

UDC 622.411.332 (574.31)

Quasianalog Transformation of Compound Ventilating Network¹Zhorzh G. Levitskiy²Zhenis Zh. Imanov³Assel D. Nurgaliyeva

¹Karaganda State Technical University, Kazakhstan
Bulvar Mira 56, Karaganda, 100026
Dr. (Technical), professor
E-mail: m611adn@mail.ru

²Karaganda State Technical University, Kazakhstan
Bulvar Mira 56, Karaganda, 100026
PhD (Technical), assistant professor
E-mail: m611adn@mail.ru

³Karaganda State Technical University, Kazakhstan
Bulvar Mira 56, Karaganda, 100026
PhD (Technical), senior teacher
E-mail: m611adn@mail.ru

Abstract. The article considers modeling of quasianalog mine ventilating circuits.

Keywords: ventilating network; transformation; polygon; depression; air consumption; multiterminal network; quasianalog model.

Введение. Изображение шахтной вентиляционной сети в виде плоского или объёмного графа является трудоёмким процессом и опирается на пространственную интерпретацию плана горных работ для угольных шахт, а также на погоризонтные планы и аксонометрические схемы для рудников [1, 2]. Усложняющими факторами при построении расчётных вентиляционных аналогов является то, что горные работы непрерывно перемещаются в пространстве, изменяют свою форму, размеры и положение. А на большинстве рудников нельзя получить полную исходную информацию о состоянии вентиляционных сетей из-за значительных по протяженности обрушений и провалов, создающих сложные аэродинамические связи между горизонтами и поверхностью. На таких участках практически невозможно по условиям безопасности проведение аэродинамических съёмок, что, в свою очередь, не позволяет построить базовую расчётную модель, которая отображала бы реальную вентиляционную сеть и была бы ей энергетически подобна. Такое положение является основной причиной того, что построенные на основе существующих методик расчётные вентиляционные модели для рудников, имеющих обширные участки выработанных пространств, обрушений и провалов, по топологическим и аэродинамическим характеристикам не соответствуют фактическому состоянию реальных вентиляционных систем и практически непригодны для решения задач по выбору рациональных режимов вентиляции и эффективному управлению проветриванием подземных выработок.

Вопросам построения и преобразования расчётных вентиляционных схем шахт и рудников в научно-исследовательской литературе уделено большое внимание. Усилиями многих учёных разработано значительное количество разнообразных подходов, методов и приёмов к построению и последующему преобразованию расчётных вентиляционных схем [3-7]. Однако, оценивая все существующие способы подготовки расчётных вентиляционных схем к анализу, следует отметить следующее:

– во-первых, алгоритмы преобразования выполняются в строгой последовательности на заданной топологии вентиляционных сетей. Такой подход исключает возможность выделять отдельные участки, произвольным образом расположенные в исходной сети, из общей вентиляционной схемы;

– во-вторых, предлагаемые методы преобразований в силу строгой очерёдности выполняемых операций не являются универсальными, а зависят, главным образом, от типа

соединений ветвей и сложности вентиляционной сети, что требует конкретного подхода к каждой вентиляционной схеме. Это исключает возможность разработки единого алгоритма с использованием ЭВМ для построения аналогов, замещающих шахтные вентиляционные сети сетями меньшей размерности.

Учитывая, что в условиях действующих шахт и рудников интенсивным изменениям подвергаются только отдельные объекты, то имеет смысл перейти к локальным способам преобразования, т.е. сохранить нетронутой ту часть расчётной схемы, которая наиболее востребована для её детального анализа и выяснения условий проветривания, заменяя оставшуюся часть исходной схемы или её отдельный участок эквивалентом меньшей размерности [8, 9].

