода "началом координат" для решения последующих, более сложных вопросов, связанных с определением газовой нестационарности, которая вызывается изменением условий проветривания.

Для соединения из двух параллельных ветвей в общем случае возможны начальные газовые ситуации пяти различных видов и весьма обширное множество видов переходных газовых режимов (табл.2). Даже незначительное усложнение сети (например добавление третьей ветви в параллельное соединение) в большой степени усложняет определение связи между изменением аэродинамических параметров и последующей газовой нестационарностью. Это объясняется тем, что с ростом числа ветвей в данном соединении быстро растет число определяющих аэродинамических параметров.

Для параллельного соединения из двух ветвей матрица аэродинамических коэффициентов имеет вид

$$\begin{vmatrix} 1 & K_{121} \\ K_{211} & 1 \end{vmatrix}, \quad (33)$$

где $K_{121} = \sqrt{\frac{R_{11}}{R_{21}}}$; $K_{211} = \sqrt{\frac{R_{21}}{R_{11}}}$,
 R_{11} , R_{21} — аэродинамические сопротивления ветвей I и 2 в начальном (первом) положении.

В соответствии с матрицей (33)
 $Q_1 = (1 + K_{121}) Q_{111}$; $Q_2 = (1 + K_{211}) Q_{211}$.

Из приведенных данных следует, что для параллельного соединения из двух ветвей имеется два независимых параметра, в качестве которых могут быть выбраны, например, пары величин:

$$(Q_1, K_{121}); (K_{211}, Q_{211}); (Q_1, Q_{111}) \text{ и т.д.}$$

Для соединения из n ветвей матрица аэродинамических коэффициентов имеет более сложный вид;

$$\begin{vmatrix} 1 & K_{121} & \dots & K_{1n1} \\ K_{211} & 1 & \dots & K_{2n1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n11} & K_{n21} & \dots & 1 \end{vmatrix},$$

в соответствии с чем

$$Q_1 = (1 + K_{121} + \dots + K_{1n1}) q_{11};$$

$$Q_2 = (K_{211} + 1 + \dots + K_{2n1}) q_{21};$$

$$\dots$$

$$Q_n = (K_{n11} + K_{n21} + \dots + 1) q_{n1}.$$

Число определяющих аэродинамических параметров соединения из n ветвей

$$N = \frac{n^2 - n}{2} + 1.$$

Число N быстро растет с увеличением числа ветвей n :

n	2	3	4	5	6	...
N	2	4	7	11	16	...

Увеличение числа определяющих параметров соединений вызывает непреодолимые затруднения уже на первом этапе анализа: при определении общих соотношений, характеризующих начальную газовую ситуацию.

Другая сложность состоит в том, что при увеличении числа ветвей всего на одну единицу сильно возрастает множество возможных видов переходных газовых режимов, возникающих вслед за изменением аэродинамических параметров. Так, например, для соединения из двух ветвей это множество содержит 74 вида переходных режимов, для трех ветвей оно возрастает до нескольких сотен.

Все изложенное приводит к выводу о том, что первое требование, предъявляемое к вентиляционной сети в связи с задачей однозначного управления проветриванием по газовому фактору, должно состоять в максимально возможном упрощении вентиляционной сети.

Наилучшим решением следует считать такое, которое ограничивает сложность сети наличием в ней только последовательных и параллельных соединений при условии объединения в каждом вентиляционном узле не более двух ветвей. В работе приведены сведения, показывающие, что подобную конструкцию имеют транспортные сети, известные в живой природе.

В ряде случаев требование максимальной простоты вентиляционной сети вполне совместимо с комплексом технологических требований, предъявляемых к сети горных выработок.

Тесная связь между топологией вентиляционной сети и вопросами регулирования проветривания по газовому фактору вызывает

необходимость рассматривать в качестве главного направления в проблеме шахтной вентиляции не разработку методов расчета сложных сетей, а создание научных основ конструирования простых и надежных сетей.

