

## РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.4

### ОПТИМИЗАЦИЯ ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ МЕТОДОМ АСИМПТОТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА РАСХОДА ВОЗДУХА

Ли Бинг-руи<sup>1,3</sup>, Иноу Масахиро<sup>2</sup>, Шен Ши-бао<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Колледж горного дела и безопасности, Университет науки и технологий, Шандонг,  
E-mail: j0364026106@163.com, г. Циндао, 266590, Китайская Народная Республика

<sup>2</sup>Департамент инжиниринга, земельных ресурсов, Университет Кушу,  
г. Фукуока, 8190395, Япония

<sup>3</sup>Департамент международных дел, Центр угольной энергетики Японии (JCOAL),  
г. Токио, 1050003, Япония

Основная задача исследований в области оптимизации шахтной вентиляционной сети — разработка оптимального метода управления вентиляционной системой с минимизацией ее общих затрат. Разработана многоцелевая модель оптимизации относительно суммарных затрат и представлен алгоритм оптимизации на основе асимптотического расчета расхода воздуха при иерархическом анализе целевых функций и структурных характеристик вентиляционной сети. В предложенном методе регулируемые ветви определены по ориентированной матрице; оптимальное решение получено асимптотическим расчетом расхода воздуха с использованием имеющихся программ для анализа вентиляционной сети без необходимости решать масштабные задачи нелинейного программирования. Результаты анализа практического примера подтвердили надежность данного метода.

*Оптимизация вентиляционной сети, суммарные затраты, асимптотический расчет расхода воздуха, независимая ветвь, регулируемая ветвь*

DOI: 10.15372/FTPRPI20180114

Надлежащий контроль за вентиляционной сетью обеспечивает необходимое количество свежего воздуха, безопасную и комфортную среду на всех участках подземного рудника. Методы контроля расхода воздуха, число, размер, местоположение регуляторов непосредственно влияют на энергопотребление вентиляционной системы, стоимость монтажа систем контроля. С развитием производства и механизации система вентиляции расширяется, а управление расходом воздуха усложняется, поэтому минимизация суммарных затрат на систему шахтной вентиляции представляет собой актуальную задачу практического значения.

В последнее время изучены математические методы оптимизации контроля шахтной вентиляционной сети [1, 2]. Известно, что решение проблемы оптимизации связано с определением расположения вентилятора, числом, местоположением и размером регуляторов, которые отве-

Работа выполнена при финансировании Тайшаньской программы поддержки талантливых ученых в передовых и уникальных дисциплинах и Национального фонда естественных наук Китая (проект № 51674158).

чают за создание, распределения воздушного потока и давления для удовлетворения технических требований шахтной вентиляции при минимальном энергопотреблении [1]. С этой точки зрения математическая модель оптимизации вентиляционной сети представляет собой нелинейную невыпуклую задачу программирования [3]. Существует два известных подхода к решению этой задачи. Согласно одному из них, распределение воздушного потока вентиляционной сети принимают как известное условие и преобразуют нелинейную задачу программирования в линейную — симплексный метод [4], метод критического пути, метод контуров [5, 6] и т. д. Согласно другому подходу, практикуют прямое решение нелинейной задачи программирования: метод обобщенного приведенного градиента (GRG) [7–9], условный переменный метрический метод (CVM) [9], метод целочисленного программирования [3, 10], алгоритм Лагранжа для ограничений в виде равенства [11] и т. д. Традиционные методы нелинейного программирования неэффективны в итеративном виде. С развитием алгоритмов интеллектуальной оптимизации используют новые методы решения задачи оптимизации сети шахтной вентиляции, например генетический алгоритм [12–15], культурная оптимизация методом роя частиц [16, 17] и др.

Математическая модель оптимизации вентиляционной сети с целью экономии энергопотребления представляет собой нелинейную невыпуклую задачу программирования. Трудно строго математически доказать наличие глобального оптимального решения. Его существование зависит от свойств вентиляционной сети и метода расчета [7, 9]. Генетический алгоритм приемлем только в случае, когда существование оптимального решения доказано теоретически, неправильный выбор поправок на потери в сети может привести к варианту без решения [13]. Преимущества и недостатки алгоритма оптимизации методом роя частиц подобны генетическому алгоритму в связи с необходимостью преобразования ограничительных условий в штрафные функции [17]. Более того, оптимизация вентиляционной сети с целью экономии энергопотребления также не учитывает стоимость инженерных сооружений.

На практике результаты такой оптимизации не всегда представляют самые экономичные решения, поскольку контроль вентиляционного потока требует существенных затрат на инженерные сооружения. Следовательно, при оптимизации сети шахтной вентиляции есть смысл рассматривать как энергозатраты, так и стоимость инженерных сооружений. В связи с этим авторы предлагают математическую модель оптимизации вентиляционной сети с учетом суммарных затрат [18, 19]. Для данной модели оптимизации разработан новый алгоритм оптимизации с иерархическим анализом целевых функций. Оптимальное решение получено асимптотическим расчетом расхода воздуха с помощью имеющейся программы для анализа вентиляционной сети без необходимости решать крупномасштабные нелинейные задачи программирования.

### ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

Оптимизация вентиляционной сети — это не только минимизация энергопотребления на вентиляцию, но и минимизация затрат на инженерные сооружения для контроля расхода вентиляционного воздуха. При рассмотрении суммарных затрат целевые функции оптимизации вентиляционной сети можно выразить в виде:

$$\min Z_1 = \sum_{i=1}^f h_{fi} q_{fi} = \sum_{j=1}^b (r_j + s_j) q_j^3, \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \sum_{k=1}^{ns} w_{1k} + \sum_{k=1}^{ns} w_{2k}, \quad (2)$$

где  $f$  — число вентиляторов;  $h_{fi}$ ,  $q_{fi}$  — давление и производительность вентилятора  $i$  соответственно;  $b$  — число ветвей в вентиляционной сети;  $r_j$  — коэффициент сопротивления ветви  $j$ ;  $s_j$  — дополнительное сопротивление регулирования для ветви  $j$ ;  $q_j$  — расход воздуха, проходя-

щего через ветвь  $j$ ;  $ns$  — число ветвей с возможной регулировкой сопротивления;  $w_{1k}$  — стоимость инженерных конструкций для регулировки  $k$  вентилятора;  $w_{2k}$  — стоимость техобслуживания регулятора  $k$ .