Успешная реализация локальных способов преобразования возможна в том случае, если построенные на их основе расчётные вентиляционные схемы будут обеспечивать выполнение следующих требований:

1. область аппроксимации параметров преобразуемой сети должна удовлетворять наиболее широкому диапазону решаемых задач по оценке условий проветривания подземных выработок;

2. выполняемые преобразования должны допускать возможность сокращения любого числа ветвей шахтной вентиляционной сети вплоть до оставления вентиляторов главного проветривания и воздуховыдающих стволов;

3. результаты расчётов по распределению воздуха в оставшихся, не подвергнутых преобразованиям, ветвях преобразованной вентиляционной схемы должны быть адекватны таковым в аналогичных ветвях реальной вентиляционной сети в процессе изменения граничных условий;

4. выполняемые преобразования должны обеспечить возможность построения расчётных аналогов вентиляционных схем, имеющих на территории шахтного поля участки с неясной топологией (обрушения, завалы, провалы, затопления и т.д.), проведение депрессионных съёмов в которых ограничено или невозможно по вопросам безопасности.

Решение поставленной задачи достигается на основе многоугольника (Рис. 1), который позволяет, с учётом вышеизложенных требований, преобразовывать исходную сеть в квазианалоговые модели.

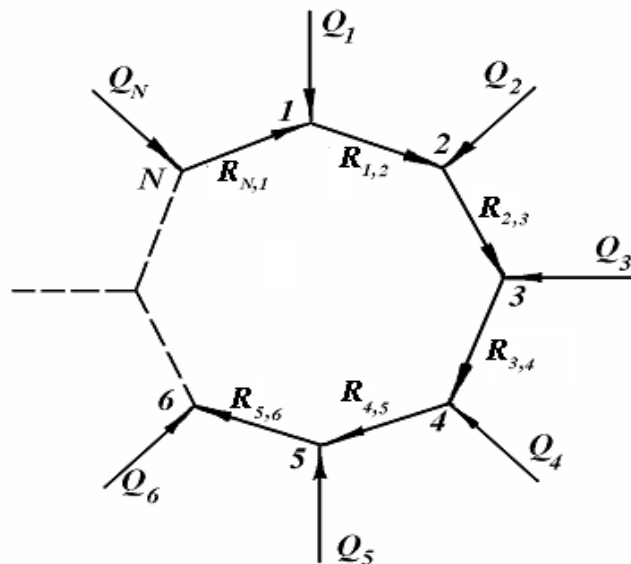


Рис. 1. Общий вид аппроксимирующего многоугольника

Синтез данной структуры в общем случае связан с определением N неизвестных сопротивлений R_{ij} сторон многоугольника и сопутствующих им N неизвестных расходов Q_{ij} , т.е. общее количество определяемых величин составляет $2N$, где N – количество узлов в многоугольнике. Общее число сторон и узлов в многоугольнике зависит от объёма упрощаемого участка и определяется в каждом конкретном случае условиями решаемой задачи.

В качестве исходного состояния вентиляционной системы выбираются два базовых режима, которые могут быть получены расчётным путём или по данным замеров в условиях шахт при изменении любых, не подвергаемых преобразованию, элементов расчётной схемы.

Система уравнений, описывающая многоугольник по первому базовому режиму, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q'_1 = Q'_{1,2} - Q'_{N,1}; \\ Q'_2 = Q'_{2,3} - Q'_{1,2}; \\ \dots \dots \dots \\ Q'_{N-1} = Q'_{N-1,N} - Q'_{N-2,N-1} \\ H'_{1,2} = R'_{1,2} (Q'_{1,2})^2; \\ H'_{2,3} = R'_{2,3} (Q'_{2,3})^2; \\ \dots \dots \dots \\ H'_{N,1} = R'_{N,1} (Q'_{N,1})^2. \end{array} \right. \quad (1)$$

Система насчитывает $N - 1$ уравнений для узлов по первому закону и N уравнений для внешних контуров многоугольника по второму закону сетей, т.е. общее количество уравнений составляет $2N - 1$, что на единицу меньше требуемого. Составим систему уравнений, соответствующую второму базовому режиму:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q''_1 = Q''_{1,2} - Q''_{N,1}; \\ Q''_2 = Q''_{2,3} - Q''_{1,2}; \\ \dots \dots \dots \\ Q''_{N-1} = Q''_{N-1,N} - Q''_{N-2,N-1} \\ H''_{1,2} = R''_{1,2} (Q''_{1,2})^2; \\ H''_{2,3} = R''_{2,3} (Q''_{2,3})^2; \\ \dots \dots \dots \\ H''_{N,1} = R''_{N,1} (Q''_{N,1})^2, \end{array} \right. \quad (2)$$

где Q_1, Q_2, \dots, Q_N – расходы воздуха, поступающие к узлам многоугольника, или уходящие из них;

$H_{1,2}, H_{2,3}, \dots, H_{N,1}$ – депрессии ветвей между узлами многоугольника.