6. Новый способ определения аэродинамического сопротивления выработок. На основе эффекта рассеяния газообразной примеси в воздушном потоке в работе предложен новый способ определения коэффициента аэродинамического сопротивления выработок.

Способ заключается в том, что в начале исследуемой выработки в вентиляционную струю выпускается некоторый объем газа-индикатора. Одновременно с этим включается регистрирующий прибор, расположенный в конце исследуемого интервала выработки. Объем газа-индикатора по мере приближения к прибору рассеивается. Степень рассеяния определяется средней скоростью потока и коэффициентом турбулентной диффузии, величина которого зависит от шероховатости стенок выработки, нерегулярности ее сечения и кривизны выработки.

Если по записи регистрирующего прибора построить кривую изменения концентрации газа-индикатора $C(t)$ и определить точки пересечения (t_1 и t_2) этой кривой с горизонтальной прямой:

$$C\sqrt{t} = \frac{(C\sqrt{t})_{max}}{l},$$

то можно определить экспериментальную величину коэффициента турбулентной диффузии:

$$K = \frac{u^2(\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1})^2}{4},$$

где $u = \frac{l}{t_m}$ - средняя скорость воздушного потока; l - длина исследуемого участка выработки; t_m - абсцисса максимума на кривой $C(t)$.

В соответствии с известной формулой Тэйлора

$$K = 7,14 a u \sqrt{\beta}, \quad (34)$$

где a - гидравлический радиус выработки; β - коэффициент сопротивления Шези-Дарси.

Из формулы (34) следует

$$\alpha = \frac{K^2 g}{7,14^2 \cdot a^2 \cdot v \cdot 2g}$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная задача исследований, отраженных в диссертации, сводится к установлению связи между аэродинамическим состоянием вентиляционной сети и теми пространственными и временными характеристиками газового уровня в выработках, которые однозначно зависят от вентиляционных параметров (при известной начальной аэрогазодинамической ситуации и возможности ее изменения в заданном направлении).

Результаты исследований должны составить научную основу для проектирования оперативного и долгосрочного управления газовыми режимами в вентиляционной сети при помощи аэродинамических средств, для более рациональной организации вентиляционного процесса и для разработки проблемы автоматизации проветривания газообильных шахт.

Представляя в виде более или менее законченной системы комплекс вопросов о связи между вентиляционными параметрами и газовым уровнем в выработках, исследование в целом ведет к формированию нового направления в рудничной вентиляции — аэрогазодинамики вентиляционных сетей угольных шахт.

Результаты исследований заключаются в следующем.

I. Установлены наиболее общие зависимости, описывающие внешнюю динамику выделения газа через поверхности обнажения угольного пласта. На основе дифференциального уравнения для внешней газодинамики угля выявлены определяющие и предельные параметры этого процесса и установлены не известные ранее фундаментальные соотношения между ними. Общность полученных зависимостей дает возможность использовать их для описания газовой динамики подготовительных выработок и дегазационных скважин, для косвенного определения отношения между дебитами газа через поверхность обнажения пласта и из отбитого угля, а также ввести фактор времени в оценку газообильности шахт и выработок.

2. Исследован комплекс вопросов о газовой статике сквозных и тупиковых выработок, выемочных участков, параллельных вентиляционных соединений. Получили решение, в частности, задачи об эюре концентрации газа в лаве; об условиях, определяющих направление потока воздуха в выработанном пространстве; о распределении концентрации газа в тупиковых выработках при нагнетательном и всасывающем проветривании; об экспериментальном определении количества газа, поступающего в лаву из выработанного про-

странства; об определении распределения концентрации газа в выработанном пространстве по результатам газоздушных съемок в выработках, примыкающих к выработанному пространству.

3. Аналитически исследована газовая динамика выработок. Для типичных краевых условий даны решения дифференциального уравнения, описывающего процесс распространения газообразной примеси в турбулентном потоке воздуха. На основе указанных решений получены зависимости, описывающие продольную загазованность воздушных потоков в выработках в нестационарном режиме проветривания при различных видах источников газа; определены характерные параметры процесса (период прохождения через фиксированный пункт газовой волны переменной концентрации, длина и скорость перемещения зоны переменной концентрации газа); установлены приближенные зависимости для описания нестационарных процессов с учетом только конвективного переноса газа.

