

УДК 622.416 + 622.45

## Автоматизация проектирования вентиляции подземного рудника

С.А. Козырев, А.В. Осинцева

Горный институт КНЦ РАН

**Аннотация.** Представлены результаты разработки системы автоматизации расчетов при проектировании вентиляционной системы подземного рудника (САПР ВС). Описаны функциональные возможности и интерфейс программного пакета. Предложен метод оптимизации количества и расположения регуляторов в вентиляционной системе.

**Abstract.** A specific program package (CAD VS) to be applied in underground mine ventilation problem solutions has been shown. The program functionality and interface have been described. A technical approach to optimize number and location of ventilation regulators has been proposed.

**Ключевые слова:** вентиляция, автоматизация, вентиляционная сеть, регуляторы, оптимизация, проектирование подземного рудника, генетические алгоритмы, корреляционный анализ, трехмерная модель

**Key words:** ventilation, optimization, automation, underground mine planning, three-dimensional model, ventilation network, genetic algorithm, correlation analysis, ventilation regulator

### 1. Введение

В настоящее время очевидна необходимость автоматизации расчетов при решении вентиляционных задач, в частности, при определении режимов функционирования вентиляционной системы. Моделирование вентиляционных систем производится путем построения сложной гетерономной сети с внутренними и внешними источниками подачи и распределения воздушных потоков с учетом внешних метеорологических и других факторов.

В ряде стран разработаны программные пакеты, позволяющие решать вентиляционные задачи, учитывающие специфику конкретных горных предприятий, например, угольных шахт с естественным выделением из пород горючих и взрывоопасных газов, технологической пыли, аварийные ситуации (в частности, пожары).

Подземные горнорудные предприятия имеют несколько иную специфику, отличную от угольных шахт, в первую очередь отсутствие в большинстве случаев естественного выделения горючих и взрывоопасных газов. Вместе с тем комплексы выработок на рудниках большой производительности обладают сильно разветвленной сетью горных выработок, суммарная протяженность которых достигает сотни километров. В вентиляционную сеть входят и зоны обрушенных руд и пород (при системах разработки с массовым обрушением), создающие аэродинамические контакты атмосферы подземных выработок с дневной поверхностью. В сети выработок работают многочисленные вентиляторы, устья ряда выработок расположены на различной высоте и по-разному ориентированы относительно сторон света, а районы расположения рудников имеют сложную топографию.

Программный пакет САПР-ВС, разрабатываемый в Горном институте КНЦ РАН, в определенной мере претендует на универсальность, с позиций полноты учета внешних и внутренних факторов. В его модулях учтено физическое состояние атмосферы дневной поверхности и рудничной атмосферы, топография района расположения и ориентация устьев горных выработок, процесс взаимодействия их с работой вентиляторов в сети, а также неоднородности аэродинамических сопротивлений зон обрушения, которые аппроксимируются двучленным (с линейной составляющей) законом сопротивления движению воздуха. Это позволяет моделировать (рассчитывать варианты) вентиляционных систем (ВС), производить их оценку и выбор оптимальных параметров при решении основных вентиляционных задач:

- рассчитывать составляющие сложной естественной тяги,
- выбирать типы вентиляторов и определять режимы их работы,
- рассчитывать воздухораспределение в гетерономной сети большой размерности,
- производить оценку безопасности воздушной среды в выработках при функционировании ВС,
- оптимизировать систему регуляторов воздухораспределения.

## 2. Обзор возможностей программного пакета САПР ВС

Одной из основных задач при проветривании рудника является задача поддержания необходимого и достаточного расхода воздуха в каждый момент времени во всех или некоторых выработках. Решить эту задачу можно только путем управления воздухораспределением. Регулирование расхода воздуха в ветвях осуществляется активными или пассивными регулирующими устройствами.

