

6
A 66

АКАДЕМИЯ НАУК УССР
ИНСТИТУТ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Лон

На правах рукописи

Аспирант В. Я. ПОТЕМКИН

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ,
АЛГОРИТМОВ И СТАНДАРТНЫХ ПРОГРАММ
РАСЧЕТА И УПРАВЛЕНИЯ
ПОТОКОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ
В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ ШАХТ**

**Специальность 05.311 «Подземная разработка
и эксплуатация угольных, рудных и нерудных
месторождений»**

Автореферат
диссертации, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК
1971

+

На правах рукописи

Аспирант В. Я. ПОТЕМКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ,
АЛГОРИТМОВ И СТАНДАРТНЫХ ПРОГРАММ
РАСЧЕТА И УПРАВЛЕНИЯ
ПОТОКОМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ
В ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЯХ ШАХТ

Специальность 05.311 «Подземная разработка
и эксплуатация угольных, рудных и нерудных
месторождений»

Автореферат
диссертации, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ДНЕПРОПЕТРОВСК
1971



В решениях XXIV съезда КПСС перед горнодобывающей промышленностью поставлены задачи дальнейшего повышения темпов добычи полезных ископаемых на базе внедрения новейших способов разработки месторождений, научной организации труда и автоматизации основных и вспомогательных технологических процессов.

В процессе добычи полезных ископаемых подземным способом значительную роль играет рудничная вентиляция, призванная создавать безопасные и комфортные условия труда горнорабочих.

Увеличение глубины современных шахт, применение высокопроизводительных механизированных комплексов в очистных забоях, повышение скоростей проходки — все это в совокупности усложняет проветривание шахты, а в ряде случаев делает фактор вентиляции лимитирующим в процессе добычи полезных ископаемых.

Одним из путей повышения эффективности вентиляции является диспетчеризация и последующая автоматизация процесса проветривания с использованием электронно-цифровых управляющих машин. Проблема автоматизации проветривания шахты включает в себя обширный круг вопросов и задач, без рассмотрения которых она не может быть успешно решена.

Настоящая диссертационная работа посвящена разработке методов, алгоритмов и стандартных программ по анализу, расчету и оптимальному управлению потокораспределением в вентиляционных сетях шахт.

Разработанные методы и стандартные программы позволяют с помощью ЭЦВМ быстро и эффективно решать основные задачи по управлению и совершенствованию проветривания шахт и рудников, а также могут быть использованы в системе диспетчерского и автоматического управления проветриванием шахты.

Работа выполнена в Институте геотехнической механики АН УССР. Руководителем группы, в которой выполнялись

настоящие исследования, является кандидат технических наук Р. Б. Тяп.

Работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и содержит 178 страниц машинописного текста, 22 рисунка и 149 страниц приложения.

В первой главе проводится анализ состояния вопроса и ставятся основные задачи исследования.

Значительные успехи в численном решении различных задач по исследованию процессов потокораспределения воздуха в шахте были достигнуты сравнительно недавно в связи с появлением ЭЦВМ. Решение практических задач по совершенствованию проветривания шахт требует рассмотрения задач по топологическому анализу вентиляционной сети как графа, расчету естественного потокораспределения, оптимальному по энергозатратам управлению воздушными потоками и ряда других. Большой вклад в постановку этих задач и их решение внесли член-корр. АН УССР Ф. А. Абрамов, доктора технических наук А. Д. Багриновский, А. А. Волков, С. Цой и ряд других советских ученых.

Эффективность решения различных практических задач по анализу и управлению проветриванием во многом определяется методами и алгоритмами, применяемыми при решении топологических задач, расчете естественного потокораспределения и оптимальном управлении.

Трудности решения задач проветривания, вызванные определенными особенностями вентиляционных сетей шахт, большим количеством подземных выработок, недостаточной разработкой методов решения задач оптимального управления потокораспределением, необходимостью в кратчайшие сроки проводить расчет на ЭЦВМ при оперативном управлении проветриванием шахт потребовали проведения исследований по разработке наиболее эффективных методов, алгоритмов и стандартных программ анализа, расчета и оптимального управления потокораспределением в сложных вентиляционных сетях шахт и рудников.