На основе анализа газовой динамики выработок предложен новый способ экспериментального определения коэффициента аэродинамического сопротивления горных выработок с использованием эффекта рассеяния газа-индикатора в турбулентном воздушном потоке.

4. Разработана теория не изученного ранее сложного явления — переходных газовых режимов, возникающих в вентиляционной сети при внесении в нее аэродинамических возмущений:

— раскрыта основная физическая сущность явления переходных газовых режимов, состоящая, во-первых, в том, что большая разница в периодах аэродинамической и газовой нестационарностей приводит к большому разрыву во времени между моментами изменения условий проветривания и установления нового стабильного уровня концентрации газа в выработках и, во-вторых, в том, что в разветвленной сети периоды газовой нестационарности в отдельных ветвях в общем случае не равны друг другу;

— на основе указанных представлений сформулирована и решена прямая задача о переходных газовых режимах, возникающих при резком (неплавном) изменении аэродинамических параметров соединений, состоящих из однородных по закону сопротивления ветвей (квадратичных), и соединений из разнородных ветвей (линейных и квадратичных);

— выявлена обширная гамма возможных видов переходных газовых режимов и определены необходимые и достаточные условия возникновения каждого из видов;

- разработан метод решения обратной задачи о переходных газовых режимах, заключающийся в определении множества значений аэродинамических параметров, однозначно сопряженных с переходным газовым режимом заданного вида и длительности;

- разработана теория переходных газовых режимов, возникающих при плавном изменении аэродинамических параметров;

Дополнительным результатом, вытекающим из теории переходных газовых режимов, явилась разработка метода определения пустотности аэродинамически активной части выработанных пространств.

5. Разработанный в работе анализ газовой статики и аэрогазодинамики выработок служит основой для синтеза в области изыскания новых способов управления газовым уровнем в выработках при помощи вентиляционных средств. В частности, в работе рассматриваются основания следующих способов: комбинированного проветривания лавы, сочетающего использование общешахтной депрессии и установок частичного проветривания; управления газовым уровнем в лаве путем специального регулирования скорости подачи выемочной машины; управления газовым уровнем в исходящих вентиляционных струях путем осуществления переходного режима заданного вида и длительности.

6. В работе получены простые, но достаточно точные зависимости, описывающие газовую динамику реверсивных вентиляционных струй.

7. В результате исследования комплекса вопросов об аэрогазодинамике вентиляционных сетей установлено, что проблема регулирования проветривания по газовому фактору оказывается тесно связанной с вопросом конструирования вентиляционных сетей.

Главное требование к газообильной вентиляционной сети, предъявляемое в связи с необходимостью управления проветриванием, состоит в максимально возможном упрощении сети. Оптимальной по фактору регулируемости является вентиляционная сеть, которая содержит только последовательные и параллельные соединения при дополнительном условии, что в каждом вентиляционном узле соединяется не более трех ветвей.

Основные результаты настоящей работы использованы следующим образом:

- опубликованные работы автора о переходных газовых режимах явились началом широкого систематического изучения газовой нестационарности в выработках, обусловленной изменением аэродинамических параметров шахтной вентиляционной сети;

- результаты исследований о переходных газовых режимах были переданы для использования комбинатам Луганскуголь и Донбассантрацит для руководства при оперативном изменении условий проветривания выемочных участков;

- методы определения основных аэродинамических параметров действующих выемочных участков и разделения составляющих газового дебита участков с различными схемами проветривания использованы при разработке способов борьбы со скоплениями метана на сопряжениях лав с вентиляционными штреками; соответствующие материалы переданы комбинату Донецкуголь, а также МНИПКИМпроекту Болгарской Народной республики; составлен проект "Руководства по борьбе с высокими концентрациями метана на сопряжениях лав с вентиляционными штреками";