Т.к. вентиляционный многополюсник должен удовлетворять двум базовым режимам, то естественным является выполнение условия:

$$R'_{ij} = R''_{ij} = R_{ij}. \quad (3)$$

Сравнивая в (1) и (2) соответствующие уравнения, составленные по второму закону сетей и имея в виду (3), приходим к выводу, что

$$K_{ij} = \frac{Q''_{ij}}{Q'_{ij}}, \quad (4)$$

где K_{ij} – коэффициенты перехода, которые определяются по формуле

$$K_{ij} = \sqrt{\frac{H''_{ij}}{H'_{ij}}}. \quad (5)$$

Выражение (4) устанавливает взаимосвязь между расходами воздуха в одних и тех же ветвях многоугольника при изменении режима работы вентиляционной сети и позволяет взаимно переходить от расходов воздуха в одном режиме к соответствующим расходам в другом режиме.

Используя данное свойство, дополним группу линейных уравнений системы (1) одним из уравнений системы (2). При этом выбор дополняющего уравнения должен соответствовать базовому узлу, который выбирается в качестве исходного. Для простоты дальнейшего анализа остановимся на первом уравнении системы (2), соответствующего узлу №1, и получим:

$$\begin{cases} Q'_1 = Q'_{1,2} - Q'_{N,1}; \\ Q'_1 = K_{1,2}Q'_{1,2} - K_{N,1}Q'_{N,1}; \\ Q'_2 = Q'_{2,3} - Q'_{1,2}; \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ Q'_{N-1} = Q'_{N-1,N} - Q'_{N-2,N-1}, \end{cases} \quad (6)$$

откуда находим все неизвестные потоки Q'_{ij} первого базового режима. Возвращаясь к нелинейной группе уравнений системы (1), определяем искомые сопротивления R_{ij} всех сторон многоугольника, т.е.:

$$R_{1,2} = \frac{H'_{1,2}}{(Q'_{1,2})^2}, R_{2,3} = \frac{H'_{2,3}}{(Q'_{2,3})^2}, \dots, R_{N,1} = \frac{H'_{N,1}}{(Q'_{N,1})^2}. \quad (7)$$

Обобщая изложенное, приходим к следующему алгоритму построения многоугольника, аппроксимирующего отдельные участки расчётной схемы.

1. Составляется расчётная вентиляционная схема шахты. Определяются участки, подлежащие преобразованию. Выделяются узлы, которые оконтуривают упрощаемый участок и одновременно являются вершинами многоугольника.

2. Рассчитывается первый базовый вариант естественного потокораспределения или используются результаты депрессионной съёмки, по данным которых:

а) определяются направления и расходы воздуха для выбранных узлов $Q'_i, i = 1, 2, \dots, N$;

б) находятся узловые давления, $P'_i, i = 1, 2, \dots, N$, после чего рассчитываются потери напора между узлами многоугольника $H'_{ij} = P'_j - P'_i$.

3. В расчётной схеме, не подвергаемой преобразованию, регулирующим (одной или несколькими) выработкам придаются новые значения аэродинамических сопротивлений. Производится расчёт второго базового режима или проводится повторная депрессионная съёмка, по результатам которых, аналогично пункту 2, находятся направления и численные значения $Q''_i, i = 1, 2, \dots, N$ и H''_{ij} .

4. Выбирается i -й базовый узел, для которого согласно (5) вычисляются коэффициенты $K_{i,i-1}$ и $K_{i,i+1}$.

5. Для выбранного многополюсника, начиная с базового узла, по первому закону сетей составляется линейная система уравнений вида (6), откуда определяются неизвестные потоки Q'_{ij} .

6. По формуле (7) находятся искомые сопротивления ветвей R_{ij} .

Предлагаемый алгоритм отличается простотой преобразования вентиляционных сетей и допускает на основе одних и тех же базовых данных создание любого числа многополюсников, замещающих отдельные фрагменты вентиляционной сети шахты или рудника с известной или неопределенной топологией.