Уравнение (1) — энергопотребление на проветривание, уравнение (2) — стоимость инженерных сооружений для контроля вентиляционного воздушного потока, зависит от методов контроля, срока службы приборов вентиляционных выработок. Уравнение (2) взято как целевая функция. Прямое решение модели оптимизации затруднено.

Контроль воздухораспределения можно реализовать путем селективного введения положительного и/или отрицательного регулирования [20]. Положительное регулирование — это дополнительное введение регулирующих устройств, например двери, функционирующие как дополнительное положительное сопротивление. В случае наличия постоянного суммарного количества воздуха в шахте положительное регулирование повышает энергозатраты на вентиляцию и затраты на инженерные сооружения. Следовательно, чем меньше дополнительных сопротивлений и регуляторов, тем выше экономический эффект вентиляции [19].

Отрицательное регулирование — это увеличение количества воздуха, снижение потерь давления, таких как проходка параллельной вентиляционной выработки, расширение поперечного сечения штрека, установка вспомогательного вентилятора и т. д., согласно результатам анализа отрицательного дополнительного сопротивления. В случае проходки дополнительной вентиляционной выработки параллельно имеющемуся штреку стоимость выемки, технического обслуживания, энергопотребления пропорциональна длине дополнительной вентиляционной выработки. Следовательно, экономия общих затрат зависит от длины дополнительной вентиляционной выработки и связывается с отношением стоимости единицы выемки к стоимости единицы энергии, количества воздуха, срока службы дополнительной вентиляционной выработки [19]. А именно, если суммарные затраты можно снизить за счет проходки дополнительной вентиляционной выработки, длина параллельного штрека должна быть максимально большой. В этом случае нет необходимости в анализе оптимизации, так как оптимальное решение — это то, что длина дополнительной параллельной вентиляционной выработки равна длине уже существующей выработки. И наоборот, длина дополнительной вентиляционной выработки должна быть как можно короче, только в этом случае потребуются анализ оптимизации.

С учетом изложенного можно сделать вывод, что чем меньше добавленное сопротивление и число регуляторов, тем выше экономический эффект вентиляции как в случае положительного, так и отрицательного регулирования. Другими словами, вентиляционная сеть, где индивидуальные вентиляционные потоки на всех производственных участках создаются путем разделения свободного вентиляционного потока без какой-либо регулировки, является наилучшей. Таким образом, оптимизация вентиляционной сети должна: 1) минимизировать энергопотребление на вентиляцию; 2) минимизировать дополнительное сопротивление; 3) минимизировать число ветвей с регуляторами сопротивления.

Отсюда можно записать уравнения:

$$\min J_1 = \sum_{j=1}^b |s_j|, \quad (3)$$

$$\min J_2 = \sum_{j=1}^b sb_j, \quad (4)$$

где  $sb_j$  — коэффициент регулировки, определенный как:  $sb_j = 1$  при условии, что ветвь  $j$  — регулируемая,  $sb_j = 0$  при условии, что ветвь  $j$  — нерегулируемая.

Вентиляционная сеть обычно выражена как  $G=(V, E)$ ,  $V$  — система узлов в сети,  $|V|=p$ ,  $p$  — число узлов;  $E$  — система ветвей,  $|E|=b$ . Хорда в кодере известна как независимая ветвь, контур только с хордой называется независимым. Число независимых контуров равно  $m = b - p + 1$ .

Производственные участки, нуждающиеся в поставке определенного количества свежего воздуха, называют индивидуальными вентиляционными ветвями. Без учета потерь воздуха в вентиляционной сети весь свежий воздух должен проходить через производственные участки. Следовательно, индивидуальные вентиляционные ветви не зависят друг от друга и принадлежат одному и тому же кодереву. Система индивидуальных вентиляционных ветвей выражена как  $NK$ ,  $|NK|=nk$ , а  $nk \leq m$ ,  $nk$  — число индивидуальных вентиляционных ветвей.

Базовое уравнение контроля вентиляционной сети:

$$\sum_{j=1}^b b_{ij} (r_j + s_j) q_j |q_j| - h_{fi} - h_{ni} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

где  $b_{ij}$  — основной контур матрицы  $B$ , определенный как  $b_{ij}=1$ , когда ветвь  $j$  имеется в контуре  $i$  в идентичном направлении;  $b_{ij}=-1$ , когда ветвь  $j$  находится в контуре  $i$  и имеет противоположное направление;  $b_{ij}=0$ , когда ветвь  $j$  не находится в контуре  $i$ ;  $h_{ni}$  — давление естественной вентиляции в контуре  $i$ .

Уравнения (5) могут определить  $m$  регуляторов, поскольку основной контур матрицы  $B$  является линейно независимым. Однако регулированию подлежат только базовые контуры, содержащие определенные ветви воздушного потока. Воздушный поток в других базовых контурах может быть разделен естественным способом. Следовательно, число регуляторов для контроля расхода воздуха теоретически равно числу определенных ветвей воздушного потока или математически:

$$\sum_{j=1}^b s b_j = nk. \quad (6)$$

Поскольку целевая функция (4) может быть вычислена непосредственно с помощью уравнения (6), целевые функции для оптимизации вентиляционной сети — это только уравнения (1) и (3).