- положение о необходимости конструирования для угольных шахт простых вентиляционных сетей, обеспечивающих устойчивость вентиляции и надежность ее регулирования по газовому фактору, отражено в "Основных технико-экономических направлениях развития угольной промышленности СССР на 1970-1975 гг.", в "Нормах технологического проектирования для угольных шахт", во "Временных положениях по разработке проектов новых и реконструкции действующих угольных шахт Донбасса на глубоких горизонтах", во "Временных положениях по разработке угольных пластов на глубоких горизонтах Воркутского месторождения Печорского бассейна", в "Руководстве по проектированию вентиляции угольных шахт", а также использовано в качестве одного из исходных требований при решении вопросов вентиляции в разработке ИГД им.А.А. Скочинского научных основ шахты будущего;

- по материалам исследований составлен проект "Руководства по аэродинамическим способам управления метановыделением в угольных шахтах в условиях Донбасса";

- метод определения пустотности выработанного пространства по результатам наблюдений за переходными газовыми режимами нашел применение в практике ВГСЧ при расчете активной емкости выработанного пространства - параметра, который необходимо знать при определении взрывоопасности пожарных участков после их изоляции.

Отдельные разделы работы в разное время докладывались на: научно-технической конференции по механизации и автоматизации проветривания угольных шахт и рудников (Киев, 1964 г.), Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции по вентиляции и

вентиляторостроению (Днепропетровск, 1968 г.), на научно-исследовательской конференции МГИ (1966 г.), объединенном семинаре ДГИ и ИГТМ АН УССР (Днепропетровск, 1970 г.), семинаре работников депрессионных съемок МУП СССР (Днепропетровск, 1970 г.) и МЦМ СССР (Ленинабад, 1970 г.), НТС Министерства угольной промышленности СССР (Москва, 1970 г.).

Часть результатов исследования была отмечена в конкурсе на лучшее предложение по борьбе с метаном в угольных шахтах (1961-1962 гг.) и в конкурсе на лучшее предложение по значительному увеличению нагрузки на очистной забой в опасных по метану шахтах (1966 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Клебанов Ф.С. Об управлении газовой выделением из выработанного пространства. - "Уголь", 1957, № 10.
2. Лидин Г.Д., Айруни А.Т., Клебанов Ф.С., Матвиенко Н.Г. Борьба со скоплениями метана в угольных шахтах. М., Госгортехиздат, 1961.
3. Клебанов Ф.С. Переходные газовые режимы в угольных шахтах при резком изменении аэродинамических параметров (случай $n = 1$). - "Известия АН СССР, ОТН, Металлургия и горное дело", 1963, № 4.
4. Клебанов Ф.С. Неустановившиеся газовые режимы в угольных шахтах при резком изменении аэродинамических параметров. М., ИГД им.А.А.Скочинского, 1963.
5. Клебанов Ф.С., Айруни А.Т. Зависимость метанообильности участка от количества подаваемого воздуха. - "Уголь", 1963, № 1.
6. Клебанов Ф.С. Неустановившийся газовый режим при плавном изменении подачи воздуха на участок. - В сб. Рудничная аэрогазодинамика и безопасность горных работ. М., "Наука", 1964.
7. Клебанов Ф.С. Аэродинамические методы управления метановыделением в угольных шахтах. М., ИГД им.А.А.Скочинского, 1964.
8. Клебанов Ф.С. О выделении метана в подготовительных выработках. - "Уголь", 1965, № 10.
9. Багриновский А.Д., Клебанов Ф.С. Теоретические вопросы автоматизации проветривания угольных шахт. М., "Наука", 1965.
10. Клебанов Ф.С. Проект руководства по аэродинамическим способам управления метановыделением в угольных шахтах в условиях Донбасса. М., ИГД им.А.А.Скочинского, 1967.

11. Клебанов Ф.С. О нормировании газовых условий в угольных шахтах. - "Уголь", 1968, № 6.