В соответствии с вышеизложенным основные задачи исследования, решению которых посвящена диссертационная работа, состоят в следующем:

1. Разработать простой экономичный способ задания полной исходной информации о вентиляционной сети шахты на ЭЦВМ, а также быстродействующие алгоритмы решения основных топологических задач.

2. Исследовать и разработать эффективные методы рас-

чета естественного распределения рудничного воздуха, обладающие высокой скоростью сходимости, что позволит на их основе успешно решать различные задачи анализа, управления и взаимосвязанности для сложных вентиляционных сетей.

3. Разработать общие методы и алгоритмы решения задач оптимального управления потокораспределением, пригодных для решения широкого круга практических задач проветривания шахт.

4. Исследовать и разработать критерии оценки взаимосвязанности аэродинамических параметров вентиляционной сети и методы их определения, которые позволят оценивать взаимовлияние основных параметров сложных вентиляционных сетей.

5. На основе наиболее эффективных методов топологического анализа, расчета и управления потокораспределением в вентиляционных сетях шахт разработать комплексную стандартную программу для решения различных задач по управлению проветриванием.

Во второй главе изложены основные положения расчета вентиляционных сетей.

Основой расчета вентиляционных сетей является их представление в виде конечного связного графа, впервые предложенное проф. А. Д. Багриновским. Такое представление позволяет применять методы и выводы теории графов непосредственно для описания топологической взаимосвязи ветвей сети и процессов воздухораспределения в шахте.

Способ задания исходной информации о вентиляционной сети и ее параметрах во многом определяет эффективность применения ЭЦВМ для решения задач проветривания шахт.

Предлагаемый способ представления вентиляционной сети в виде четырехместного предиката $[b, i, j, v]$ (где i, j — номера узлов сети соединенных ветвью v , « b » — параметр, кодирующий качественное отличие ветвей вентиляционной сети шахты, их различную роль в процессе проветривания), несмотря на некоторую избыточность информации, обладает удобством составления и контроля, универсальностью, легко допускает добавление или исключение отдельных ветвей вентиляционной сети. Наличие параметра « b » дает возможность отличать выработки шахты от путей утечек воздуха, задавать места установки регуляторов и вентиляторов, что особенно важно при решении задач по оптимальному управлению потокораспределением.

Основными числовыми параметрами, характеризующими данную вентиляционную сеть шахты, являются аэродинамические сопротивления выработок. Получение этих сопротивлений для действующих шахт основано на данных депрессионной съемки, проведение и обработка результатов которой требуют значительных затрат времени и средств.

Разработанная нами автоматизированная система обработки материалов депрессионной съемки повышает ее качество, значительно увеличивает оперативность и непосредственно дает значительную часть исходных данных для дальнейших расчетов по совершенствованию проветривания шахты с использованием ЭЦВМ. Применение этой системы, начиная с 1969 года, позволило Криворожскому отряду депрессионных съемок провести депрессионные съемки 24 крупных шахт Кривбасса с затратой времени в три-четыре раза меньше, чем до ее внедрения.

Предложена классификация сетевых задач. Согласно этой классификации, все задачи, связанные с исследованием конечного состояния потокораспределения, разделены на три типа: топологические, расчетные и задачи взаимосвязанности. Каждый из этих трех основных типов сетевых задач допускает в свою очередь более подробную классификацию с учетом практических целей, а также математической формы и методов решения этих задач.

Для решения основных топологических задач построения экстремального дерева сети и составления независимых циклов разработаны быстродействующие машинные алгоритмы. В основу алгоритма построения экстремального дерева положен критерий упорядоченности массива, что делает этот алгоритм универсальным и дает возможность строить экстремальное дерево сети по самым различным критериям. Для крупных вентиляционных сетей составление независимых циклов (независимых уравнений сети) даже с применением ЭЦВМ требует больших затрат времени.

Разработанный алгоритм «локального поиска» составления независимых циклов, несмотря на свою довольно сложную структуру, в десятки раз превосходит по быстродействию ранее применявшиеся алгоритмы. Отличительной особенностью этого алгоритма является то, что циклы строятся не для всей сети, а только для ее части, содержащей искомым цикл. Время построения циклов по алгоритму «локального поиска» на ЭЦВМ «Минск-22» для сети с числом ветвей 400—500 составляет 4—5 минут (вместо 1,5—2 часов по ранее применявшимся алгоритмам).