Пусть требуется преобразовать расчётную вентиляционную схему, представленную на рис. 2, таким образом, чтобы, заменяя в той или иной последовательности её отдельные участки аппроксимирующими многоугольниками (Рис. 3, 4), получать различные варианты квазианалоговых моделей исходной вентиляционной сети.

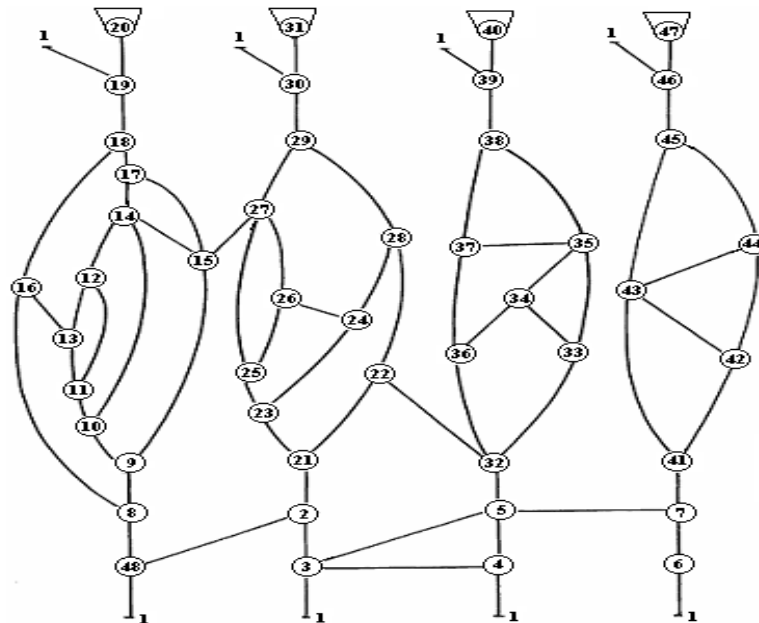


Рис. 2. Исходная расчётная вентиляционная сеть

Порядок решения рассмотрим на примере преобразования участка №1 (Рис. 3, а). На рис. 3, б представлен треугольник, аппроксимирующий участок №1. Необходимо найти сопротивления его ветвей.

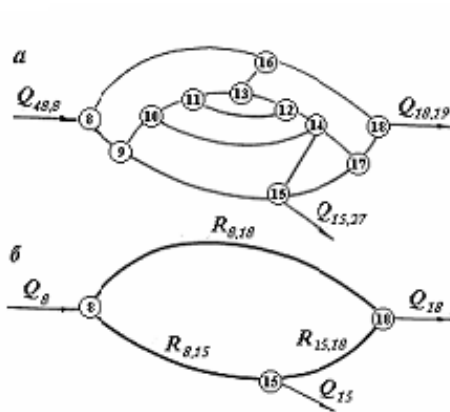


Рис. 3. Участок №1 и его аналог

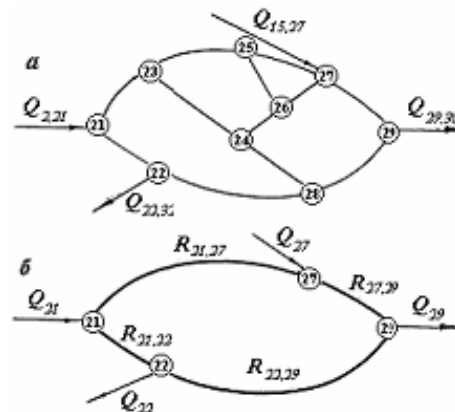


Рис. 4. Участок №2 и его аналог

Шаг 1. По данным выполненного расчёта естественного распределения воздуха для первого базового режима при заданном сопротивлении ветви $R_{5,32} = 0,01$ даПа $^2/м^6$ были установлены:

1. Узловые расходы:

$$Q'_8 = Q_{48,8} = 68,6810 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q'_{15} = Q_{15,27} = 6,0430 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q'_{18} = Q_{18,19} = 62,6378 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Узловые давления:

$$P'_8 = h_{1,48} + h_{48,8} = 29,2475 + 92,6433 = 121,8908 \text{ даПа};$$

Соответственно, $P'_{15} = 212,6958 \text{ даПа}$; $P'_{18} = 298,1305 \text{ даПа}$.