Существуют различные способы регулирования расхода воздуха в вентиляционной сети: положительный, когда регулирование производится с помощью вспомогательных вентиляторов (активные регуляторы); отрицательный, когда регулирование производится с помощью вентиляционных перемычек (пассивные регуляторы); комбинированный, когда регулирование производится с помощью активных и пассивных регуляторов.

В сложных комплексах рудников определение мест размещения регуляторов, их вида (отрицательные или положительные) и общего количества является сложной задачей. Актуальность ее для рудников определяется высокими капитальными затратами на закупку и установку регулирующих устройств, а также высокими эксплуатационными расходами.

Оптимальный выбор варианта регулирования вентиляционной системы позволяет не только повысить уровень безопасности воздушной среды в выработках, но и более полно учесть в проекте стоимость системы. Поэтому в настоящее время в программных продуктах, позволяющих автоматизировать процесс расчета вентиляции, предусматриваются возможности анализа и оптимизации вентиляционной сети.

Модульная структура САПР ВС позволяет объединить задачи моделирования распределения воздуха в руднике с зонами обрушения с учетом действия естественной тяги и задачи оптимизации системы регуляторов. Целевое назначение САПР – обеспечение единого и удобного интерфейса системы поддержки принятия решений инженера, осуществляющего проектирование вентиляционной системы подземного рудника. В настоящее время основное направление развития САПР включает задачу расчета оптимального варианта регулирования воздуха в вентиляционной системе.

Программный пакет содержит ряд модулей:

- трехмерный редактор топологии ВС рудника, предназначенный для создания и корректировки топологической схемы рудника,
- модуль расчета естественной тяги, действующей в контурах сети с выходами устьев выработок на дневную поверхность, для расчета орографической, высотнo-температурной и ветровой составляющих тяги,
- модуль расчета воздухораспределения в ВС рудника с учетом зон обрушения, естественной тяги, вентиляторов главного проветривания (ВГП) и имеющихся регуляторов воздушных потоков (вспомогательных вентиляторов и вентиляционных сооружений),
- модуль расчета параметров регуляторов ВС (вентиляционных окон и распределительных вентиляторов), их количества и оптимального расположения для обеспечения заданного распределения воздуха в ВС рудника (модуль оптимизации регуляторов),
- модуль выбора оптимальных режимов работы ВГП и распределительных вентиляторов для обеспечения подачи необходимого количества воздуха с графическим представлением основных характеристик и показателей их работы,
- модуль предпроектных расчетов ВС рудника, позволяющий проводить достаточно детальную оценку и выбор основных параметров ВС уже на стадии технико-экономических обоснований (ТЭО).

Для создания модели вентиляционной сети в трехмерном координатном пространстве используется графическая библиотека VeCad, ориентированная на автоматизацию выполнения основных задач, возникающих при разработке трехмерной сцены, и создание интерфейса программы, максимально схожего с интерфейсом системы Autocad. Моделирование вентиляционной сети в трехмерной системе координат основано на использовании векторных примитивов.

Модель вентиляционной сети в редакторе представляет собой трехмерный оргграф сети, дополненный условными обозначениями регулирующих устройств (ВГП, вспомогательных вентиляторов и вентиляционных сооружений) (рис. 1). Все ветви снабжены подписями, которые содержат информацию о выбранных характеристиках ветви (аэродинамическом сопротивлении, депрессии, расходе воздуха). Для того, чтобы сделать схему максимально наглядной, существует возможность настроить как отображаемые в подписях параметры ветви, так и размер обозначений изображений регуляторов. Созданную модель сети можно сохранить в файле формата dxf или dwg, что позволяет просматривать и выводить на печать схему из других САПР, в том числе из Autocad. Кроме того, в табличном отформатированном виде отчет о топологии сети можно сохранить в формате MS Excel.

Помимо инструментов поддержки ввода топологической информации в редакторе существует ряд дополнительных инструментов, основным из которых является оценочный расчет линейной и

квадратичной составляющей аэродинамического сопротивления выработок для тех ветвей, в которых сопротивление не было задано пользователем. Полезным способом проверки правильности ввода топологии является выбор инструмента, позволяющего вывести отчет о найденных программой типичных ошибках. При этом проверяется нумерация ветвей и узлов, связность графа, наличие узлов входа-выхода на поверхность.