Математическая модель на основе уравнений (1) и (3) в виде целевых функций — многоцелевая задача оптимизации. Уравнение (3) определяет сумму дополнительных сопротивлений, зависящих от способа размещения и числа регуляторов, и представляет техническую проблему оптимизации вентиляционной сети. Уравнение (1) выражает энергопотребление при распределении воздушного потока соответственно характеристикам вентилятора и является экономической проблемой. Таким образом, в процессе оптимизации вентиляционной системы можно выделить два уровня: технологический и экономический. Тогда многоцелевая задача оптимизации может быть преобразована в две одноцелевые задачи: оптимизация контроля вентиляционной сети и минимизация энергопотребления при сохранении приоритета технической проблемы над экономической.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД АНАЛИЗА ОПТИМИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ

Согласно иерархическому анализу целевых функций, оптимизация контроля вентиляционной сети может не включать контроль вентилятора. При условии, что характеристическая кривая для вентиляторов является фиксированной, математическая модель оптимизации контроля вентиляционной сети может быть выражена следующим образом:

$$\min J = \sum_{j=1}^b |s_j|, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^b a_{ij} q_j = 0, \quad i = 1, 2, \dots, p-1, \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^b b_{ij} (r_j + s_j) q_j |q_j| - h_{fi} - h_{ni} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (9)$$

$$lq_j \leq q_j \leq uq_j, \quad j \in NK, \quad (10)$$

$$ls_j \leq s_j \leq us_j, \quad j = 1, 2, \dots, b, \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^b sb_j = nk, \quad (12)$$

где  $a_{ij}$  — элемент базовой связанной матрицы, определяется как:  $a_{ij} = 1$ , если ветвь  $j$  соединена с узлом  $i$  и воздушный поток выходит из узла  $i$ ;  $a_{ij} = -1$ , если ветвь  $j$  соединена с узлом  $i$  и воздушный поток поступает в узел  $i$ ;  $a_{ij} = 0$ , если ветвь  $j$  не соединена с узлом  $i$ ;  $lq_j$ ,  $uq_j$  — нижний и верхний участки воздушного потока в заданной ветви воздушного потока  $j$  соответственно;  $ls_j$ ,  $us_j$  — допустимые нижние и верхние границы дополнительного сопротивления для регулятора  $j$  соответственно.

Уравнения (8) и (9) известны как первый и второй законы Кирхгофа. Уравнение (10) — заданный расход воздуха. Уравнение (11) — ограничительное условие дополнительного сопротивления, определяемое как  $ls_j = us_j = 0$ , если сопротивление ветви  $j$  не подлежит регулированию;  $ls_j = 0$  и  $us_j > 0$ , если для ветви  $j$  допустимо только положительное регулирование;  $ls_j = -\Delta r_j$  и  $us_j > 0$ , если для ветви  $j$  допустимы и положительное и отрицательное регулирование;  $ls_j = -\Delta r_j$  и  $us_j = 0$ , если для ветви  $j$  разрешено только отрицательное регулирование;  $\Delta r_j$  — допустимое отрицательное регулирование для ветви  $j$ .

Уравнения (7)–(12) — нелинейная задача программирования, которая может быть решена непосредственно методами нелинейного программирования. Целевая функция имеет минимальное значение, потому что это линейное уравнение. В работе предложен метод асимптотического расчета воздушного потока с анализом закона течения для воздуха и характеристик структуры вентиляционной сети.

#### Основы асимптотического расчета расхода воздуха

Состояние без какого-либо регулирования называется исходным состоянием вентиляционной сети. Сопротивление исходного состояния выражено как  $R_0 = (r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0b})$ . Воздухораспределение  $Q_0 = (q_{01}, q_{02}, \dots, q_{0b})$  в исходном состоянии можно получить, решая задачу естественного распределения свободного потока. При предположении, что  $S_m = (s_{m1}, s_{m2}, \dots, s_{mb})$  и  $Q_M = (q_{m1}, q_{m2}, \dots, q_{mb})$  являются оптимальными решениями, исходное состояние ветви  $j$  можно записать в виде

$$\Delta h_j = (r_{0j} + s_{mj}) q_{mj}^2 - r_{0j} q_{0j}^2, \quad j = 1, 2, \dots, b. \quad (13)$$

Истинное оптимальное решение  $s_{mj}$  изначально неизвестно. Можно преобразовать эту задачу путем введения переменной  $s_j$ . Пусть

$$\Delta h_j = s_j q_{mj}^2, \quad j = 1, 2, \dots, b. \quad (14)$$

Подставляя (14) в уравнение (13), имеем

$$s_{mj} = s_j + r_{0j} (q_{0j}^2 / q_{mj}^2 - 1), \quad j = 1, 2, \dots, b, \quad (15)$$

где  $q_{mj}$  также неизвестно, уравнение можно решить следующим методом.

Сначала определяем воздухораспределение  $Q_0$  при естественном распределении потока, используя  $R_0$  в качестве сопротивления при

$$q_{kj} = \begin{cases} lq_j, & q_{0j} < lq_j, \\ q_{0j}, & lq_j \leq q_{0j} \leq uq_j, \\ uq_j, & q_{0j} > uq_j, \end{cases} \quad j \in NK. \quad (16)$$

Затем находим воздухораспределение в полуконтролируемом разделении потока при  $q_{kj}$  ( $j \in NK$ ) и сопротивление  $R_0$  в качестве фиксированной величины, принимая их как приближение их для расчета  $Q_M$ .