3. Потери напора между узлами:

$$H'_{8,15} = P'_{15} - P'_8 = 212,6958 - 121,8908 = 90,805 \text{ даПа.}$$

$$\text{Аналогично: } H'_{8,18} = 176,2397 \text{ даПа; } H'_{15,18} = 85,4347 \text{ даПа..}$$

Шаг 2. По данным расчёта естественного распределения воздуха для второго базового режима после придания сопротивлению ветви значения $R_{5,32}=1,0 \text{ даПа}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6$ были получены следующие результаты:

$$\begin{aligned} Q''_8 &= 70,2274 \text{ м}^3/\text{с}; & Q''_{15} &= 9,1632 \text{ м}^3/\text{с}; & Q''_{18} &= 61,0642 \text{ м}^3/\text{с}; \\ P''_8 &= 130,2016 \text{ даПа}; & P''_{15} &= 225,3179 \text{ даПа}; & P''_{18} &= 306,7859 \text{ даПа}; \\ H''_{8,15} &= 95,1163 \text{ даПа}; & H''_{8,18} &= 176,5843 \text{ даПа}; & H''_{15,18} &= 81,468 \text{ даПа..} \end{aligned}$$

Шаг 3. Принимаем узел 8 за базовый и, согласно (5), вычисляем коэффициенты перехода K_{ij} :

$$K_{8,15} = \sqrt{\frac{H''_{8,15}}{H'_{8,15}}} = \sqrt{\frac{95,1163}{90,8050}} = 1,0235; \quad K_{8,18} = \sqrt{\frac{H''_{8,18}}{H'_{8,18}}} = \sqrt{\frac{176,5843}{176,2397}} = 1,0010.$$

Шаг 4. Начиная с базового узла, для аппроксимирующего аналога (Рис. 3, б) составляем систему уравнений вида (6):

$$\begin{cases} Q'_8 = Q'_{8,15} + Q'_{8,18}; \\ Q''_8 = K_{8,15}Q'_{8,15} + K_{8,18}Q'_{8,18}; \\ Q'_{18} = Q'_{8,18} + Q'_{15,18}. \end{cases}$$

Подставляя данные, находим:

$$\begin{cases} 68,681 = Q'_{8,15} + Q'_{8,18}; \\ 70,2274 = 1,0235Q'_{8,15} + 1,001Q'_{8,18}; \\ 62,6378 - Q'_{8,18} + Q'_{15,18}. \end{cases}$$

Откуда следует:

$$Q'_{8,15} = 65,6764 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q'_{8,18} = 3,0046 \text{ м}^3/\text{с}; \quad Q'_{15,18} = 59,6332 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Шаг 5. По формулам (7) находим искомые сопротивления сторон аппроксимирующего треугольника:

$$\begin{aligned} R_{8,15} &= \frac{H'_{8,15}}{(Q'_{8,15})^2} = \frac{90,805}{65,6764^2} = 0,02105 \text{ даПа}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6; \\ R_{8,18} &= \frac{H'_{8,18}}{(Q'_{8,18})^2} = \frac{176,2397}{3,0046^2} = 19,5223 \text{ даПа}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6; \\ R_{15,18} &= \frac{H'_{15,18}}{(Q'_{15,18})^2} = \frac{85,4347}{59,6332^2} = 0,02402 \text{ даПа}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6. \end{aligned}$$

Треугольник, аппроксимирующий участок №1, построен. Если теперь в исходной расчётной схеме (Рис. 2) заменить участок №1 его аналогом (Рис. 3, б), то получим упрощённую модель расчётной схемы. Связующими элементами с исходной сетью являются ветви 48-8, 15-27 и 18-19.

Точно также рассчитывается аналог для второго участка. Что касается участков №3 и №4, имеющих один вход и выход, то их преобразование не вызывает трудностей. Эквивалентные сопротивления соединений между узлами 32, 38 и 41, 45 легко определяются по любому из базовых режимов. Итоговые расчёты представлены в таблице.