Особенно удобным является поддержка импорта схемы, созданной в Autocad. При этом автоматически распознаются ветви вентиляционной системы, отображенные линиями. Задание всех параметров отдельной ветви производится на вкладках, что увеличивает площадь просмотра схемы. В редакторе существуют возможности распределения объектов по слоям, выбора нужного двух- и трехмерного вида просмотра схемы, интерактивного масштабирования и перемещения объектов. При выборе ветви на схеме на вкладках сразу отображаются все данные, связанные с ней, в том числе расход воздуха, сопротивление и депрессия, что позволяет перейти к их редактированию. Использование инструмента навигации, встроенного в редактор, помогает пользователю программы быстро переходить от одной области большой схемы к другой, а использование инструмента автоматического увеличения позволяет увидеть в отдельном окне увеличенный участок схемы.

Так как при подготовке проектной документации возникает необходимость в использовании стандартных обозначений, существуют возможности настройки обозначений регуляторов, направлений потоков и текстовых подписей в редакторе для наиболее полного учета нормативных требований.

Работа с модулями расчета в программе выполняется с помощью ряда вспомогательных окон, вызываемых при выборе соответствующих пунктов меню. Важным является тот факт, что все процедуры расчета включают решение сетевых задач, формулируемых на основе введенной в редакторе топологии. Поэтому ошибки на этапе ввода и редактирования топологической схемы являются критичными для решения последующих задач анализа графа сети и оптимизации системы регуляторов. Все необходимые данные для расчета вводятся пользователем программы на вкладках для заданных ветвей. Это позволяет быстро найти ветви с установленными регуляторами, изменить границы регулирования потоков воздуха и после расчета воздухораспределения в сети проанализировать изменения на схеме.