Обе величины  $Q_M$  и  $S_M$  представляют собой аппроксимацию, следовательно точные решения можно получить при допущении, что  $s_j = s_{mj}$  и  $r_j = r_{0j} + s_{mj}$ , и повторении описанного процесса. При  $lq_j \leq q_{0j} \leq uq_j$  ( $j \in NK$ ) вентиляционная сеть не требует какого-либо контроля;  $Q_0$  и  $S_M = 0$  — оптимальные решения. Таковы основные принципы оптимизации контроля вентиляционной сети на основе асимптотического расчета расхода воздуха.

#### Определение регулируемых ветвей

Уравнение (14) позволяет рассчитать сопротивление регуляторов без возможности установить их местоположение. Нахождение регулируемых ветвей — основная задача метода асимптотического расчета расхода воздуха.

##### 1) Определение независимых ветвей

Вентиляционная сеть представляет собой ориентированный граф. Направление воздушного потока во всех ветвях обусловлено потоком воздуха от подающего ствола к вентиляционному стволу. Изменяющаяся последовательность соединительных узлов и ветвей от подающего ствола до выхода вентиляционного ствола называется ориентированной траекторией. Матрица ориентированной траектории выражена как  $C = (c_{ij})_{l \times b}$ , где  $c_{ij}$  — элемент матрицы, который находится как:  $c_{ij} = 1$ , если ветвь  $j$  включена в траекторию  $i$ ,  $c_{ij} = 0$  в противоположном случае, а  $l$  — число траекторий.

В соответствии со свойствами  $C$  ветвь, сумма столбца которой равна единице, будет независимой ветвью (или хордой). Система независимых ветвей выражена в виде  $NI$ ,  $|NI| = ni$  и  $ni \leq m$ , где  $ni$  — число независимых ветвей. Контур, содержащий независимую ветвь, называется независимым контуром. Обязательным условием оптимизации вентиляционной сети является то, что регулируемые ветви не зависят друг от друга. На основе этого условия  $NI$  можно принять как систему регулируемых ветвей.

##### 2) Положительное регулирование недопустимо на линии с максимальной потерей давления.

Потерю давления в можно рассчитать из уравнения

$$hc_i = \sum_{j=1}^b c_{ij} r_{0j} q_{kj}^2, \quad j = 1, 2, \dots, l, \quad (17)$$

где  $hc_i$  — потеря давления на линии  $i$ ;  $q_{kj}$  — расход воздуха, полученный при использовании  $q_{kj}$  ( $j \in NK$ ) в качестве фиксированного расхода воздуха и сопротивления  $R_0$ . В уравнение (17) входят только ранее определенные воздушные потоки и не содержится дополнительного

сопротивления регуляторов. Линия с максимальной потерей давления выражена как  $C_x$ . Потеря давления в  $C_x$  равна давлению воздуха, обеспечиваемого вентилятором. Для минимизации этого давления положительное регулирование на линии  $C_x$  не допускается.

### 3) Влияние распределения расхода воздуха на регулируемые ветви

Если ветвь  $j$  имеет связь с входом или выходом и более чем одна из них является регулируемой, то изменение расхода воздуха в ветви  $j$  будет максимальным. Чем больше расстояние от ветви  $j$ , тем меньше изменяется расход воздуха. Расстояние между двумя ветвями равно числу ветвей между ними. И наоборот, если известны изменения воздушного потока в вентиляционной сети, вызванные регулированием, то выбор регулируемой ветви падает на ветвь с максимальными изменениями расхода воздуха.

### 4) Определение регулируемых ветвей

Число регулируемых ветвей должно быть равно числу заданных ветвей расхода воздуха ( $nk$ ), а регулируемые ветви должны быть независимы друг от друга. Однако  $ni$ , определенная по ориентированной матрице  $C$ , может быть не равна  $nk$ , а дополнительное сопротивление  $s_j$  ( $j \in NI$ ) может не удовлетворять уравнению (11). При условии, что  $NI$  принята как система регулируемых ветвей, необходима проверка с  $\Delta q_j$  и  $s_j$ , где  $\Delta q_j = |q_{0j} - q_{kj}|$ . Далее приведен конкретный метод определения регулируемых ветвей.

Ветви в  $NI$  и  $(E - NI)$  расположены в убывающем порядке  $\Delta q_j$ , а ветви, где  $s_j$  не удовлетворяет уравнению (11), размещены последними. Тогда можно получить  $E = (E_1, E_2, E_3)$ , где  $E_1$  — независимые ветви в  $NI$ ,  $E_2$  — ветви в  $(E - NI)$ , а  $E_3$  — ветви, не удовлетворяющие уравнению (11).

При  $|E_1| \geq nk$  первые  $nk$  ветви в  $E_1$  будут отобраны. При  $|E_1| < nk$  необходимо отобрать ветви из  $E_2$  как дополнение  $E_1$ , однако отобранные ветви и ветви в  $E_1$  должны быть независимы друг от друга. Этот процесс повторяется, пока число отобранных ветвей не достигнет  $nk$  или пока все ветви в  $E_2$  не пройдут испытания.

Отобранные ветви должны содержать ветвь линии  $C_x$ . Систему от ветвей, отобранных описанным методом, можно рассматривать как систему регулируемых ветвей и выразить в виде  $NS$ ,  $|NS| = ns$ .

### Стадии метода асимптотического расчета воздушного потока

Оптимизация вентиляционной сети на основе асимптотического расчета расхода воздуха использует имеющуюся программу анализа вентиляционной сети.

Стадия 1. Входные базовые данные:  $r_{0j}$ ,  $h_{fi}$ ,  $[lq_j, uq_j]$ ,  $[ls_j, us_j]$  и компьютерная точность  $\varepsilon_q$  при  $s_j = 0$ ,  $r_j = r_{0j}$  и  $w = 1$ , где  $w$  — число итераций.

Стадия 2. Вычисление  $q_j^w$ , используя  $r_j^w$  как сопротивление, и  $q_{mj}^w$ , используя  $q_{mj}^w$  ( $j \in NK$ ), полученное из уравнения (16), как фиксированное количество воздуха и  $r_j^w$  как сопротивление соответственно.