Третья глава посвящена исследованию и разработке наиболее эффективных методов расчета естественного потоко-распределения воздуха в шахте.

Отыскание (естественного) распределения потоков воздуха в вентиляционной сети шахты при известных расходах по стволам или характеристиках вентиляторов приводит к решению системы нелинейных алгебраических уравнений вида:

$$\begin{cases} 1. \sum_{i=1}^{(j)} q_i = 0, & j = 1, 2, \dots, (m-1); \\ 2. \sum_{i=1}^{(j)} r_i q_i^2 = H^{(j)}, & j = 1, 2, \dots, \nu, \end{cases} \quad [1]$$

где q_i — расход воздуха в i -ой ветви;

r_i — аэродинамическое сопротивление i -ой ветви;

$H^{(j)}$ — сумма депрессий источников тяги в j -ом цикле.

Широкое распространение для решения систем (1) получил итерационный метод Андрияшева ввиду своей простоты и экономичности. По своей структуре метод Андрияшева является многошаговым итерационным методом, на каждом $n+1$ шаге которого отыскиваются новые значения $q^{(n+1)}$ входящие в j -ое уравнение системы (1.2) по известным формулам:

$$q_i^{(n+1)} = q_i^{(n)} \pm \Delta q^{(j)}, \quad [2]$$

$$\Delta q^{(j)} = - \frac{\sum_{i=1}^{(j)} r_i q_i^{(n)2} - H^{(j)}}{2 \sum_{i=1}^{(j)} r_i q_i^{(n)}}. \quad [3]$$

Выражение (3) относительно поправки $\Delta q^{(j)}$ является приближенным, что делает сходимость этого метода недостаточно обоснованной.

Разработанный на основе метода Андрияшева m -метод математически обоснован и обладает более высокой скоростью сходимости. Величина $\Delta q^{(j)}$ в m -методе вычисляется со сколь угодно степенью точности по формуле:

$$\Delta q^{(j)} = - \sum_{s=0}^m \Delta q_{1s}^{(j)} = - \sum_{s=0}^m \frac{\sum_{i=1}^{(j)} r_i q_i^{(n+s)2} - H^{(j)}}{2 \sum_{i=1}^{(j)} r_i q_i^{(n+s)}}, \quad [4]$$

где $q_i^{(n+s)}$ — значение расхода в i -ой ветви, полученное на

5-м повторении формул (2), (3) для одного и того же j -го уравнения системы (1.2).

Исследования скорости сходимости m -метода показали ее существенную зависимость от нормы матрицы $\|R\|$ системы (1.2).

$$\|R\| = \sum_i \sum_j |a_{ij}| r_{ij} = \sum_i \sum_j |a_{ij}| r_j. \quad (5)$$

Коэффициенты a_{ij} — элементы матрицы независимых циклов принимают значения 0, 1, —1 и определяются видом системы уравнений (1.2) (системы циклов). Система циклов, построенная на основе минимальных по величине аэродинамических сопротивлений ветвей дерева, обеспечивает минимальную норму $\|R\|$ и максимальную скорость сходимости m -метода. Количество итераций m -метода, необходимых для получения решения системы уравнений (1.2), построенной на основе минимального дерева, в десятки и даже сотни раз меньше итераций для системы, построенной произвольным образом. Это указывает на необходимость составления циклов на основе минимального дерева.

Применение m -метода для решения задачи естественного потокораспределения требует знания некоторого начального распределения воздуха, удовлетворяющего системе (1.1).

Для определения этого не нулевого начального приближения разработан конечный (неитерационный) метод решения системы (1.1), обладающий высокой точностью и быстрым действием. В основу метода положены свойства дерева сети и связей.

Автоматизация процесса переработки исходной информации на ЭЦВМ (построение минимального дерева сети, составление системы независимых уравнений, определение начального потокораспределения) значительно облегчает и ускоряет процесс подготовки исходных данных и повышает эффективность применения вычислительной техники для решения различных задач проветривания шахт.

