

УДК 622.416 + 622.45

# Обоснование эффективных вариантов регулирования вентиляции подземного рудника и оптимизация параметров регуляторов посредством генетического алгоритма

А.В. Осинцева, С.А. Козырев  
Горный институт КНЦ РАН

**Аннотация.** Описан метод расчета возможных вариантов регулирования вентиляции рудника. В основу метода положен анализ взаимосвязанности параметров системы и генетический алгоритм. Представлены результаты реализации данного метода в системе автоматизации расчетов при проектировании вентиляционной системы подземного рудника (САПР ВС).

**Abstract.** A specific calculation method has been described to be applied for the analysis of possible mine ventilation alternatives. The application of ventilation parameters interrelationship and genetic algorithm is the basis of the method. Results of practical application of the proposed method in the specific program package (CAD VS) have been discussed.

**Ключевые слова:** вентиляция рудника, вентиляторы, регуляторы, метод расчета  
**Key words:** mine ventilation, fans, regulators, calculation method

## 1. Введение

Эффективное, качественное и устойчивое проветривание горных выработок является одним из главных факторов, определяющих безопасные условия труда в подземном руднике. Обычно для регулирования распределения воздуха используют местные регуляторы – вспомогательные вентиляторы и вентиляционные окна. Однако размещение регулирующих устройств в сети выработок далеко не всегда оказывается достаточно эффективным для решения задачи правильного распределения воздуха в рудничной вентиляционной сети. В результате могут образоваться застойные зоны, что является нарушением требований безопасности. При проектировании вентиляционной системы необходимо учитывать связность вентиляционной сети и взаимозависимость вентиляционных параметров разных выработок.

Усложняют процесс регулирования вентиляционной сети следующие факторы:

- наличие зон обрушения, через которые происходят утечки воздуха;
- многодиагональные соединения выработок сложной конфигурации;
- работающие на сеть вентиляторы главного, вспомогательного и местного проветривания, создающие нестабильность при регулировании распределения воздуха и риск опрокидывания струи;
- действие естественной тяги.

Осуществить проверку эффективности выбранного варианта расположения регуляторов в сети необходимо еще на стадии проектирования, а для этого требуется создать модель вентиляционной системы с установленными регуляторами и рассчитать распределение воздуха в ней. Анализ возможных вариантов регулирования трудно осуществлять вручную. Для максимального облегчения решения этой задачи требуется использовать автоматизированную систему проектирования вентиляционных систем, учитывающую при моделировании перечисленные выше факторы.

В Горном институте КНЦ РАН разработан метод анализа возможных вариантов размещения регуляторов в вентиляционной системе и оптимизации параметров регуляторов по различным критериям, реализованный в автоматизированной системе проектирования вентиляции рудников САПР ВС.

## 2. Расчет вентиляции рудника

Задача расчета оптимального регулирования распределения воздуха непосредственно связана с решением ряда теоретических проблем оптимизации вентиляционной системы рудника. Исследования в этой области производились С. Цоем, Е.И. Роговым, Ф.А. Абрамовым, Р.Б. Тяном, Е.Г. Давыдовым и другими (Цой, Рогов, 1965).

Задача расчета стационарного распределения воздуха в системе достаточно широко известна в теории рудничной вентиляции. Для ее решения были разработаны численные методы последовательного приближения, предложенные В.И. Беловым, М.М. Андрияшевым, В.Г. Лобачевым, П. Ренуар и др.

В настоящее время развитие данных методов продолжается, например, Кругловым Ю.В., Казаковым Б.П. Актуальным направлением является разработка программных продуктов, учитывающих характерные особенности конкретных рудников – естественную тягу, газоперенос, рециркуляцию воздуха. Схожей задачей является выбор рациональных схем проветривания транспортных тоннелей с учетом различных факторов, решению которой посвящены работы Гендлера С.Г.

САПР ВС разработана в первую очередь для условий рудников Кольского полуострова, хотя предлагаемые методы являются в большей степени универсальными и могут быть использованы для расчета вентиляции разных рудников, не опасных по выделению метана.

"Естественное" воздухораспределение – это задача распределения без строго заданных потоков внутри системы, кроме общего потока (на входе). Такая задача по сути представляет собой частный случай задачи распределения с заданными потоками. Решение данной задачи было осуществлено уже в ранних версиях САПР (*Вассерман*, 1988). Необходимость получить надежный алгоритм расчета потоков воздуха за малое количество итераций привела к модернизации алгоритма. Вопросы формирования системы уравнений в соответствии с первым и вторым законами сетей и ее эффективного решения непосредственно связаны с разработкой эффективного метода регулирования вентиляционной сети.