Результаты расчёта сопротивлений ветвей аналогов

Номер преобразуемого участка	Код ветви		Сопротивление, даПа·с ² /м ⁶
	начальный	конечный	
1 (Рис. 3, б)	8	15	0,02105
	8	18	19,52230
	15	18	0,02402
2 (Рис. 4, б)	21	22	0,004129
	21	27	0,10247
	22	29	0,01841
3	27	29	0,00905
	32	38	0,02728
4	41	45	0,17474

Используя построенные многоугольники, можно получать различные варианты моделей, которые будут энергетически подобны исходной вентиляционной сети в широком диапазоне изменения граничных условий.

Так, на рис. 5 представлена упрощенная модель расчётной вентиляционной схемы с заменой всех четырёх участков. На рис. 6 изображена та же схема, но с заменой первого и четвёртого участков.

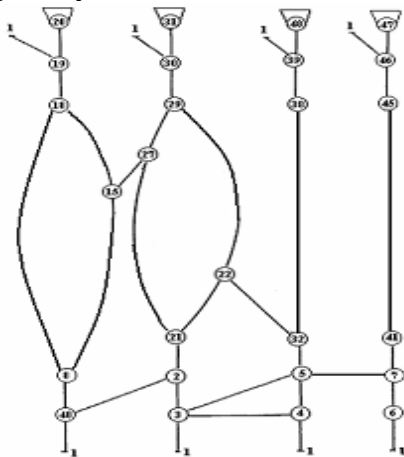


Рис. 5. Преобразованная схема с заменой четырёх участков

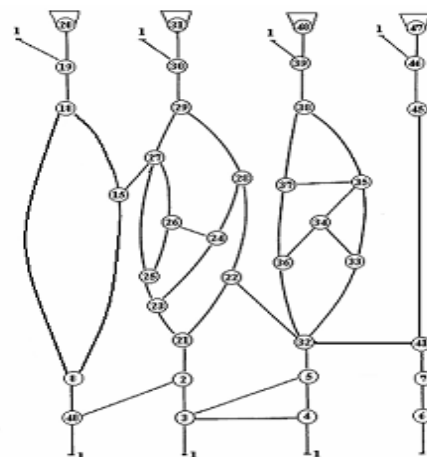


Рис. 6. Преобразованная схема с заменой первого и четвёртого участков

Таким образом, рассмотренный способ преобразования обладает тем достоинством, что в зависимости от поставленной задачи позволяет формировать различного рода аналоги меньшей размерности. Кроме того, построенная модель остаётся эквивалентной исходной схеме и в том случае, когда вентиляционная сеть развивается во времени. При появлении новых элементов или ликвидации старых достаточно в непреобразуемые участки расчётных схем аппроксимирующих моделей внести такие же изменения, какие имеют место для тех же участков в реальной схеме. Применение локальных способов преобразования является эффективным и при построении расчётных вентиляционных схем в условиях неполной топологической информации. Например, на рудниках, имеющих обширные зоны обрушений и завалов, где проведение депрессионных съёмов невозможно или крайне затруднено, расчётные схемы могут быть построены с заменой таких зон аппроксимирующими многоугольниками.

Выводы. Возникновение и развитие аварии в угольных шахтах при взрывах метана, как правило, характеризуется значительными разрушениями вентиляционных сооружений (разрушение перемычек, завалы, деформация крепления на значительных пространствах и

т.д.), что приводит к нарушению режимов проветривания лав и забоев. Неопределённость топологии сети и величин аэродинамических параметров элементов сети, подвергшихся разрушению, зачастую исключают возможность выполнения вентиляционных расчётов в аварийной сети, что может отрицательно сказываться на безопасности персонала, застигнутого аварией в шахте и темпах ведения работ по ликвидации аварии. Применение метода двухрежимных нелинейных многополюсников позволяет выполнять расчёты распределения воздуха в ветвях аварийной сети, даже при отсутствии информации о некоторых элементах исходной схемы, подвергшихся изменению в момент аварии и возможность доступа к которым в аварийной обстановке исключена, для чего предлагается аварийный участок включать в вентиляционный многополюсник. Теоретически в аварийной ситуации возможны те же методы получения исходных параметров для узлов и ветвей связи многополюсника, что и при нормальных технологических процессах. Однако, непосредственный замер параметров на аварийном участке является трудноосуществимым и сопряжен с риском для жизни работников спасательных служб.