Для отыскания естественного распределения с невысокой точностью разработан экстраполяционный метод «касательных гипербола». В результате расчетов большого числа вентиляционных сетей было замечено, что поправка Δq_i в итерационном m -методе изменяется по кривой, близкой к гиперболе. Это предположение легло в основу метода «касательных гипербола».

Вычислительная схема метода «касательных гипербола»

совпадает с алгоритмом m -метода до некоторой n' -итерации, начиная с которой процесс изменения поправки Δq_i становится монотонным. Затем значения расходов воздуха q_i^* определяющие естественное потокораспределение, вычисляют по формулам (6), (7).

$$q_i^* = q_i^{(n')} \pm \Delta q_i^* \quad [6]$$

$$\Delta q_i^* = \frac{\Delta q_1 \Delta q_2 \Delta q_3}{\Delta q_1 (\Delta q_2 - \Delta q_3) - \Delta q_3 (\Delta q_1 - \Delta q_2)} \left[\frac{\Delta q_1 (\Delta q_2 - \Delta q_3)}{\Delta q_2 \Delta q_3} + \ln \left| \frac{\Delta q_2 (\Delta q_2 - \Delta q_3)}{\Delta q_3 (\Delta q_1 - \Delta q_2)} \right| \right], \quad [7]$$

где $\Delta q_1, \Delta q_2, \Delta q_3$ — соответственно поправки m -метода к расходу воздуха в i -ой ветви на $n', n'+1, n'+2$ итерационных шагах.

Высокая эффективность метода касательных гипербола позволяет применять его для определения естественного потокораспределения в небольших сетях даже без использования ЭЦВМ.

В четвертой главе приведены методы и алгоритмы решения задачи оптимального по энергозатратам управления потокораспределением в сложных вентиляционных сетях шахт.

Общая постановка задачи оптимального управления потокораспределением для вентиляционной сети с n -ветвями и m -узлами имеет вид:

$$L = R_{\text{общ}} \cdot Q_{\text{общ}}^3 = \sum_i r_i q_i^3 \rightarrow \min$$

При ограничениях:

$$1. \sum_i^{(j)} q_i = 0 \quad i \in A \quad j = 1, 2, \dots, (m-1);$$

$$2. \sum_i^{(j)} r_i q_i^2 = H^{(j)} \quad i \in A \quad j = 1, 2, \dots, \nu;$$

$$3. q_i = \text{const}_i \quad i \in B \quad \nu = n - m + 1;$$

$$\begin{aligned} 4. \bar{r}_i &\geq r_i & i \in C \\ r_i &= \text{const}_i > 0 \\ 5. \bar{r}_i &\leq r_i & i \in D, \end{aligned} \quad [8]$$

где $H^{(j)}$ — сумма депрессий источников тяги в j -ом цикле.

A, B, C, D — соответственно множества: всех ветвей сети, ветвей с заданным расходом воздуха, ветвей, в которых возможно увеличение их аэродинамического сопротивления (установка регулятора), ветвей, в которых возможно уменьшение их аэродинамического сопротивления (установка вспомогательного вентилятора).

В зависимости от количества регулируемых потоков задача оптимального управления может иметь форму линейного или нелинейного математического программирования. Существует три способа осуществления регулирования: «отрицательный» — с помощью дополнительных сопротивлений регуляторов и главных шахтных вентиляторов, «положительный» — с помощью вспомогательных подземных вентиляторов, «смешанный» или «комбинированный» способ, объединяющий первые два.

Для решения линейной задачи оптимального управления потокораспределением «отрицательным» или «положительным» способом разработан быстродействующий метод «потенциалов», не требующий резервов оперативной памяти ЭЦВМ. В основу метода потенциалов положен видоизмененный алгоритм Форда-Фалкерсона отыскания критического потока в транспортной сети. Алгоритм метода «потенциалов» имеет три независимых этапа, что выгодно отличает этот метод от других аналогичных методов динамического программирования.

На первом этапе строится последовательность узлов, определяющая порядок вычисления потенциалов P_i . Эти значения находятся на втором этапе по формуле:

$$P_j = \max \{P_i + h_{i,j,v}\}, \quad (9)$$

где $h_{i,j,v} = r_v q_v^2$ — депрессия ветви v , в которой поток воздуха направлен из i -го узла в j -й узел.