В предыдущей версии построение дерева осуществлялось на основе принципа минимального количества ветвей. В новом алгоритме при построении дерева сети принят приоритет минимального сопротивления, а при одинаковом сопротивлении для выполнения однозначности приоритета вводятся специальные "весовые" коэффициенты. В результате дерево графа состоит из ветвей с максимальными потоками воздуха, а в так называемых "ветвях-связях" (ветвях, образующих замкнутый контур) потоки воздуха, как правило, оказываются минимальны. Это позволило принципиально улучшить сходимость процесса, так как для контура быстро находится максимальная поправка потоков воздуха.

На основе дерева графа, оптимизированного по минимуму сопротивления, строится система нелинейных (квадратных) уравнений в соответствии со вторым законом сетей по ветвям-связям. По первому закону сетей строится система линейных уравнений по узлам сети, которая решается стандартным методом Гаусса. Полученное начальное приближение потоков воздуха затем уточняется методом последовательных приближений в процессе решения системы нелинейных уравнений.

В новом алгоритме поправка находится с заданной точностью для каждого контурного уравнения на каждом шаге (итерации) последовательного приближения. Для этого использован так называемый "итерационный" или модифицированный метод Ньютона. Такой метод решения известен давно, но, в предыдущей версии алгоритма, вероятно, из соображений экономии компьютерного времени поиск поправки ограничивался количеством итераций в итерационном методе Ньютона, а не точностью, как в новом алгоритме. Поэтому точность определения поправки оставалась неизвестна. По проведенным в процессе разработки программы численным экспериментам, количество вложенных итераций для достижения точности поправки  $0.01 \text{ м}^3/\text{с}$  для потоков воздуха в самых сложных случаях не превышает 11 для контурного уравнения (табл.). Блок-схема алгоритма решения системы нелинейных уравнений представлена на рис. 1.

Таблица. Результаты тестирования метода расчета распределения воздуха в руднике

№ теста	Кол-во ветвей	Кол-во контуров	Кол-во итераций	Макс. невязка на контуре, мм. вод.ст.		Макс. приращение на ветви, м <sup>3</sup> /с		Макс. кол-во итераций на контуре
				на 1-ой итер.	на посл. итер.	на 1-ой итерации	на посл. итерации	
1	22	6	13	3,8335	0,0059	122,817	0,0437	8
2	113	30	47	3,3825	0,045	102,05	0,046	8
3	138	34	16	9,544	0,051	63,6	0,037	9
4	500	161	36	40,957	0,093	389,97	0,047	10
5	493	160	23	33,782	0,538	101,113	0,038	8

При расчете учитывается естественная тяга, действующая в руднике, и установленные регуляторы. Быстродействие алгоритма, как и его надежность, достаточны для выбора эффективных вариантов регулирования вентиляционной системы.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма решения системы нелинейных уравнений

методов решения данной задачи, является возможность включения в совокупность регулируемых ветвей тех выработок, в которых потенциально может быть установлен вентилятор или вентиляционное сооружение. При этом для них может быть сразу указан тип регулятора, а может быть отмечен свободный его выбор программным путем. По мере увеличения множества регулируемых ветвей, увеличивается матрица корреляций и число сгенерированных программой вариантов, поэтому грамотный начальный выбор потенциальных мест регулирования сети может значительно повлиять на успешность и эффективность решения задачи.

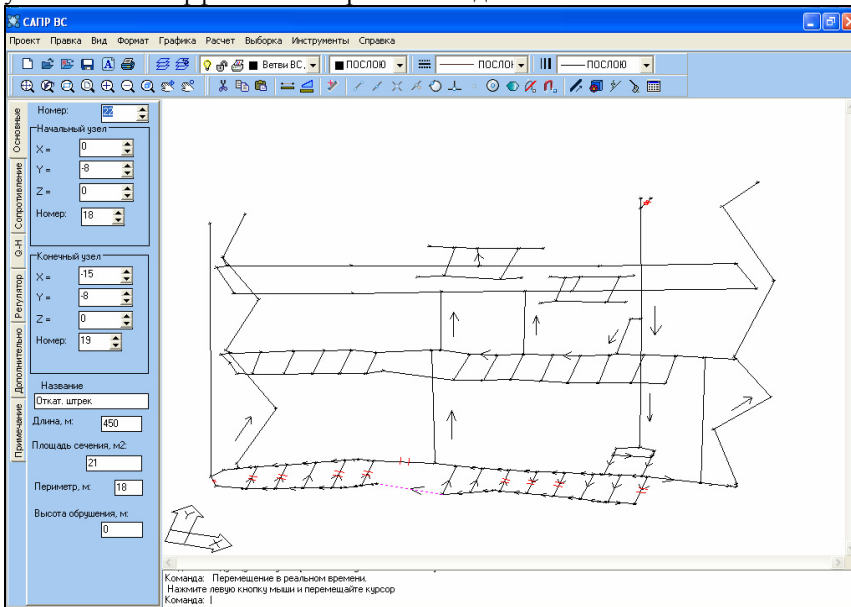


Рис. 2. Трехмерная модель вентиляционной системы рудника с регуляторами

Другим множеством ветвей, которое также определяется пользователем, является совокупность заданных ветвей – тех выработок, для которых пользователь ограничил потоки воздуха. Далее рассмотрим собственно разработанную методику корреляционного анализа вентиляционной сети, или анализа взаимосвязанности параметров системы. Уточним, что в данном случае имеется в виду под словами "корреляционный анализ", так как у этого термина существует уже устойчивое смысловое значение в теории математической статистики. В основу матриц корреляций положен коэффициент корреляции, суть которого в данном случае можно сформулировать следующим образом – это