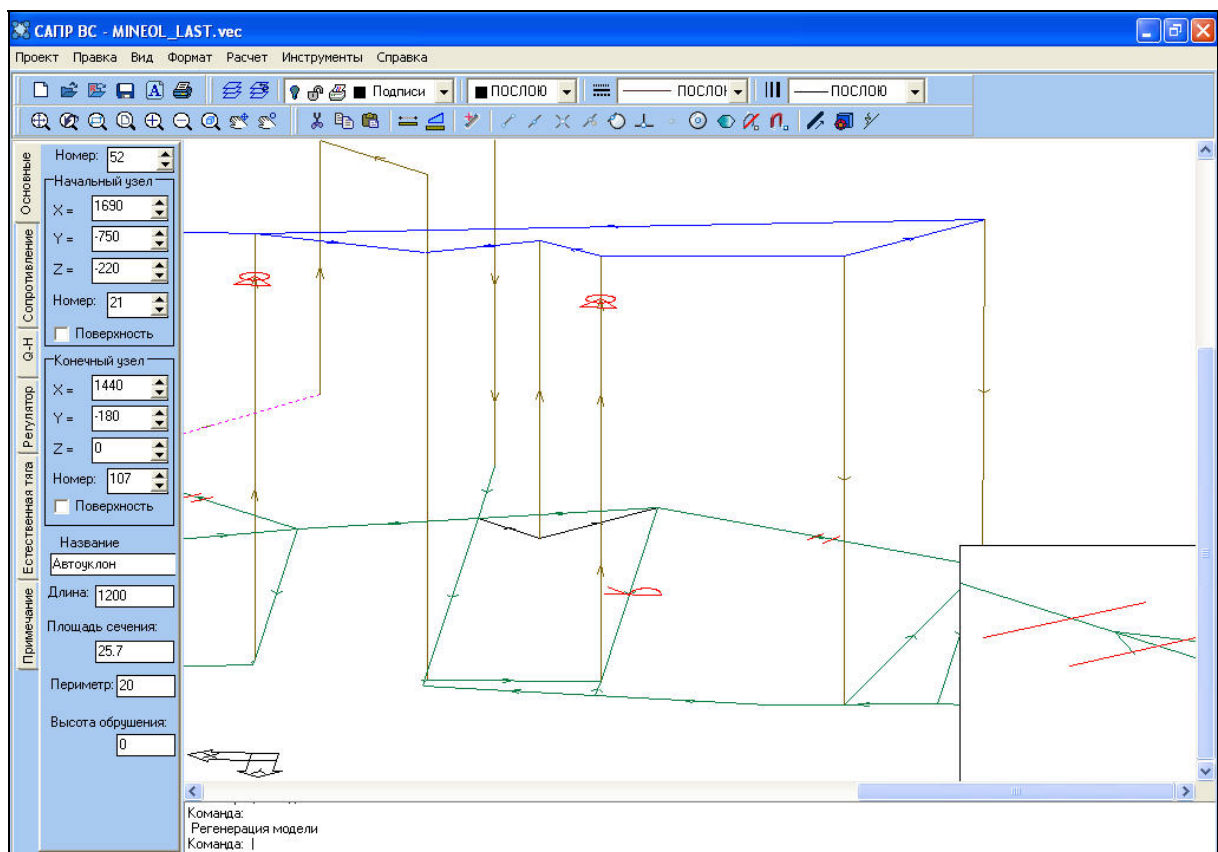


Рис. 1. Трехмерный редактор топологии вентиляционной сети

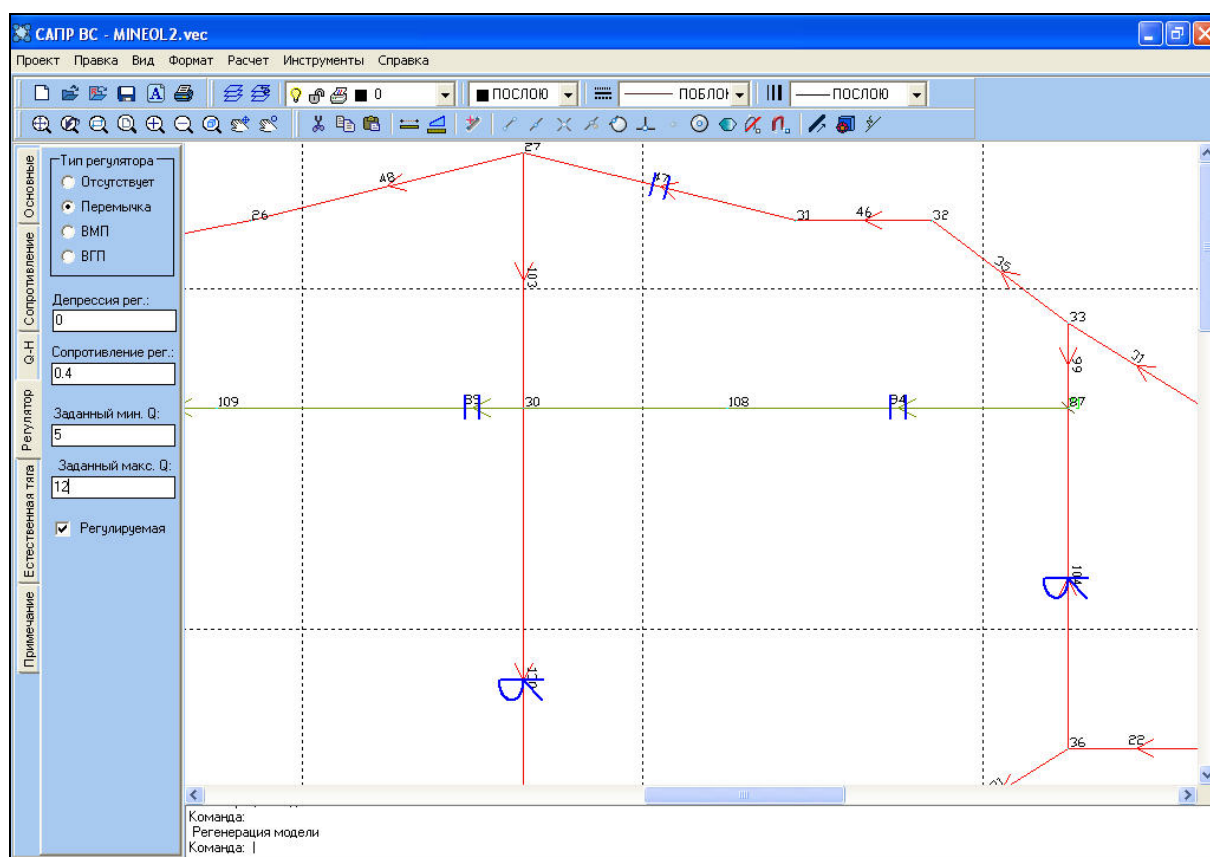


Рис. 2. Вентиляционный план горизонта

### 3. Метод оптимизации системы регуляторов в вентиляционной сети рудника

Задача расчета оптимального варианта регулирования распределения воздуха непосредственно связана с решением ряда сложных теоретических проблем оптимизации вентиляционной системы рудника. При анализе различных вариантов регулирования вентиляции необходимо осуществить многократный расчет распределения воздуха в системе с учетом установленных регуляторов. Актуальной является проблема совершенствования численных методов расчета стационарного воздухораспределения с целью улучшения их сходимости и уменьшения числа итераций. То обстоятельство, что при комбинаторных переборах вариантов расположения регуляторов в сети неизбежно требуется осуществлять расчет каждого нового варианта воздухораспределения, накладывает особенно критичные требования как на сходимость численного метода, так и на время счета.

Основным методом, который используется в современных программных комплексах расчета вентиляции рудников, является метод Андрияшева-Кросса. Неудовлетворительная сходимость данного метода является причиной продолжения исследований по модификации численного метода расчета. Перспективным представляется применение некоторых методов моделирования потокораспределения в водяных сетях в области расчета распределения воздуха. Однако при этом следует учитывать особенности, накладываемые постановкой задачи, в частности, возможность задания напорных характеристик произвольного вида для вентиляторов, работающих в системе.