Вычисление сопротивлений регуляторов $\Delta r_{j,i,v}$ происходит на третьем этапе по формуле:

$$\Delta r_{j,i,v} = \frac{P_j - P_i}{q_v^2}. \quad (10)$$

Смешанную (комбинированную) нелинейную задачу оп-

тимального управления целесообразно рассматривать как вынужденный способ осуществления регулирования при заданных граничных условиях в виде общего расхода или характеристик главных вентиляторов, когда регулирование только отрицательным способом неосуществимо.

В основу решения «смешанной» нелинейной задачи оптимального управления потокораспределением в вентиляционных сетях шахт положен принцип «разделения условий», позволяющий свести решение этой задачи к последовательному решению системы нелинейных алгебраических уравнений и нахождению решения линейной экстремальной задачи. Согласно этому принципу система уравнений (8.2) разделяется на две подсистемы (11) и (12).

$$\sum_i^{(j)} r_i q_i^2 = H^{(j)} \quad i \in A \quad (11)$$

$$\sum_i^{(j)} r_i q_i^2 = H^{(j)} \quad i \in A \setminus B \quad (12)$$

Решение системы уравнений (12) с учетом ограничений (8.3) определяет расходы воздуха по всем ветвям вентиляционной сети. Дальнейший ход решения задачи совпадает с алгоритмом метода потенциалов, но значения потенциалов P_i вычисляются по другой формуле

$$P_j = \begin{cases} P_i + h_{i,j,v} & v \in A \setminus B, \\ \max_v (P_i + h_{i,j,v}) & v \in B \end{cases} \quad (13)$$

Для решения наиболее важной в практическом отношении нелинейной задачи оптимального управления потокораспределением отрицательным способом разработан эффективный метод «секущих хорд», основанный на решении «смешанной» задачи и критерии оптимальности. Критерий оптимальности состоит в том, что при оптимальном значении общей депрессии $H_{\text{общ}}$ решение смешанной задачи обеспечивает хотя бы один полностью открытый регулятор. То есть значение $\bar{H}$ является оптимальным, если выполняется следующее соотношение:

$$\Delta r_j(\bar{H}) = 0; \quad \Delta r_i(\bar{H}) > 0; \quad i, j \in B, \quad [14]$$

где $\Delta r_i, \Delta r_j$ — значения сопротивлений регуляторов, полученных в результате решения смешанной задачи оптимального управления при $H_{\text{общ}} = \bar{H}$.

Если ввести функцию $\psi(H) = \min \{ \Delta r_i(H) \}$, то для нахождения оптимальной величины общей депрессии сети

$\bar{H} = \lim_{n \rightarrow \infty} H_n$ применим итерационный процесс по формуле:

$$H_{n+1} = H_n - \frac{H_n - H_1}{\psi(H_n) - \psi(H_1)} \psi(H_1) \quad [15]$$

Как показали многочисленные расчеты вентиляционных сетей, этот процесс обладает достаточно высокой скоростью сходимости. Результатом решения является получение оптимальных режимов работ главных вентиляторов и величин сопротивлений регуляторов, обеспечивающих требуемое распределение потоков по некоторым выработкам шахты.

Решение этой задачи для несложных вентиляционных сетей и при малом количестве регулируемых участков может быть получено также по упрощенному методу «пропорциональных коэффициентов».

Значение общей оптимальной депрессии в методе «пропорциональных коэффициентов» получается в результате решения системы уравнений (16) с учетом ограничений (8.3)

$$\left\{ \begin{array}{l} (i) \quad \sum_i r_i q_i^2 = H, \quad i \in A \cup B \\ (j) \quad \sum_i r_i q_i^2 + r_s q_s^2 = \bar{H}, \quad i \in A \cup B, \quad s \in B \end{array} \right. \quad [16]$$

где последнее уравнение есть уравнение труднопроветриваемого маршрута, содержащего S-ю ветвь $S \in B$. Ветвь S определяется из следующего условия:

$$S \sim \max_i \{K_i\} = \max_i \left\{ \frac{q_i}{q_i^{(0)}} \right\}; \quad i \in B, \quad [17]$$

где $q_i^{(0)}$ — расход воздуха в i-ой ветви при некотором естественном потокораспределении.