Стадия 3. Определение системы регулируемых ветвей  $NS$  методом, описанным выше.

Стадия 4.  $|q_j^w - q_j^{w-1}| \leq \varepsilon_q$  и  $q_j^w < lq_j$  ( $j \in NK$ ) указывают, что мощность вентилятора недостаточна для обеспечения заданного расхода воздуха. Методика расчетов не будет сходиться, и расчеты прекращают.

Стадия 5.  $\max |q_j^w - q_{mj}^{w-1}| \leq \varepsilon_q (j = 1, 2, \dots, b)$ , указывает, что  $s_{mj}^w$  и  $q_{mj}^w$  — оптимальные решения и расчеты завершены. В противном случае можно перейти к стадии 6.

Стадия 6. Пусть  $w = w + 1$ , вычислим  $s_{mj}^w = s_j^w + r_j^w ((q_j^w)^2 / (q_{mj}^w)^2 - 1) (j \in NS)$ ,  $r_j^w = r_{0j} + s_{mj}^w$  и  $s_j^w = s_{mj}^w$  и вернемся в стадию 2.

**РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ ВЕНТИЛЯТОРОВ**

Сначала рассмотрим систему с одним вентилятором, а затем перейдем к системам с более чем одним вентилятором.

*Система с одним вентилятором*

Если брать вентилятор с фиксированной производительностью, то расчеты представляют собой оптимальные решения. На практике вентилятор имеет допустимый диапазон регулирования:

$$lh_f \leq h_f \leq uh_f, \tag{18}$$

где  $h_f$  — аэродинамическая характеристика вентилятора;  $lh_f$  и  $uh_f$  — допустимый диапазон регулирования. Оптимальную рабочую точку вентилятора можно рассчитать методом бисекции.

Шаг 1. Вводятся начальная характеристика вентилятора  $h_f$ , допустимый диапазон регулирования  $|lh_f, uh_f|$ , расчетная невязка  $\varepsilon_f$  и длина шага  $l_f$ ; пусть  $k = 1$ , где  $k$  — число итераций.

Шаг 2. Моделирование оптимизации вентиляционной сети проводится с помощью метода асимптотического расчета воздушного потока.

Шаг 3. При сходимости результатов в шаге 2 и если результаты расчетов удовлетворяют  $lh_f \leq h_f^k \leq uh_f$  и  $l_f^k \leq \varepsilon_f$ , то  $S_m^k, Q_m^k$  и  $(h_f^k, q_f^k)$  являются оптимальными решениями и вычисления завершены. Если результаты расчетов в шаге 2 сошлись, а  $l_f^k \leq \varepsilon_f$ , то допустим  $k = k + 1$ ,  $l_f^k = l_f^{k-1}$  и  $h_f^k = h_f^{k-1} - l_f^k$  и вернемся в шаг 2; в противном случае пусть  $k = k + 1$ ,  $l_f^k = l_f^{k-1} / 2$  и  $h_f^k = h_f^{k-1} + l_f^k$  и возвращаемся к шагу 2.

*Мультивентиляторная система*

В случае работы системы из более чем одного вентилятора, множество вентиляторов можно преобразовать в один мнимый. Метод расчета с одним вентилятором все еще абсолютно приемлем при условии, что положительное регулирование разрешено для ветвей, содержащих вентилятор дополнительно к ветви с максимальным давлением воздуха, подаваемого вентилятором. Это не должно изменить результаты моделирования, поскольку структура вентиляционной сети не претерпевает каких-либо модификаций даже при преобразовании множества вентиляторов в один мнимый. Этот метод способен исключить проблему необходимости, вызванную совместным влиянием большого числа вентиляторов.

**ПРИМЕР РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ**

На рис. 1 показана схема простой вентиляционной сети с пятью заданными ветвями воздушного потока ( $NK = (e_9, e_{10}, e_{12}, e_{13}, e_{14})$ ) и вентилятором. Данные вентиляционной сети обобщены в табл. 1. Заданный расход воздуха упрощен в виде  $lq_j = uq_j = q_{kj} (j = 9, 10, 12, 13, 14)$



для облегчения анализа процесса моделирования. Цели моделирования – определение оптимального контроля вентиляционной сети и оптимальной рабочей точки вентилятора и изменение направления воздушного потока в заданной ветви  $e_9$ .

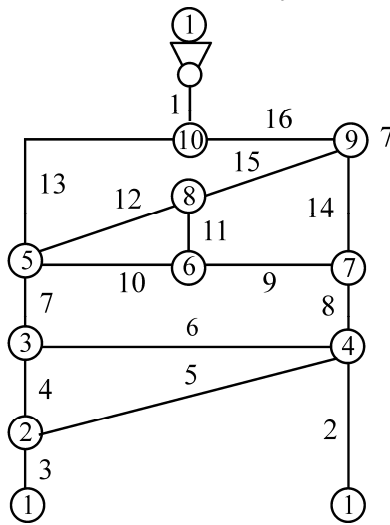


Рис. 1. Пример вентиляционной сети

ТАБЛИЦА 1. Входные данные вентиляционной сети

$f$	Вход	Выход	$r_{0j},$ Н·с <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>	$q_{kj},$ м <sup>3</sup> /с	$ls_j$ Н·с <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>	$us_j$ Н·с <sup>2</sup> /м <sup>8</sup>
1	10	1	0.2180	—	—	—
2	1	4	0.7080	—	—	—
3	1	2	0.0311	—	—	—
4	2	3	0.0033	—	0	> 0
5	2	4	0.6190	—	0	> 0
6	3	4	0.7470	—	0	> 0
7	3	5	0.0530	—	0	> 0
8	4	7	0.6240	—	0	> 0
9	7	6	0.4150	6	0	> 0
10	5	6	0.2500	9	0	> 0
11	6	8	2.5300	—	0	> 0
12	5	8	2.3700	18	0	> 0
13	5	10	2.2300	10	0	> 0
14	7	9	1.6200	9	0	> 0
15	8	9	0.2400	—	0	> 0
16	9	10	0.0660	—	0	> 0