В САПР BC для расчета распределения воздуха в вентиляционной системе использована оптимизация системы уравнений по минимуму аэродинамического сопротивления и решение системы методом последовательных приближений (Андрияшева-Кросса) с уточнением поправок на каждом шаге модифицированным методом Ньютона. Такая методика расчетов позволяет получить относительно быструю сходимость численного решения (для BC 500 ветвей количество итераций составляет 35 по сравнению с 400-500 для классической реализации метода Андрияшева-Кросса, кроме того, время счета по модифицированному методу составляет 0,016 с в сравнении с несколькими секундами) (Osintsev et al., 2005).

Задача управления вентиляционной системой в общей постановке не имеет однозначного решения, т.е. вариантов регулирования может быть бесконечно много или может не быть вообще. Если решение для заданного множества ограничений на расходы воздуха в некоторых ветвях существует, то определенный диапазон регулируемых параметров соответствует допустимым расходам воздуха в

ветвях. В большинстве случаев заданным ограничениям удовлетворяют варианты регулирования воздухораспределения, отличающиеся по типу рекомендуемых регуляторов, общему количеству регуляторов в системе и конкретному расположению регуляторов в ветвях сети. Задача управления заключается не только в нахождении какого-нибудь любого решения и даже не всего возможного диапазона решений, но в выборе одного из всех возможных решений по определённому критерию.