Разработанные методы оптимального управления потокораспределением с успехом применялись при решении конкретных задач по управлению проветриванием крупных шахт Донецкого и Криворожского бассейнов на ЭЦВМ, показав при этом высокую эффективность и быстрое действие.

В пятой главе изложены вопросы оценки взаимосвязанности аэродинамических параметров вентиляционных сетей,

а также вопросы применения ЭЦВМ для расчетов по управлению проветриванием шахт.

Определение характера изменения расхода воздуха (взаимосвязи) при различных изменениях аэродинамических сопротивлений выработок или характеристик источников тяги необходимо при анализе устойчивости струй в диагональных соединениях выработок, регулировании расходов воздуха, составлении планов ликвидации аварий и в ряде других случаев, когда требуется оценить влияние изменения некоторых аэродинамических параметров сети на потокораспределение воздуха в шахте.

Для сложных вентиляционных сетей предложен способ оценки этой взаимосвязи с помощью двух матриц взаимосвязанности В и С. Элементы этих матриц вычисляются по формулам:

$$B_i^j = \frac{q_i(r_j)_{\max}}{q_i^{(0)}}; \quad C_i^j = \frac{q_i(r_j)_{\min}}{q_i^{(0)}}; \quad [18]$$

где $q_i^{(0)}$ — расход воздуха в i-ой ветви при нормальном режиме проветривания;

$q_i(r_j)_{\max}, q_i(r_j)_{\min}$ — соответственно расходы воздуха в i-ой ветви при измененном сопротивлении j-ой ветви до возможной максимальной, минимальной величины.

Зная элементы этих матриц, можно приближенно определить расход воздуха в i-ой ветви при изменении сопротивления j-ой до величины r'_j :

$$q_i' = \left[1 + \frac{r_j' - r_j}{r_{j\max} - r_j} (B_i^j - 1) \right] q_i^{(0)}; \quad r' > r \quad [19]$$

$$q_i' = \left[1 - \frac{r_j' - r_j}{r_{j\min} - r_j} (C_i^j - 1) \right] q_i^{(0)}; \quad r' < r \quad [20]$$

В работе приведены примеры применения матриц взаимосвязанности для определения устойчивости струй в диагональных соединениях сложных сетей и способы упрощения крупных вентиляционных сетей при расчетах.

На основании разработанных методов и алгоритмов составлена комплексная стандартная программа по анализу, расчету и управлению потокораспределением в сложных вентиляционных сетях на ЭЦВМ «Минск-22».

Программа предусматривает решение свыше двадцати различных задач для сетей, содержащих до 1000 ветвей.

Затраты времени при решении основных задач для сети с числом ветвей 400—500 следующие:

1. Построение дерева сети 30—50 сек.
2. Составление независимых циклов 2—4 мин.
3. Решение узловых уравнений 1—2 мин.
4. Естественное потокораспределение 3—6 мин.
5. Оптимальное управление (линейная задача) 1,5—2 мин.
6. Оптимальное управление (нелинейная, смешанная задача) 5—7 мин.
7. Оптимальное управление (общая нелинейная задача) 8—15 мин.
8. Построение матрицы взаимосвязанности 10—30 мин.

Разработанная нами программа используется главным вычислительным центром угольной промышленности Украины, депрессионно-вычислительным центром Донбасса, информационно-вычислительным центром комбината Кузбассуголь, научно-исследовательскими, учебными и проектными институтами: ИГД им. А. А. Скочинского, НИИрудвентиляция, ЦНИИППгипроуглеавтоматизация, Кавказгипроцветмет, Новочеркасским политехническим институтом, Днепропетровским горным институтом им. Артема, а также отрядами ВГСЧ городов Кривого Рога, Донецка, Ворошиловграда, Норильска, Воркуты, Красноярского края и рядом других организаций, занимающихся вопросами проветривания шахт и рудников.

ВЫВОДЫ

1. Создание автоматической системы управления проветриванием (САУП) с использованием цифровой вычислительной машины требует разработки быстродействующих и эффективных методов, алгоритмов и программ анализа, расчета и управления конечным состоянием потокораспределения в сложных вентилиационных сетях.