1) Определение независимых ветвей

Количество воздуха  $q_j^1$  при естественном воздухораспределении и количество воздуха  $q_{mj}^1$  полуконтролируемого разделения потока в первой итерации приведены в табл. 2:  $q_j^1$  — количество воздуха в начальном состоянии,  $q_9^1$  — направление воздушного потока ветви  $e_9$  в интервале между соединительными узлами 6–7. Ориентированную матрицу на рис. 1 можно записать относительно направления потока  $q_{mj}^1$  в следующем виде:

$$C = \begin{matrix} & e_1 & e_2 & e_3 & e_4 & e_5 & e_6 & e_7 & e_8 & e_9 & e_{10} & e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \\ C_9 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} \end{matrix}$$

В  $C$  ветви, где сумма столбца равна единице, — это  $e_{10}$ ,  $e_{12}$  и  $e_{13}$ , а именно система независимых ветвей, определенных с помощью  $C$ :  $NI = (e_{10}, e_{12}, e_{13})$ .

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета воздухораспределения в сети

$j$	$q_j^1$	$q_{mj}^1$	$ q_{mj}^1 - q_j^1 $	$s_{mj}^1$ Н·с <sup>2</sup> /М <sup>8</sup>	$q_{mj}$ , м <sup>3</sup> /с	$s_{mj}$ Н·с <sup>2</sup> /М <sup>8</sup>
	м <sup>3</sup> /с					
1	52	52	0	—	52	—
2	9.392	9.506	0.114	—	9.506	—
3	42.608	42.494	0.114	—	42.494	—
4	39.496	38.940	0.556	> 0	38.940	—
5	3.112	3.554	0.442	< 0	3.554	—
6	1.065	1.940	0.875	< 0	1.940	—
7	38.431	37	1.431	> 0	37	—
8	13.569	15	1.431	< 0	15	—
9	-1.755	6	7.755	> 0	6	3.1399
10	12.029	9	3.029	> 0	9	2.2022
11	10.274	15	4.726	< 0	15	—
12	11.312	18	6.688	= 0	18	0
13	15.090	10	5.090	< 0	10	9.292
14	15.324	9	6.324	> 0	9	10.2951
15	21.586	33	11.414	< 0	33	—
16	36.910	432	5.090	< 0	432	—
Давление вентилятора, Па						1875.39
Производительность вентилятора, м <sup>3</sup> /с						52

2) Определение регулируемых ветвей

Ветви на рис. 1 классифицированы в порядке:  $E = (E_1, E_2, E_3)$ , затем  $E_1 = (e_{12}, e_{13}, e_{10})$ ,  $E_2 = (e_{14}, e_7, e_4)$  и  $E_3 = (e_1, e_2, e_3, e_5, e_6, e_8, e_9, e_{11}, e_{15}, e_{16})$ . Число ветвей в  $E_1$  меньше, чем  $nk = 5$ , регулируемые ветви следует отбирать в  $E_2$  как дополнение  $E_1$ .

(а) Ветвь  $e_{14}$  в  $E_2$  и  $E_1 = (e_{12}, e_{13}, e_{10})$  независимы друг от друга. Ветвь  $e_{14}$  может быть выбрана как регулируемая.

(б) Ветви  $e_7$ ,  $e_4$  и  $e_{12}$  принадлежат одной траектории  $C_8 = (e_1, e_3, e_4, e_7, e_{12}, e_{15}, e_{16})$  и не зависят друг от друга. Ветви  $e_7$  и  $e_4$  не могут быть выбраны как регулируемые.

(в) Потери давления на линии  $C_8$  максимальные. Ветвь  $e_{12}$  является регулируемой ветвью линии  $C_8$ .

В ходе анализа определена система  $NS = (e_{10}, e_{12}, e_{13}, e_{14})$  регулируемых ветвей. Однако она не является оптимальной, поскольку  $|NS| = 4$  меньше  $nk$ .

### 3) Асимптотический расчет расхода воздуха

Изменения расхода воздуха и дополнительного сопротивления регулируемых ветвей в процессе асимптотического расчета расхода воздуха показаны на рис. 2, однако без ветви  $e_{12}$ , поскольку дополнительное сопротивление ветви  $e_{12}$  равно нулю во всем процессе вычислений.