Критерии оптимизации могут быть различными, но, как правило, решение выбирается по критерию минимизации энергозатрат на проветривание системы или по критерию наименьшего количества регуляторов. Каждый вариант регулирования вентиляции рудника имеет свои характерные особенности и может быть удачным или неудачным с позиции целого ряда других факторов. В число таких факторов входят технологические проблемы установки и последующей эксплуатации регуляторов в выбранных ветвях сети, стабильность воздушных потоков при изменении топологии сети в процессе ведения горных работ, необходимость установки датчиков контроля в определенных выработках (Вассерман, 1988). Отдельно стоит отметить стоимость приобретения вентиляторов заданного типа, если рассматривается вариант активного регулирования воздухораспределения. Очевидно, что окончательная оценка эффективности варианта регулирования может быть произведена только специалистом, в то время как программный продукт должен выступать в качестве системы поддержки принятия решений в области оптимизации вентиляции.

Во многих программных продуктах, в которых была предпринята попытка реализации определенного алгоритма оптимизации регулирования, не учитывались возможные ограничения на потенциальную установку регуляторов в некоторых ветвях системы. Ряд применяемых в этой области методов расчета вообще подразумевает обязательную установку вспомогательных регуляторов во всех тех ветвях вентиляционной сети, где заданы ограничения на потоки воздуха. Эта особенность стандартных методов нелинейной оптимизации не позволяет применять их для анализа ряда вариантов расположения в системе вспомогательных вентиляторов и вентиляционных окон.

В настоящее время наиболее перспективным представляется анализ вариантов регулирования с помощью генетических алгоритмов (Yang et al., 2001). Под генетическими алгоритмами понимается в данном случае относительно недавно появившаяся и активно развивающаяся область математики, включающая эволюционный поиск в пространстве решений. В данных алгоритмах потенциальное решение определенной проблемы кодируется в виде простой структуры данных, условно считающейся подобной биологической хромосоме (Mitchell, 1999). Основным свойством, общим для всех таких алгоритмов, является применение операторов рекомбинации к данным структурам, позволяющим сохранять критическую информацию. Часто современные генетические алгоритмы понимаются только как процедуры оптимизации функции, но в действительности область их применения гораздо шире и не исследована до конца.

Обычно существует два аспекта генетического алгоритма, которые являются предметно-ориентированными: проблема кодирования и функция оценки. Нелинейность задачи обуславливает невозможность оценки каждого параметра независимо от всех остальных, так как вентиляционная система является сложной и многосвязной системой.

При решении задачи оптимизации регуляторов функция, реализующая расчет эксплуатационных затрат, должна включать моделирование воздухораспределения в руднике и расчет расходов во всех ветвях для определенных сопротивлений пассивных регуляторов и напоров вспомогательных вентиляторов. Очевидно, что реализация такой функции должна включать подбор оптимальных параметров регуляторов, при условии их установки в выбранных ветвях системы. Однако данный процесс является достаточно трудоемким и вычислительно сложным. Необходимо учитывать, что при выборе некоторых значений депрессии вентиляторов в базе данных имеющихся типов вентиляционных устройств может просто не оказаться вентилятора, который бы работал в устойчивом режиме и с высоким КПД, развивая требуемый напор.

По этим причинам для оценки эффективности конкретного варианта расстановки регуляторов можно использовать приближенную оценку, подразумевая затем расчет конкретных параметров регуляторов на последнем этапе работы пользователя с системой поддержки принятия решения, с условием обязательной проверки достижимости целей регулирования. Функция оценки должна быть быстрой. Так как генетический алгоритм работает с набором возможных решений в каждом поколении, он включает обязательную оценку эффективности каждого из них.

Для оценки варианта регулирования может быть использован подход, основанный на анализе коррелированности (или взаимозависимости) расходов воздуха в разных ветвях. В частности, можно ввести коэффициент корреляции, показывающий, насколько изменение расхода воздуха в регулируемой ветви влияет на поток воздуха в некоторой заданной ветви.