2. Применение ЭЦВМ для анализа, расчета и управления потокораспределением требует достаточно полную исходную информацию о числовых и топологических характеристиках вентилиационной сети.

Приведенная в работе форма задания сети в виде списка кодов ветвей, отражающая не только топологическую взаимосвязь между ними, но и определенные технологические отличия выработок вентилиационной сети, является удобной и универсальной формой представления исходной информации.

3. Основным средством получения аэродинамических параметров вентилиационных сетей действующих шахт является проведение депрессионной съемки.

Разработанная нами и используемая с 1969 года Криворожским отрядом ВГСЧ автоматизированная система обработки материалов депрессионной съемки значительно повысила качество депрессионной съемки, а также снизила затраты времени на ее осуществление в 3—4 раза.

4. Решение практических задач по расчету и управлению потокораспределением в вентилиационных сетях шахт требует предварительного топологического анализа вентилиационной сети как графа. Разработанные и реализованные в машинный вид алгоритмы построения экстремального дерева сети и «локального поиска» — составления независимых циклов графа, выгодно отличаются своей универсальностью и быстродействием от ранее применявшихся алгоритмов.

5. Вопросы анализа взаимосвязанности расчета и оптимального управления потокораспределением требуют определения естественного воздухораспределения, скорость получения которого в конечном итоге определяет быстродействие решения различных задач проветривания.

Разработанный на базе метода Андрияшева m -метод имеет простую вычислительную схему, обладает достаточно высокой скоростью сходимости, практически не зависит от начального приближения и легко реализуется на ЭЦВМ для вентилиационных сетей шахт с большим числом ветвей.

6. Исследования скорости сходимости m -метода показали ее существенную зависимость от выбора нормы матрицы нелинейной системы. Для получения минимальной нормы матрицы, обеспечивающей максимальную скорость сходимости итерационного процесса, предложен простой способ образования циклов, основанный на построении минимального дерева сети и не требующий дополнительных вычислений.

7. Для получения естественного распределения рудничного воздуха в случае особенно крупных и сложных схем и для небольших сетей при отсутствии ЭЦВМ разработан метод «касательных гипербол», обладающий сверхбыстрой сходимостью. Применение этого метода особенно эффективно для решения практических задач, не требующих высокой точности вычисления.

8. Наиболее важными в практическом отношении являются задачи оптимального управления потокораспределением в вентилиационной сети шахты, которые в зависимости от количества регулируемых потоков имеют форму задач линейного и нелинейного математического программирования.

Для решения линейной задачи управления потокораспре-

делением на основе методов динамического программирования разработан «метод потенциалов», не требующий резервов памяти ЭЦВМ. Этот метод прост, обладает достаточным быстродействием и универсален, что дает возможность в дальнейшем использовать его при решении более общих задач управления потокораспределением воздуха в шахте.

9. На основе принципа «разделение условий» разработаны методы и алгоритмы решения наиболее общих нелинейных задач оптимального управления конечным состоянием потокораспределения (метод «пропорциональных коэффициентов», метод «секущих хорд»). Эти методы математически обоснованы, обладают достаточной общностью и скоростью сходимости, учитывают специфические особенности шахтных вентиляционных сетей, что дает возможность применять их при решении широкого круга практических задач по управлению потокораспределением воздуха в шахте.

10. Для анализа взаимосвязанности аэродинамических параметров в сложных вентиляционных сетях предложена удобная форма выражения этой зависимости с помощью матриц взаимосвязанности. С помощью матриц взаимосвязанности легко определяются диагонали и степень их устойчивости. Они дают возможность анализировать различные аварийные ситуации, а также решать в какой-то мере вопросы оперативного перераспределения потоков воздуха в шахте без непосредственного расчета на ЭЦВМ.

11. На основе наиболее эффективных методов разработана комплексная стандартная программа решения различных задач по топологическому анализу, расчету и оптимальному управлению потокораспределением в вентиляционных сетях, которая может применяться в системе автоматического управления проветриванием шахты.

12. Разработанные методы, алгоритмы и стандартные программы в настоящее время широко используются при решении различных практических задач проветривания вычислительными центрами, научно-исследовательскими и проектными институтами, а также непосредственно работниками отрядов ВГСЧ и инженерно-техническим персоналом ПВС шахт и рудников.