В этой связи, очевидно, назрела необходимость, с целью повышения безопасности работ в системе подземных выработок, разработка новых и внедрение действующих автоматизированных систем централизованного контроля аэрогазовой обстановки [10], которая при выходе каких-либо параметров за допустимые пределы должна оперативно оповещать об этом диспетчерский персонал. В момент аварии на каком-то, заранее неизвестном, участке сети может произойти частичное изменение топологии сети из-за разрушений, а также выход из строя части датчиков, измеряющих скорость движения воздуха и давление. Оставшиеся неповреждёнными датчики скорости воздуха и давления продолжают выдавать информацию в систему аэрогазового контроля о расходах воздуха и его направлениях в местах их установки. В этом случае данные ветви и узлы, соответственно, становятся ветвями и узлами связи многополюсника, который будет оконтуривать зону аварии. На основе выдаваемой информации строится многополюсник, замещающий зону с нарушенными аэродинамическими связями, определяются аэродинамические параметры фиктивных ветвей и производится построение новой расчётной вентиляционной схемы с включением многополюсника, замещающего аварийный участок, и далее выполняются расчёты, диктуемые оперативной обстановкой по ликвидации аварии.

Примечания:

1. Абрамов Ф.А., Тян Р.Б., Потемкин В.Я. Расчёт вентиляционных сетей шахт и рудников. М.: Недра, 1978. 232 с.
2. Карташев В. М. Составление схем вентиляционных соединений рудничной сети горных выработок // Труды ЦНИИПП. 1975. № 12. С. 79–83.
3. Бойко В.А., Кременчуцкий Н.Ф. Основы теории расчёта вентиляции шахт. М.: Недра, 1978. 280 с.
4. Кременчуцкий Н.Ф. Методы расчёта и преобразования сложных диагональных соединений выработок // Изв. вузов. Горный журнал. 1974. № 12. С. 56–62.
5. Левицкий Ж.Г. Шахтные вентиляционные сети. Караганда: КарГТУ, 2012. 209 с.
6. Вязниковцев Е.В., Слепых В.Ф. Преобразование сложных вентиляционных схем в линейно-лучевые и методика поэтапного расчета сети // Сб. «Вентиляция и газопылеподавление на рудниках Казахстана» // Труды ИГД Каз. ССР, Алма-Ата, 1971. Т. 49. С. 3–13.
7. Цой С., Рязанцев Г.К. Принцип минимума и оптимальная политика управления вентиляционными и гидравлическими сетями. Алма-Ата: Наука, 1968. 258 с.
8. Левицкий Ж.Г., Иманов Ж.Ж. Локальные преобразования шахтных вентиляционных схем // Изв. вузов. Горный журнал. 1986. № 11. С. 40–43.
9. Патент РФ № 2011843, Е 21 Г 1/02, 30.04.94. Левицкий Ж.Г., Иманов Ж.Ж., Невозинский А.К. Способ синтеза аэродинамических сопротивлений ветвей вентиляционного многополюсника // Бюл. № 8.
10. Патент DE 3508403 С2 ФРГ NO2J 13/00, 08.03.90. Багин С.И., Кан О.А., Местер И.М. (СССР) Искробезопасная система.

УДК 622.411.332 (574.31)

Квазианалоговое преобразование сложной вентиляционной сети

¹Жорж Георгиевич Левицкий

²Женис Жумырович Иманов

³Асель Данияловна Нургалиева

¹⁻³ Карагандинский государственный технический университет, Казахстан
100026, Бульвар Мира 56, Караганда

¹Доктор технических наук, профессор

E-mail: m611adn@mail.ru

²Кандидат технических наук, доцент

E-mail: m611adn@mail.ru

³Кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: m611adn@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы построения квазианалоговых моделей расчетных вентиляционных схем шахт и рудников.

Ключевые слова: вентиляционная сеть; преобразование; многоугольник; депрессия; расход воздуха; многополюсник; квазианалоговая модель.