Однако расчет матриц корреляции – трудоемкий процесс, и его целесообразно произвести один раз, перед выполнением генетического поиска. После сортировки ветвей по взвешенному суммарному коэффициенту корреляции с учетом направления регулирования задается оценка каждой конкретной регулируемой ветви как потенциального места установки регулятора определенного вида. Затем функция оценки эффективности варианта регулирования включает анализ каждого выбранного в данном варианте регулятора с помощью уже построенного ряда оценок регулируемых ветвей и выбор соответствующего показателя эффективности.

В представленном методе оптимизация производится по критерию минимума эксплуатационных затрат на проветривание. Введение в алгоритм критерия минимума установленных в системе регуляторов возможно следующим образом: сначала производится решение задачи для одного регулятора, затем оценивается полученное решение с точки зрения выбранного типа регулятора и достижимости целей регулирования. Если необходимо, пользователь продолжает работу с системой поддержки принятия решения, но уже для двух, трех и большего количества регуляторов. На каждом промежуточном этапе производится не только программная оценка решения поставленной задачи, но и субъективная оценка самим пользователем. Сам инженер-проектировщик решает, какие результаты являются наиболее приемлемыми, анализируя сохраненные системой протоколы.

Такой подход к оптимизации системы регуляторов представляется наиболее гибким, так как позволяет учесть как критерий минимума затрат на проветривание, так и критерий минимума регуляторов.

Следует подчеркнуть, что при моделировании обычно решаются локальные задачи и в любой последовательности. Но решение задачи оптимизации воздухораспределения в вентиляционной сети требует проведения расчетов в следующей строгой последовательности:

- 1) после задания топологии вентиляционной сети в первую очередь определяются составляющие естественной тяги, действующей в контурах с выходами на дневную поверхность;
- 2) задается требуемое (необходимое) воздухораспределение в сети и с учетом действия естественной тяги производится расчет эффективных вариантов расположения регуляторов воздушных потоков в выработках (вентиляционных перемычек и распределительных вентиляторов);
- 3) оценивается отсортированный по эффективности список вариантов регулирования воздухораспределения в сети и производится расчет оптимальных параметров регуляторов для выбранного варианта;
- 4) осуществляется контроль достижимости цели регулирования при выбранном расположении регуляторов с определенными ранее параметрами;
- 5) по параметрам рабочих режимов выбирается тип вентиляторов главного проветривания (ВГП) и распределительных вентиляторов;
- 6) наконец, производится оценка параметров безопасности воздушной среды, создаваемых функционированием системы.

#### 4. Заключение

Применение представленной последовательности расчетов позволяет наиболее эффективно использовать описанный программный пакет в качестве системы поддержки принятия решений по оптимизации регуляторов воздухораспределения подземного рудника. Следует заметить, что окончательный выбор варианта регулирования при работе с системой остается за специалистом. Универсальность и модульность программного пакета позволяет осуществлять решение всех основных вентиляционных задач как по отдельности, так и в совокупности.

#### Литература

- Mitchell M.** An introduction to genetic algorithms. *London, A Bradford Book, The Mit Press*, 162 p., 1999.
- Osintsev V.V., Vasserman A.D., Kozyrev S.A.** Computer-aided design (cad-vs) and organization of underground mine ventilation. *Proceedings of the 8-th International Symposium on Mining in the Arctic (ed. N.N. Melnikov and S.P. Reshetnyak). Apatity, June 20-23, 2005; Published by JSC "Ivan Fyodorov Printing House", St-Petersburg*, p.169-176, 2005.
- Yang Z.A., Lowndes I.S., Denby B.** The optimal design and operation of multi-level booster fan ventilation systems. *Proceedings of the 7-th International Mine Ventilation Congress (ed. S. Wasilewski; Research and Development Center EMAG), Cracow, June 17-22, 2001; Published by EMAG, Research & Development Center for Electrical Engineering and Automation in Mining, Cracow*, p.739-745, 2001.
- Вассерман А.Д.** Проектные обоснования параметров вентиляции рудников и подземных сооружений. *Л., Наука*, 152 с., 1988.