Результаты проведенных исследований по окончании отдельных этапов и работа в целом докладывались и подвергались широкому обсуждению на III Всесоюзной конференции по автоматизации проветривания шахт (г. Киев, сентябрь

1967), на Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции по вентиляции и вентиляторостроению (г. Днепропетровск, январь 1968 г.), на Республиканской конференции молодых ученых (г. Макеевка, февраль 1968 г.), на научно-технических конференциях ДГИ и ИГТМ АН УССР (г. Днепропетровск, апрель 1968 г., апрель 1970 г.), на Всесоюзных научных семинарах работников ВГСЧ МЧМ СССР (г. Кривой Рог, май 1969 г.), МУП СССР (г. Днепропетровск, июнь 1970 г.), МЦМ СССР (г. Ленинабад, октябрь 1970 г.), на научных семинарах: лаборатории вентиляции института НИИрудвентиляция (г. Кривой Рог, март 1971 г.), лаборатории вентиляции и борьбы с рудничной пылью ИГД им. А. А. Скочинского (г. Москва, апрель 1971 г.), отдела вентиляции ДонУГИ (г. Донецк, май 1971 г.).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Алгоритм и программа расчета сложных вентиляционных систем на ЭЦВМ. Журнал «Уголь Украины» № 6, 1966 (соавторы Абрамов Ф. А., Тянь Р. Б.).
2. Об одной задаче регулирования воздухораспределения в вентиляционных сетях шахт. «Горный журнал». Известия вузов, № 3, 1967 (соавтор Тянь Р. Б.).
3. Программирование расчетов сложных вентиляционных сетей на электронной цифровой вычислительной машине «Урал-1». Сб. «Совершенствование проветривания шахт». Изд-во «Недра», вып. 1, 1967 (соавтор Тянь Р. Б.).
4. Расчет аварийных режимов проветривания шахт при пожарах на электронных цифровых вычислительных машинах. Сб. «Совершенствование проветривания шахт». Изд-во «Недра», вып. 1, 1967 (соавторы Мосин И. М., Тянь Р. Б.).
5. Оптимальное управление воздухораспределением в вентиляционных сетях шахт. Тезисы докладов на республиканской конференции молодых ученых. Макеевка, 1968 (соавтор Тянь Р. Б.).
6. Оценка эффективности управления проветриванием шахт по энергозатратам. «Горный журнал». Известия вузов, № 9, 1969 (соавторы Тянь Р. Б., Швец Г. А., Кордин Ю. А.).
7. Расчет сложных вентиляционных сетей методом касательных ги-пербол. «Горный журнал». Известия вузов, № 9, 1969 (соавторы Абрамов Ф. А., Тянь Р. Б.).
8. Применение ЭЦВМ для обработки результатов обследования системы вентиляции шахт «Горный журнал», № 8, 1970 (соавторы Аврамчук Р. Н., Корольский В. В., Тянь Р. Б.).
9. Устойчивость струй в диагональных соединениях. «Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело», № 6, 1970 (соавтор Тянь Р. Б.).
10. Оптимальное управление воздухораспределением в общем нелинейном случае. «Горный журнал». Известия вузов, 1971 (соавтор Тянь Р. Б.).

11. Общий метод решения задачи оптимального управления воздухо-распределением в вентиляционной сети шахты. Сб. «Совершенствование проветривания шахт». Изд-во «Недра», вып. II, 1971 (соавторы Швец Г. А., Тянь Р. Б.).

12. Способы ускорения сходимости итерационного метода Андрияшева для расчета естественного распределения воздуха. Сб. «Совершенствование проветривания шахт». Изд-во «Недра», вып. II, 1971 (соавтор Кордин Ю. А.).

13. Оптимальное управление воздухо-распределением при работе нескольких источников тяги на вентиляционную сеть. Сб. «Совершенствование проветривания шахт». Изд-во «Недра», вып. II, 1971 (соавтор Тянь Р. Б.).

14. Упрощение сложных вентиляционных сетей при расчетах. Сб. «Разработка месторождений полезных ископаемых», вып. 22. Изд-во «Техника», Киев, 1971.