### 3. Анализ вариантов регулирования вентиляционной системы

Задача определения эффективных вариантов регулирования вентиляционной сети состоит в определении мест, где уже установлены регуляторы, или требуется установить регуляторы определенных типов, с указанием вида и направления регулирования. Инженер-проектировщик, работающий с методическим и программным обеспечением должен использовать опыт ручного регулирования, для того, чтобы указать, какие ветви сети являются регулируемыми и заданными на трехмерной модели сети, составленной в редакторе топологии САПР ВС. На модели сети указываются и установленные регуляторы (рис. 2).

Множество регулируемых ветвей составляют ветви сети, в которых отмечен установленный регулятор, указан его тип (вентилятор главного проветривания, вспомогательный вентилятор, перемычка) и параметры (депрессия и напор вентилятора, сопротивление и площадь окна перемычки).

Наиболее интересным аспектом разработанного метода, принципиально отличающим его от других

коэффициент, характеризующий степень влияния изменения потока воздуха в одной ветви на расход воздуха в другой ветви.

Знак коэффициента корреляции имеет решающее значение при определении эффективности регулируемой ветви, так как от знака зависит направление регулирования: подходящее для данной заданной ветви или нет.

Вариант регулирования потоков воздуха в системе – это набор регулируемых ветвей с определенными видами регулирования, который обеспечивает заданное воздухораспределение. Для отбора подходящих вариантов проводится анализ: регулируются ли все заданные ветви с помощью данного варианта, и является ли суммарный коэффициент корреляции для каждой заданной ветви положительным.

Результатом анализа вариантов регулирования системы является список вариантов, которые позволяют минимизировать невязку расходов воздуха по заданным ветвям.

#### **4. Оптимизация параметров регуляторов посредством генетического алгоритма**

Дальнейшее решение задачи регулирования направлено на поиск конкретных параметров регуляторов для выбранного варианта, отвечающим тем или иным критериям оптимизации. Первым критерием оптимизации является минимизация невязок расходов воздуха в заданных ветвях, вторым – минимальное количество регуляторов, третьим – минимальная полезная мощность, затрачиваемая на проветривание сети.

Для того чтобы применить генетический алгоритм к решению конкретной задачи оптимизации нужно определиться с кодированием переменных и задать функцию приспособленности. Сам алгоритм реализован в нескольких готовых библиотеках в различных вариантах.

Начнем с вопроса о представлении параметров, которые нужно оптимизировать, т.е. "генов" в терминологии генетических алгоритмов. Очевидно, что такими параметрами являются сопротивления для тех ветвей, в которых вид регулирования – изменение аэродинамического сопротивления перемычки, а также депрессии вентиляторов для ветвей, в которых регулирование осуществляется посредством изменения рабочего режима вентилятора. Поскольку значения этих параметров при работе алгоритма генерируются в определенном пространстве решений, то необходимо задать границы интервалов для сопротивления и депрессии. От того, насколько успешно эти границы определены пользователем, зависит успех всего решения, это принципиальный момент. Разрядность "гена" для удобства двоичного кодирования может быть выбрана из 8 бит, 16 бит или 32 бит при инициализации переменных. Процедура преобразования позволяет однозначно определить параметры всех регулируемых ветвей рассматриваемого варианта по битовой строке "хромосомы".

Не менее важным вопросом приложения генетического алгоритма к решению конкретной задачи оптимизации является задание функции приспособленности. Поскольку она напрямую отражает степень "пригодности" данного набора параметров регуляторов для решения поставленной задачи, важно учесть в ней многокритериальность оптимизации системы регуляторов. В качестве первого критерия оптимизации была выбрана суммарная невязка расходов по заданным ветвям, в качестве второго критерия – полезная мощность, затрачиваемая на проветривание сети. Критерий минимального количества регуляторов в решении не учитывается, поскольку пользователь уже выбрал конкретный вариант расположения в ветвях регуляторов определенных типов. Возможен также взвешенный критерий, но для его определения необходимо задать коэффициенты для суммарной невязки и для мощности.