12. Клебанов Ф.С. Об оптимальном по газовому фактору режиме работы выемочной машины. - В сб. "Научные сообщения", вып. 60. М., ИГД им.А.А.Скочинского, 1968.

13. Клебанов Ф.С., Шейман Э.М. Об одной аэродинамической характеристике шахт. Реферат. - В сб. "Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело", № 9. М., "Недра", 1968.

14. Клебанов Ф.С. *Restacionarni plynove' režimy v dúlnich větrnich sitich - "Ugli"*, 1968, № 8.

15. Клебанов Ф.С., Карагодина Э.В. Исследование цикличности газовой выделения из разрабатываемого пласта. Реферат. - В сб. "Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело", № 6. М., "Недра", 1969.

16. Клебанов Ф.С. Способ вентиляции газообильной угольной лавы. Авт. свид. № 202839. - "Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки", 1967, № 20.

17. Клебанов Ф.С., Россочинский В.И. Способ вентиляции угольных шахт. Авт. свид. № 258217. - "Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки", 1970, № 1.

18. Клебанов Ф.С., Мартынюк Г.К. Способ определения коэффициента аэродинамического сопротивления. Авт. свид. № 270655. - "Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки", 1970, № 17.

19. Лидин Г.Д., Клебанов Ф.С., Карагодина Э.В. О движении воздуха в лавах с механизированными крепями. - В сб. "Научные сообщения", вып.66. М., ИГД им.А.А.Скочинского, 1969.

20. Клебанов Ф.С. Переходные газовые режимы в угольных шахтах при резком изменении аэродинамических параметров (случай $n = 2$). - В сб. "Научные сообщения ИГД им.А.А.Скочинского", вып.52. М., "Недра", 1969.

21. Клебанов Ф.С. О некоторых предельных параметрах и соотношениях в газовой динамике. - В сб. "Научные сообщения", вып.80. М., ИГД им.А.А.Скочинского, 1970.

22. Клебанов Ф.С. Газовая динамика реверсивной вентиляционной струи. Реферат. - В сб. "Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело", № 2. М., "Недра", 1970.

23. Клебанов Ф.С. Вентиляция и борьба с пылью в угольных шахтах. - В сб. "Научные сообщения", вып.75. М., ИГД им.А.А.Скочинского, 1970.

24. Клебанов Ф.С., Мартынюк Г.К. О взаимодействии источника газа с вентиляционной струей. - В сб. "Научные сообщения", № 76. М., ИГД им.А.А.Скочинского. 1970.

25. Клебанов Ф.С., Мартынюк Г.К. Распределение примеси в вентиляционной струе от точечных и линейных источников. - В сб. "Научные сообщения", вып.77. М., ИГД им.А.А.Скочинского, 1970.

26. Клебанов Ф.С. О движении воздуха по горным выработкам при наличии выработанных пространств. - Доклады АН СССР, т.113, № 4. М., АН СССР, 1957.

27. Клебанов Ф.С. Влияние выработанных пространств на аэрогазодинамические режимы шахт. М., Госгортехиздат, 1959.

28. Клебанов Ф.С., Айруни А.Т. О выделении метана из выработанных пространств. М., Госгортехиздат, 1959.

29. Клебанов Ф.С. Интенсивность вымывания взрывных газов из очистных выработок гидрошахт. М., АН СССР, 1962.

30. Клебанов Ф.С., Айруни А.Т. О влиянии депрессии участка на метанообильность выработок. - В сб. "Методы определения газоносности пластов и прогноза газообильности шахт". М., Госгортехиздат, 1962.

31. Клебанов Ф.С. Об изменении концентрации метана в исходящей вентиляционной струе выемочного участка. М., АН СССР, 1963.

Клебанов Феликс Семенович

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ГАЗОВЫМ РЕЖИМОМ В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ
УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Редакторы Л.А.Яковлева, Л.Н.Войнова

Л-93728

Тираж 200

Заказ № 5520

Ротапринтный цех Института горного дела им.А.А.Скочинского
2,75 уч.-изд.л. Подписано к печати 24/ХП 1970 г.