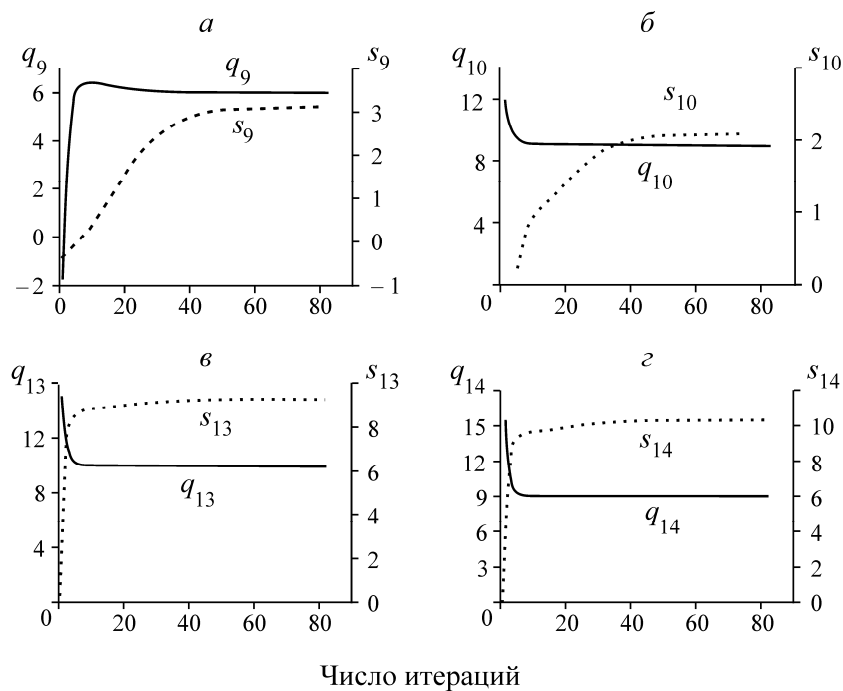


Рис. 2. Изменения воздушного потока и дополнительного сопротивления регулируемых ветвей

На рис. 2а  $q_9^1 = -1.755 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $s_9^1 < 0$  не удовлетворяют уравнению (11) в первой итерации, ветвь  $e_9$  не может быть выбрана как регулируемая. Во второй итерации  $q_9^2 = 2.4471 \text{ м}^3/\text{с}$  воздушный поток ветви  $e_9$  направляется от соединительного узла 7 к 6. В пятой итерации  $q_9^5 = 6.0433 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $s_9^5 > 0$  удовлетворяют уравнению (11). Ветвь  $e_9$  и  $(e_{10}, e_{12}, e_{13}, e_{14})$  не зависят друг от друга, следовательно ветвь  $e_9$  может быть выбрана как регулируемая. На основании пятой итерации система регулируемых ветвей имеет вид  $NS = (e_9, e_{10}, e_{12}, e_{13}, e_{14})$ . Оптимальные решения показаны в табл. 2.

### 4) Анализ результатов моделирования

$NS = NK = (e_9, e_{10}, e_{12}, e_{13}, e_{14})$ , т. е. система регулируемых ветвей идентична системе регламентированных ветвей расхода воздуха; падение давления на линии  $C_8$  максимальное, регулируемая ветвь на  $C_8$  — это ветвь  $e_{12}$ ,  $s_{m12} = 0$ ;  $q_{mj} = q_{kj}$  ( $j = 9, 10, 12, 13, 14$ ), или расчетное количество воздуха для всех заданных ветвей равно заданному расходу воздуха. Следовательно, результаты в табл. 2 представляют собой оптимальные решения.

$NS = (e_9, e_{10}, e_{12}, e_{13}, e_{14})$ , определенная по матрице ориентированной цепи  $C$  и  $\Delta q_j$ , абсолютно корректна, поскольку результаты в табл. 2 являются оптимальными решениями.

$NS = (e_9, e_{10}, e_{12}, e_{13}, e_{14})$  и  $(e_5, e_6)$  образуют завершенное кодерево и не зависят друг от друга. Тем не менее  $e_5$  и  $e_6$  нельзя выбрать в качестве регулируемых ветвей, так как независимые контуры  $(e_2, e_3, e_5)$  и  $(e_2, e_3, e_4, e_6)$ , содержащие  $e_5$  и  $e_6$ , не являются ориентированными и не содержат заданную ветвь расхода воздуха. Это также ключевая точка использования ориентированной матрицы для выбора регулируемых ветвей.

Из табл. 2 очевидно, что расход воздуха  $q_{mj}^1$  в первой итерации и оптимальное решение  $q_{mj}$  идентичны, поскольку регулируемые ветви и ветви регламентированного расхода идентичны. В этом случае результат анализа вентиляционной сети с использованием регламентированного расхода воздуха в качестве фиксированного количества воздуха представляет собой оптимальное распределение количества воздуха.

#### АНАЛИЗ МЕТОДА РАСЧЕТА И УСЛОВИЯ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

В ходе анализа влияния положительного и отрицательного регулирования на суммарные вентиляционные затраты установлено, что чем ниже дополнительное сопротивление и меньше регуляторов, тем выше экономическая эффективность вентиляции независимо от того, было регулирование положительным или отрицательным. На основании данного вывода разработана математическая модель оптимизации вентиляционной сети.

В Китае не допускается использование вспомогательных вентиляторов в угольных шахтах, поэтому нет необходимости обсуждать в данной работе их влияние на суммарную стоимость вентиляции. Математическая модель содержит ограничения для регламентированного расхода воздуха, сопротивления ветвей, главных вентиляторов в уравнениях (10), (11) и (18), без ограничений для вспомогательных вентиляторов. Данный метод оптимизации пригоден для контроля расхода воздуха при положительном и отрицательном регулировании и контроля главных вентиляторов, за исключением вспомогательных.

Как показано на примере, если ограничение для регламентированного расхода воздуха (уравнение (10)) имеет вид

$$lq_j = q_j = uq_j \quad (j \in NK), \quad (19)$$

производительность главных вентиляторов можно рассматривать как фиксированную, а скорость сходимости в этом методе как очень быструю. Однако при  $lq_j \leq q_j \leq uq_j$  ( $j \in NK$ ) необходимо использовать метод бисекции для определения оптимальной рабочей точки главных вентиляторов. Несмотря на то что данный метод расчета считается простым и надежным с возможным увеличением числа итераций в десятки раз, необходимы дальнейшие исследования и совершенствования метода расчета оптимальной рабочей точки главных вентиляторов.

#### ВЫВОДЫ

Оптимизация шахтной вентиляционной сети должна минимизировать суммарные затраты, которые включают энергозатраты на вентиляцию и стоимость инженерных сооружений. Исходя из этого, разработана многоцелевая математическая модель и алгоритм оптимизации на основе асимптотического расчета расхода воздуха. Сделаны следующие выводы.