Для каждой "хромосомы" определяются значения регуляторов воздухораспределения, и рассчитывается система нелинейных уравнений по методу простых итераций, после этого потоки воздуха корректируются по заданным потокам для ВГП. По полученному новому распределению воздуха определяется значение функции приспособленности в соответствии с разработанным алгоритмом и выбранным критерием оптимизации.

После инициализации всех параметров производится запуск алгоритма. Случайным образом инициализируется первое "поколение хромосом", рассчитывается их приспособленность и с ними производится "скрещивание" и "мутация" с заданными вероятностями, после чего следующее "поколение" составляется из потомков. При использовании стратегии элитизма "хромосома" с лучшим значением приспособленности копируется в следующее поколение без изменений. Выбор "хромосомы" для воспроизведения реализован в соответствии с "турнирным отбором" – случайно выбирается 2 "хромосомы", из них выбирается одна с лучшим значением приспособленности.

После создания каждого следующего "поколения" оценивается лучшее значение приспособленности "хромосом" для него, и если это значение незначимо отличается от лучшего значения приспособленности предыдущего поколения, то увеличивается счетчик. Когда значение

счетчика превышает заданное максимальное значение, алгоритм останавливается. Если этого не происходит, остановить алгоритм можно вручную. Параллельно с расчетом на графике отображается лучшее значение приспособленности для текущего "поколения" и общее количество "поколений" (рис. 3). По результатам работы алгоритма выводятся параметры регуляторов для лучшей "хромосомы" последнего "поколения", осуществив по ним расчет распределения воздуха можно получить список невязок по всем заданным ветвям, полезную мощность и суммарную невязку.

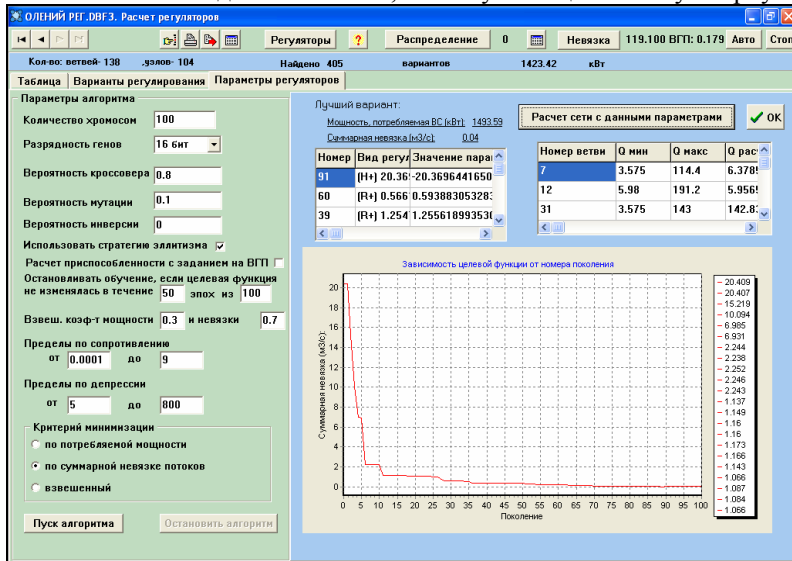


Рис. 3. Минимизация системы регуляторов с помощью генетического алгоритма

Представленный алгоритм оптимизации параметров регуляторов позволяет найти практически реализуемый вариант регулирования сети, отвечающий выбранному критерию оптимизации. В решении учитывается многокритериальность проблемы, наличие различных диапазонов вариации сопротивления и депрессии для разных регулируемых ветвей, наличие зон обрушения и естественной тяги при расчете полезной мощности, затрачиваемой на проветривание сети. Реализация представленного алгоритма в САПР ВС позволила даже для большого количества вариантов (400-600) автоматизировано определять минимальную невязку расходов воздуха по заданным ветвям, достигаемую после 100 "поколений", за приемлемый срок. Анализ полученных невязок дает пользователю возможность окончательно выбрать вариант регулирования, который удовлетворяет выбранным критериям оптимизации.

## 5. Выводы

Разработанный метод позволяет автоматизировано определять параметры и места расположения регуляторов в вентиляционной системе рудника с целью достижения требуемых расходов воздуха в заданных ветвях системы и минимизации потребляемой мощности. Апробация метода на различных моделях показала надежность его применения при проектировании вентиляции. Гибкий алгоритм регулирования дает возможность инженеру-проектировщику участвовать в решении, задавая множество регулируемых ветвей, критерий оптимизации, границы интервалов регулирования параметров. Такой подход позволяет эффективно решить задачу регулирования распределения воздуха в сложных разветвленных вентиляционных сетях.

## Литература

- Вассерман А.Д. Проектные обоснования параметров вентиляции рудников и подземных сооружений. *Л., Наука*, 152 с., 1988.
- Цой С., Рогов Е.И. Основы теории вентиляционных сетей. *Алма-Ата, Наука*, 281 с., 1965.