Чем ниже дополнительное сопротивление и меньше число регуляторов, тем выше экономическая эффективность вентиляции независимо от того, положительное регулирование или отрицательное. Другими словами, вентиляционная сеть, в которой возможно создать регламентированный расхода воздуха на всех производственных участках путем разделения свободного потока без регулирования, является максимально лучшей.

Число регулируемых ветвей при оптимизации вентиляционной сети равно числу ветвей с регламентированным расхода воздуха.

Систему регулируемых ветвей можно определить с помощью ориентированной матрицы траектории заданного расхода воздуха.

Воздухораспределение, полученное в результате анализа вентиляционной сети с применением заданного расхода воздуха в качестве фиксированного, идентично ветвям с регламентированным расходом воздуха.

Метод асимптотического расчета расхода воздуха — простой и доступный. Нет необходимости решать крупномасштабные нелинейные задачи программирования, при этом отсутствует проблема сходимости, вызванная взаимным влиянием нескольких вентиляторов. Анализ примера показал, что результаты метода асимптотического расчета расхода воздуха представляют собой оптимальные решения.

Метод оптимизации, предложенный в данной работе, приемлем для контроля расхода воздуха с положительным или отрицательным регулированием и для контроля главных вентиляторов, за исключением контроля расхода воздуха вспомогательных вентиляторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Acuña E. and Lowndes I.** A review of primary mine ventilation system optimization, *Interfaces*, 2014, Vol. 44, No. 2. — P. 163–175.
2. **Babu V. R., Maity T., and Prasad H.** Energy Saving Techniques for Ventilation Fans Used in Underground Coal Mines – A Survey 1, *J. Mining Science*, 2015, Vol. 51, No. 5. — P. 1001–1008.
3. **Wu X. and Topuz E.** Analysis of mine ventilation systems using operations research methods, *International transactions in operational research*, 1988, Vol. 5, No. 4. — P. 245–254.
4. **Kamba G., Lacques E., and Patigny, J.** Application of the simplex method to the optimal adjustment of the parameters of a ventilation network, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> US mine ventilation symposium (Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Englewood, CO)*, 1993. — P.461–466.
5. **Chen K., Si J., Zhou F., Zhang R., Shao H., and Zhao H.** Optimization of air quantity regulation in mine ventilation networks using the improved differential evolution algorithm and critical path method, *Int. Journal of Mining Science and Technology*, 2015, Vol. 25, No. 1. — P.79–84.
6. **Hu W. and Longson I. A.** Computer Method for the Generalized Controlled Flow Problem in Ventilation Networks, *J. Mining Science and Technology*, 1989, Vol. 8, No. 2. — P. 153–167.
7. **Huang C. and Wang Y. J.** Mine ventilation network optimization using the generalized reduced gradient method, *Proceeding of the 6<sup>th</sup> US mine ventilation symposium (Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Englewood, CO)*, 1993.— P.153–161.
8. **Xie X., and Zhao Z.** Nonlinear programming problems in mine ventilation networks and their solutions, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1993, Vol. 3, No. 2. — P. 88–91.
9. **Huang Y. and Li H.** Solution of problems relevant to optimal control of mine ventilation network by nonlinear programming technique, *J. China Coal Society*, 1995, Vol. 20, No. 1. — P.14–20.
10. **Acuña E., Hall S., Hardcastle S., and Fava L.** The application of a MIP model to select the optimum auxiliary fan and operational settings for multiple period duties, *Information Systems and Operational Research*, 2010, Vol. 48, No. 2. — P. 95–102.
11. **Nyaaba W., Frimpong S., and El-Nagdy K.** Optimization of mine ventilation networks using the Lagrangian algorithm for equality constraints, *Int. Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2015, Vol. 29, No. 3. — P. 201–212.

12. **Lowndes I. and Yang Z.** The application of GA optimization methods to the design of practical ventilation systems for multi-level metal mine operations, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology, 2004, Vol. 113, No. 1. — P. 43–58.
13. **Li J., Chen K., and Lin B.** Genetic Algorithm for the Optimization of Mine Ventilation Network, J. China University of Mining & Technology, 2007, Vol. 30, No. 6. — P. 789–793.
14. **Acuña E., Maynard R., Hall S., Hardcastle S., Li G., Lowndes I., and Tonnos A.** Practical mine ventilation optimization based on genetic algorithms for free splitting networks, Proceeding of the 13<sup>th</sup> US mine ventilation symposium (Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Englewood, CO), 2010. — P. 379–385.
15. **Kozyrev S. A. and Osintseva A. V.** Optimizing arrangement of air distribution controllers in mine ventilation system, J. Mining Science, 2012, Vol. 48, No. 5. — P. 896–903.
16. **Sui J., Yang L., Zhu Z., and Fang H.** Mine ventilation optimization analysis and airflow control based on harmony annealing search, J. Computers, 2011, Vol. 6, No. 6. — P. 1270–1277.
17. **Guo Y., Wang C., and Yang J.** Mine ventilation network based on cultural particle swarm optimization algorithm, J. Southeast University (Natural science Edition), 2013, Vol. 43, No. (S1), — P. 48–53.
18. **Li B., Uchino K., and Inoue M.** The optimization of ventilation network by control of resistances, J. the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1995, Vol. 111, No. 12. — P. 829–834.
19. **Li B., Inoue M., and Uchino K.** A new method for optimization of ventilation network with a main fan in consideration of network characteristics, J. the Mining and Metallurgical Institute of Japan, 1996, Vol. 112, No. 3. — P. 147–152.
20. **Moll A. T. and Lowndes I.** An approach to the optimization of multi-fan ventilation systems in UK coal mines, J. the Mine Ventilation Society of South Africa, 1994, Vol. 47, No. 1. — P. 2–18.

*Поступила в редакцию 3/VII 2017*